

**Modélisation courantologique
du lagon de Mayotte**

Rapport final

BRGM/RP-56334-FR
Septembre 2008

BRGM/RP-56334-FR
Septembre 2008



Modélisation courantologique du lagon de Mayotte

Rapport final

BRGM/RP 56334-FR

Septembre 2008

Étude réalisée dans le cadre des projets
de Service public du BRGM 2007

Y. De La Torre, M. Delattre, D. Idier, E. Romieu
avec la collaboration de E. Delvallee, G. Le Cozannet

Vérificateur :

Nom : C. Oliveros

Date :

Signature :

Approbateur :

Nom : JL Nedellec

Date :

Signature :

En l'absence de signature, notamment pour les rapports diffusés en version numérique,
l'original signé est disponible aux Archives du BRGM.

Le système de management de la qualité du BRGM est certifié AFAQ ISO 9001:2000.



Mots clés : lagon, Mayotte, courants, modélisation, mesures.

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

De La Torre Y., Delattre M., Idier D., Romieu E., collab. Delvallee E. et Le Cozannet G.
(2008) - Modélisation courantologique du lagon de Mayotte. Rapport BRGM/RP-56334-FR,
133 p.

Synthèse

La connaissance de la courantologie du lagon de Mayotte est une information indispensable à la gestion cohérente des masses d'eaux de l'île, notamment sur les problématiques des rejets en mer et de lutte contre les pollutions marines.

Or, cette information est aujourd'hui fragmentaire (1/5ème du lagon) et hétérogène (diversité des méthodes utilisées). Il manque donc un modèle « régional », c'est-à-dire un modèle d'échelle intermédiaire entre un modèle général du bassin océanique et un modèle local, servant de référence homogène et prenant en compte l'ensemble du lagon.

Cette étude, cofinancée par la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, la Collectivité Départementale de Mayotte et la dotation de Service Public du BRGM, a pour objectif de **réaliser une modélisation numérique 2DH de la courantologie de l'ensemble du lagon, basée sur des paramètres de marée et de vent.**

Mis en place et validé à partir d'une importante campagne de mesure réalisée en novembre et décembre 2007, le modèle permet de représenter l'hydrodynamique générale du lagon, avec une prédiction des cotes de surface libre (niveau d'eau) et une estimation qualitative fiable des circulations dans le lagon.

Six scénarios typiques ont été simulés afin de représenter le rôle de la marée (en mortes et vives eaux) et du vent de mousson (Nord-ouest) et d'alizé (Sud) sur la circulation des eaux lagonaires.

Les résultats de ces simulations mettent en évidence le rôle majeur de la marée, le vent de Nord-Ouest ou de Sud ne parvenant à contrer le courant tidal que lorsqu'il est relativement fort et la marée relativement faible (conditions de vent de 10 m/s et de marée de mortes-eaux par exemple).

La circulation tidale générale est telle que, au large du lagon, les courants de flot sont orientés vers le SW et ceux de jusant vers le NE. Les courants de flot sont entrants dans tout le lagon, sauf à l'Ouest de la plateforme effondrée, et vice-versa au jusant. Cette circulation est contrainte par deux zones principales d'échange avec le large :

- d'une part la large ouverture de la plate-forme effondrée du Nord-Ouest influence tout l'Ouest du lagon, le Nord-Ouest et le Nord-Est jusqu'au détroit de Mamoudzou avec des courants globalement de Sud ou de Nord en fonction du flot ou du jusant ;
- d'autre part, les passes du Sud-Est influencent le Sud et l'Est du lagon jusqu'au détroit de Mamoudzou avec des courants rentrants vers le Nord à l'Est du lagon et vers l'Ouest au Sud du lagon pour le flot, et inversement pour le jusant.

L'hydrodynamique dans la partie Ouest et Sud Ouest du lagon est globalement plus faible.

Les vitesses maximales modélisées (scénarios sans vent) sont de l'ordre de 1 m/s et ne concernent que les passes et les récifs barrières. Des vitesses intermédiaires (entre 0.2 et 0.8 m/s) se retrouvent notamment dans le lagon dans les zones d'étranglement (détroit de Mamoudzou et goulet au sud de l'îlot de Mstamboro). Les zones à faible hydrodynamisme (< 0.2 m/s) se trouvent à l'Ouest au Sud-Ouest et à l'Est du lagon. Il est toutefois à noter que dans certains cas le modèle sous-estime légèrement les vitesses par rapport aux mesures effectuées.

Ainsi, ces informations complètent la cartographie interprétative existante sur la circulation des courants dans le lagon et fournissent des éléments de quantification des vitesses. Elles affichent une bonne cohérence avec les modèles locaux et constituent une référence utile aux décideurs pour la gestion globale du lagon.

Le BRGM remercie le Service Environnement de la DAF, la Brigade Nature/ONCFS, APNEE et IXSURVEY pour leur collaboration technique au projet lors des campagnes de mesure.

Sommaire

1. Introduction	15
2. Contexte.....	17
2.1. PRESENTATION GENERALE DU LAGON	17
2.2. CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE.....	17
2.2.1. La marée.....	18
2.2.2. Les conditions climatiques.....	18
2.2.3. La houle	21
2.2.4. Les courants océaniques.....	22
2.2.5. La bathymétrie	22
2.3. ETUDES ANTERIEURES	22
2.3.1. Observations ponctuelles	24
2.3.2. Les modèles courantologiques.....	28
3. Observations in-situ.....	31
3.1. CAMPAGNE DE MESURE.....	31
3.1.1. Choix des mouillages et appareils utilisés	31
3.1.2. Contexte hydrométéorologique.....	33
3.1.3. Déroulement de la campagne	36
3.1.4. Bilan et validité des mesures pour l'étude	42
3.2. TRAITEMENT DES DONNEES.....	42
3.2.1. Pré-traitement	42
3.2.2. Extraction des composantes tidales	43
3.2.3. Calcul de la vitesse intégrée sur la verticale.....	45
3.3. RESULTATS ET ANALYSES	48
3.3.1. Hydrodynamique tidale.....	48
3.3.2. Hydrodynamique tidale 2DH.....	50
3.3.3. Hydrodynamique totale 2DH	55
4. Mise en place du modèle	60
4.1. CHOIX DU CODE	60
4.2. DESCRIPTION DU CODE MARS	60

4.3. MISE EN PLACE DU MODELE A MAYOTTE.....	62
4.3.1. Configuration : emprise et résolution	62
4.3.2. Bathymétrie	62
4.3.3. Méthode d'emboîtement adoptée	64
4.3.4. Forçage en marée à la limite ouverte	66
4.3.5. Forçage météorologique.....	67
4.4. CALIBRATION DU MODELE.....	68
4.4.1. Calibration de chaque rang.....	68
4.4.2. Choix final des paramètres	70
5. Validation du modèle	71
5.1. DONNEES DE VALIDATION ET METHODOLOGIE	71
5.2. HYDRODYNAMIQUE TIDALE.....	72
5.2.1. Hauteur d'eau.....	72
5.2.2. Courants de marée.....	74
a) Les passes	74
b) L'intérieur du lagon.....	76
c) Statistiques.....	76
5.3. HYDRODYNAMIQUE TOTALE	77
5.3.1. Reproduction de la cote de surface libre.....	77
5.3.2. Courants totaux	82
5.4. CONCLUSION SUR LA VALIDATION DU MODELE	89
5.4.1. Niveaux d'eau.....	89
5.4.2. Courants.....	89
6. Scenarios et résultats	91
6.1. DEFINITION DES SCENARIOS	91
6.1.1. Conditions de marée	91
6.1.2. Conditions de vent.....	91
6.1.3. Scenarios simulés	93
6.2. SCENARIOS SANS VENT	94
6.2.1. En marée de mortes-eaux moyennes (coefficient 45).....	94
6.2.2. En marée de vives-eaux moyennes (coefficient 95).....	100
6.3. SCENARIOS AVEC VENTS.....	105
6.3.1. En marée de mortes-eaux	105

6.3.2. En marée de vives-eaux.....	108
6.4. CONCLUSION	108
7. Analyse des résultats	111
7.1. LES CIRCULATIONS CARACTERISTIQUES	111
7.1.1. Les circulations principales liées à la marée.....	111
7.1.2. Les circulations induites par le vent.....	111
7.1.3. Les vitesses maximales des courants de marées.....	116
7.2. COMPARAISONS AVEC LES DONNEES ANTERIEURES	116
7.2.1. Circulations générales tidales.....	116
7.2.2. Courants totaux.....	116
a) Modèle vs observations antérieures	118
b) Modèle vs modélisations antérieures	119
7.2.3. Conclusion	119
7.3. NOUVELLE CARTOGRAPHIE INTERPRETATIVE.....	119
8. Conclusion	125
9. Bibliographie	127

Liste des illustrations

Illustration 1 – Direction des vents dominants (Raunet, 1992)	19
Illustration 2 – Vents maximums instantannés journaliers sur la période 1963-2007 à la station de Pamandzi (données Météo-France).....	21
Illustration 3 – Cartographie interprétative de l'hydrodynamique du lagon (Porcher et al., 2002)	23
Illustration 4 – Synthèse des données courantologiques disponibles en 2006 (De La Torre et Idier, 2006).	25
Illustration 5 – Localisation des mesures de courants (carrés rouge) et intensité maximale mesuré sur la tranche d'eau (adapté de Guilcher et al, 1965).	26
Illustration 6 – Synthèse de mesures de courants réalisées dans le lagon.....	27
Illustration 7 - Capteurs et leur structure de fixation	32
Illustration 8 - Localisation des capteurs déployés en novembre-décembre 2007. Bathymétrie du lagon et des marges externes. MNT issu de données bathymétriques SHOM.....	32

Illustration 9 – Coefficient de marée (SHOM) à la station de Dzaoudzi pendant la campagne.	33
Illustration 10 – Prédiction de la cote de surface libre (marée) du SHOM à Dzaoudzi pendant la campagne par rapport au zéro hydrographique.	33
Illustration 11 - Météorologie locale à partir des données Météo France de la station de Dzaoudzi : (a) vitesse du vent, (b) direction du vent, (c) pression atmosphérique.	34
Illustration 12 - Météorologie régionale à partir des sorties de modèle GFS. (a) : domaine spatial d'intégration des données de vent, (b) : vitesse du vent, (c) : pression atmosphérique.	35
Illustration 13 – Caractéristiques principales des déploiements de capteurs de courants et niveaux d'eau.....	39
Illustration 14 – Correction à appliquer à la hauteur d'eau totale mesurée pour tenir compte de l'influence de la pression atmosphérique.	41
Illustration 15- Précision relative des mesures des capteurs sur la côte de surface libre et vitesse de courant.....	41
Illustration 16 - Composantes brutes et composantes de marée (point n°9), les 22 et 23 novembre : niveau d'eau et courant mesuré à 1,05 m au dessus du fond.	44
Illustration 17- Ecart rms entre de la vitesse résiduelle (vitesse de courant brute mesuré moins composante tidale) les 22 et 23/11/2007.(en italique grisé : mesure sujette à caution cf. 3.1.4).....	45
Illustration 18 - Profils de vitesses par rapport à la Pleine Mer, le 23/11/2007. Capteur 4b. Les traits horizontaux indiquent le niveau de la surface libre.....	46
Illustration 19 – Composante tidale de la hauteur d'eau obtenues par traitement T-tide pour tous les capteurs le 22 Novembre 2007. Le référentiel vertical est le zéro relatif à chaque capteur pendant la campagne cf. 3.2.1. (Les données du capteur 6b sont sujettes à caution cf. 3.1.4).....	49
Illustration 20 – Amplitude des composantes de marée obtenues par analyse T-Tide sur les huit capteurs.....	50
Illustration 21 – Courant tidaux à $\Delta z_{v_{mes}}$ au dessus du fond (v en fonction de u en m/s) pour les capteurs ADCP et les Aquadopp.	51
Illustration 22 – Courants totaux (bleu) et de marée (vert) 2DH (intégrés sur la verticale), en faisant l'hypothèse d'une rugosité de fond $k_s=1.25m$. v en fonction de u (m/s).....	52
Illustration 23- Module et direction des vitesses maximales de courants intégrées sur la verticale – Flot et jusant du 22/1/07.....	53
Illustration 24- Modules des courants tidaux estimés par T-Tide le 22/11/2007.....	53
Illustration 25 – Heures des courants tidaux maximaux de flot, jusant et de renverse par rapport à la première Pleine Mer du 22/11/2007 prédite à Dzaoudzi par le SHOM.....	54
Illustration 26 - Composantes brutes (xe), composantes de marée(xemaree) et de signal résiduel (surc) (point n°2) sur toute la durée de la campagne.....	55
Illustration 27 – Statistiques sur les cotes de surface libre mesurées pendant la campagne.	56

Illustration 28 – Statistiques sur les modules de vitesse intégrée sur la verticale (2DH). Modules calculés en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale) pendant la campagne. V2DH TOTAL : courants totaux intégrés 2DH, V2DH MAREE : courants de marée intégrés 2DH calculé par T_Tide, V2DH RESIDUEL : courants résiduels intégrés 2DH.....	56
Illustration 29 – Courants totaux (bleu) et résiduels (rouge) 2DH (intégrés sur la verticale), en faisant l'hypothèse d'une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m. v en fonction de u (m/s)	57
Illustration 30- Récapitulatif des périodes de non renverse du courant pendant la campagne.....	58
Illustration 31- Point 1b : module et direction du vent local et du courant mesuré (vbrut), courant de marée (vmaree) et courant résiduel (vres) le 17/11 /2007.	59
Illustration 32 - Principe d'emboîtement du modèle Mars-2D.....	62
Illustration 33 - Emboitements des domaines de calcul du rang0 (R0) au rang3 (R3).....	63
Illustration 34 - Caractéristiques des domaines emboîtés du modèle Mars-2D pour Mayotte.....	63
Illustration 35 - Sources de données pour la construction des grilles bathymétriques.....	64
Illustration 36 - Lagon de Mayotte : (a) bathymétrie du rang 3 du modèle ; (b) photographie de la barrière récifale de la passe en S lors d'une marée basse de vive eau (source : APNEE).....	64
Illustration 37- Méthode d'emboîtement des quatre rangs pour le modèle de Mayotte	65
Illustration 38 - Ecart entre les résultats de marée du rang 3 du modèle et les prédictions SHOM à Dzaoudzi pour la période du 5 au 20 novembre 2007.	66
Illustration 39 - Amplitudes maximales des composantes de marée de la base de données FES2004 sur le domaine du rang 0 du modèle.	66
Illustration 40 - Conditions de vent pour la période du 6 novembre au 24 décembre : (a) données Météo France à Dzaoudzi ; (b) données GFS à 35 km de Dzaoudzi au point (13°S, 45°E)	67
Illustration 41 - Choix des paramètres dtmin et dtmax du modèle Mars-2D pour les quatre rangs de la configuration	69
Illustration 42 - Erreurs sur les vitesses et les hauteurs d'eau calculées par le modèle au rang 3 au point du capteur adcp4b pour la période du 9 au 13 novembre 2007, sans prise en compte de la météorologie.....	69
Illustration 43 - Paramètres numériques de Mars-2D choisis pour le modèle courantologique de Mayotte.....	70
Illustration 44 - Niveau d'eau : modèle et mesures traitées, (a) capteur 4b ; (b) capteur 7b ; (c) capteur 5	73
Illustration 45 - Synthèse des erreurs du modèle sur les cotes de surface libre aux différents points d'observation (période du 9 novembre au 11 décembre 2007)	73
Illustration 46 - Distribution des erreurs modèle/mesure sur la cote de surface pour l'ensemble de la campagne, capteur 4b.	74

Illustration 47 - Rose des courants de marée (v en fonction de u, en m/s) mesurés et calculés pour l'ensemble de la campagne de mesure : (a) capteur 4b ; (b) capteur 9 ; (c) capteur 1b.....	75
Illustration 48 - Intensité des courants de marée 2DH dans une passe large : modèle (en bleu) et mesures traitées (en rouge), capteur 4b (passe Sud Est)	75
Illustration 49 - Intensité des courants de marée 2DH dans des passes étroites : modèle (en bleu) et mesures traitées (en rouge), (a) capteur 9 (passe en S) ; (b) capteur 1b (passe Sud Ouest).....	75
Illustration 50 - Intensité du courant de marée 2DH : modèle et mesures traitées, capteur 7b.....	76
Illustration 51 - Distribution des erreurs entre modèle et mesures pour l'intensité des courants, capteur 1b.....	76
Illustration 52 - Synthèse des erreurs du modèle sur l'intensité des courants de marée aux différents points d'observation (période du 9 novembre au 11 décembre 2002)	77
Illustration 53 - Surcotes calculées par le modèle aux différents capteurs	78
Illustration 54 - Conditions de vent au rang 0 du modèle pour trois instants représentatifs de trois période (données GFS) : (a) Période de rencontre de vents du Nord et du Sud dans le canal du Mozambique – 11/11/2007 à 18h UT ; (b) période de vent calme – 16/11/2007 à 12h UT ; (c) période de vent du Nord modéré dans le canal – 21/11/2007 à 9h UT	79
Illustration 55 - (surcotes-surcote moyenne) au capteur 5 et analyse qualitative des conditions de vent sur la période (configurations a,b,c de Illustration 54)	80
Illustration 56 - Comparaison de cote de surface libre entre modèle et mesures du 25 au 28 novembre pour tous les points d'observation dans le lagon	81
Illustration 57 – Ecart rms entre : (1) le modèle et (2) les niveaux d'eaux observés auxquels les niveaux moyens pendant la période de campagne ont été soustraits.	82
Illustration 58 - Vecteurs courant pour la période de mesure au capteur 1b : (a) mesures ; (b) modèle.....	84
Illustration 59 - Vecteurs courant pour la période de mesure au capteur 4b : (a) mesures ; (b) modèle.....	85
Illustration 60 - Vecteurs courant pour la période de mesure au capteur 9 : (a) mesures ; (b) modèle.....	86
Illustration 61 - Comparaison des roses de courant mesurées (en rouge) et prédites par le modèle (en bleu) et erreurs RMS sur toute la période (du 9 novembre au 11 décembre).....	87
Illustration 62 - Comparaison des intensités des courants totaux entre modèle (en bleu) et mesures (en rouge) des 25 et 26 novembre pour tous les points d'observation autour du lagon	88
Illustration 63 - Synthèse des erreurs du modèle pour la reproduction des hauteurs d'eau aux différents points d'observation	89
Illustration 64 - Synthèse des erreurs du modèle pour la reproduction des intensités des courants aux différents points d'observation	90
Illustration 65 – Dates des simulations en fonction des conditions de marée (*PM = Pleine Mer)	91

Illustration 66 – Conditions initiales de vents choisies	92
Illustration 67 – Roses des vents maximums instantanés journaliers à Pamandzi sur la période 1963 à 2007 pour le mois de janvier et de juillet (données Météo-France).....	93
Illustration 68 – Synthèse des scénarios simulés	93
Illustration 69 – Marégramme du cycle de mortes-eaux du 01/01/2008 (données SHOM)	94
Illustration 70 - Vitesse et direction des courants de PM-6h à PM-3h en mortes-eaux sans vent	96
<i>Illustration 71 - Vitesse et direction des courants de PM-2h à PM+1h en mortes-eaux sans vent</i>	<i>97</i>
<i>Illustration 72- Vitesse et direction des courants de PM+2h à PM+5h en mortes-eaux sans vent</i>	<i>98</i>
Illustration 73- Vitesse et direction des courants à PM+6h en mortes-eaux sans vent	99
Illustration 74 – Marégramme du cycle de vives-eaux (coefficient 95) du 23/01/2008 (données SHOM) – heure TU	100
Illustration 75 - Vitesse et direction des courants de PM-6h à PM-3h en vives-eaux sans vent.....	101
<i>Illustration 76- Vitesse et direction des courants de PM-2h à PM+1h en vives-eaux sans vent.....</i>	<i>102</i>
Illustration 77 - Vitesse et direction des courants de PM+2h à PM+5h en vives-eaux sans vent	103
Illustration 78 - Vitesse et direction des courants à PM+6h en vives-eaux sans vent.....	104
Illustration 79 - Comparaison des vitesses et directions des courants de jusant et de flot en mortes-eaux sans vent et avec vent de NW	106
Illustration 80 – Comparaison des vitesses et directions des courants de jusant et de flot en mortes-eaux sans vent et avec vent de S.....	107
Illustration 81 – Comparaison des vitesses et directions des courants de jusant et de flot en vives-eaux sans vent et avec vent de NW	109
Illustration 82 – Comparaison des vitesses et directions des courants de jusant et de flot en vives-eaux sans vent et avec vent de S.....	110
Illustration 83 – Courants de marée (vives-eaux moyenne), (a) au flot (PM-3h) et (b) au jusant (PM+3h).....	113
Illustration 84 - Influence du vent au flot (a) et au jusant (b) : courants de marées de mortes-eaux seuls (flèches noires), courant avec vent de 10m/s de Sud (flèches rouges) et de NW (flèches blanches).....	114
Illustration 85 – Courants de marée maximaux (période : 09/11/07 au 11/12/07). Résultats du modèle.	115
Illustration 86- Représentation qualitative des courants principaux du lagon : (a) d'après les observations qualitatives (Porcher et al., 2002) ; (b) d'après les résultats du modèle au flot et au jusant	117

Illustration 87 – Comparaison des vitesses maximales 2DH du modèle (coef45 coef95 coef95+vent 10m/s NW et S) avec des courants observés dans des études antérieures (Illustration 6).	118
Illustration 88 – Comparaison des résultats du modèle aux observations de courants maximaux de Guilcher et al. (1965).	120
Illustration 89 - Comparaison des planches de courant obtenues, pour une basse-mer à Dzaoudzi, par (a) le modèle mis en place (congruence : marée de coefficient 45 et vent de Sud de 10 m/s) et (b) celles issues de l'étude du SIEAM en 2005 (Safege, 2005) (configuration : marée d'amplitude modérée et vent de Sud entre 4 et 9 m/s).	121
Illustration 90 - Comparaison des planches de courant obtenues, une heure avant la pleine mer à Dzaoudzi, par (a) le modèle mis en place (congruence : marée de coefficient 45 et vent de Sud de 10 m/s) et (b) celles issues de l'étude du SIEAM en 2005 (Safege, 2005) (configuration : marée d'amplitude modérée et vent de Sud entre 4 et 9 m/s).	122
Illustration 91 – Cartographie interprétative de l'hydrodynamique tidale du lagon basée sur les résultats du modèle, complétée des mesures (fond en niveau de gris : Porcher et al., 2002).	123
Illustration 92 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur ossi 2 du 05/11 au 17/12/2007.	138
Illustration 93 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur ossi 4 du 05/11 au 17/12/2007.	139
Illustration 94 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur ossi 5 du 05/11 au 17/12/2007.	140
Illustration 95 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur aquadopp 1b du 05/11 au 17/12/2007.	141
Illustration 96 – Vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vbrute), composante de marée de la vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vmaree) et vitesse de courant résiduelle (vres=vbrut-vmaree), capteur aquadopp 1b du 5/11 au 17/12/2007.	142
Illustration 97 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 1b du 5/11 au 17/12/2007. v2DHskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHTot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).	143
Illustration 98 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 1b du 5/11 au 17/12/2007. v2DHmareeskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHmareetot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).	144
Illustration 99 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur aquadopp 6b du 05/11 au 17/12/2007.	145
Illustration 100 – Vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vbrute), composante de marée de la vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vmaree) et vitesse de courant résiduelle (vres=vbrut-vmaree), capteur aquadopp 6b du 5/11 au 17/12/2007.	146

Illustration 101 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 6b du 5/11 au 17/12/2007. $v_{2DHskin}$: vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v_{2DHtot} : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).	147
Illustration 102 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 6b du 5/11 au 17/12/2007. $v_{2DHmareeskin}$: vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). $v_{2DHmareetot}$: vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).....	148
Illustration 103 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur aquadopp 7b du 05/11 au 17/12/2007	149
Illustration 104 – Vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vbrute), composante de marée de la vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vmaree) et vitesse de courant résiduelle ($v_{res} = v_{brut} - v_{maree}$), capteur aquadopp 7b du 5/11 au 17/12/2007.....	150
Illustration 105 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 7b du 5/11 au 17/12/2007. $v_{2DHskin}$: vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v_{2DHtot} : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).	151
Illustration 106 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 7b du 5/11 au 17/12/2007. $v_{2DHmareeskin}$: vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). $v_{2DHmareetot}$: vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).....	152
Illustration 107 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur aquadopp 9 du 05/11 au 17/12/2007	153
Illustration 108 – Vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vbrute), composante de marée de la vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vmaree) et vitesse de courant résiduelle ($v_{res} = v_{brut} - v_{maree}$), capteur aquadopp 9 du 5/11 au 17/12/2007.....	154
Illustration 109 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 9 du 5/11 au 17/12/2007. $v_{2DHskin}$: vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v_{2DHtot} : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).	155
Illustration 110 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 9 du 5/11 au 17/12/2007.	156
Illustration 111 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur ADCP 4b du 05/11 au 17/12/200	157
Illustration 112 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur ADCP 4b du 5/11 au 17/12/2007.	158
Illustration 113 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur ADCP 4b du 5/11 au 17/12/2007.	159
Illustration 114 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 1b : (a) signal de marée ; (b) signal total	167
Illustration 115 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 2 : (a) signal de marée ; (b) signal total	168

Illustration 116 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 4 : (a) signal de marée ; (b) signal total	169
Illustration 117 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 4b : (a) signal de marée ; (b) signal total	170
Illustration 118 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 5 : (a) signal de marée ; (b) signal total	171
Illustration 119 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 6b : (a) signal de marée ; (b) signal total	172
Illustration 120 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 7b : (a) signal de marée ; (b) signal total	173
Illustration 121 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 9 : (a) signal de marée ; (b) signal total	174
Illustration 122 - Vecteurs courant au capteur 6b – signal total : (a) mesure ; (b) modèle	175
Illustration 123 - Vecteurs courant au capteur 7b – signal total : (a) mesure ; (b) modèle	176

Liste des annexes

Annexe 1 Description des capteurs déployés	129
Annexe 2 Données brutes et traitées de la campagne de mesure pour tous les capteurs.....	137
Annexe 3 Définition des erreurs	161
Annexe 4 Validation du modèle : comparaison entre mesures et résultats du modèle	165

1. Introduction

La connaissance de la courantologie du lagon de Mayotte est une information indispensable à la gestion cohérente des masses d'eaux de l'île, notamment sur les problématiques des rejets en mer et de lutte contre les pollutions marines.

Or, cette information est aujourd'hui fragmentaire (1/5ème du lagon) et hétérogène (diversité des méthodes utilisées). Il manque donc un modèle « régional », c'est-à-dire un modèle d'échelle intermédiaire entre un modèle général du bassin océanique et un modèle local, servant de référence homogène et prenant en compte l'ensemble du lagon.

Cette étude, cofinancée par la Direction de l'Agriculture et de la Forêt, la Collectivité Départementale de Mayotte et la dotation de Service Public du BRGM, a pour objectif de **réaliser une modélisation numérique 2DH¹ de la courantologie de l'ensemble du lagon, basée sur des paramètres de marée et de vent.**

Pour cela, la modélisation a été réalisée avec le code Mars de l'Ifremer et s'est appuyée sur une campagne de mesures pour validation du modèle.

La méthodologie générale de l'étude comporte les tâches suivantes (cf. cahier des charges):

- **Tâche 1 : Préparation des données d'entrée disponibles (Ch. 1);**
- **Tâche 2 : Campagne de mesures (Acquisition des données d'entrée et de validation) (Ch. 3);**
- **Tâche 3 : Mise en place du modèle (Ch. 1);**
- **Tâche 4 : Calibration – validation du modèle (Ch. 0);**
- **Tâche 5 : Simulations des scénarii (Ch. 6);**
- **Tâche 6 : Synthèse (Ch. 3, 0, 6, 8).**

Certains ajustements ont été apportés au cahier des charges, notamment sur la campagne de mesure (plus de capteurs) et sur le choix des scénarios (plus de simulations). Ces adaptations prennent dans tous les cas l'option de plus d'information. Elles sont détaillées dans les chapitres suivants.

¹ Modélisation 2DH : modélisation des courants en 2 Dimensions (pas de découpage de la colonne d'eau) et de la Hauteur d'eau.

Après un bref rappel du contexte (Ch. 2), ce rapport suit les étapes de réalisation de l'étude.

2. Contexte

2.1. PRESENTATION GENERALE DU LAGON

D'une surface de 1500 km² environ, le complexe récifo-lagonaire de Mayotte est l'un des plus grands de cette région de l'Océan Indien. Il présente notamment la particularité d'une double barrière interne dans la partie Sud-ouest du lagon. Ce phénomène est extrêmement rare puisque moins d'une dizaine de vraies doubles barrières sont connues dans le monde actuellement (Porcher *et al.*, 2002).

Le lagon² remplit des fonctions d'usage primordiales, en particulier la pêche (deuxième activité du pays), les déplacements et le tourisme.

On constate depuis plusieurs années que le lagon est soumis à de très fortes pressions tant naturelles qu'anthropiques : impact négatif des pratiques agricoles et des aménagements induisant une forte sédimentation dans le lagon, pression de pêche, pollution des eaux, etc.

Par ailleurs, le taux d'accroissement naturel moyen de la population, de +5,7 % par an, est parmi les plus élevés au monde. Cette explosion démographique conduit à accroître considérablement la pression qui s'exerce sur le milieu naturel, avec une utilisation toujours plus intense de l'espace côtier et lagonaire.

2.2. CONTEXTE HYDRODYNAMIQUE

La circulation hydrodynamique intra-lagonaire est fonction des paramètres suivants :

- la marée ;
- les conditions climatiques (vents et pression atmosphérique) ;
- la houle et les courants océaniques ;
- la bathymétrie du lagon complexe récifal.

² Le terme « lagon » est ici employé au sens très large, selon les limites définies par l'arrêté préfectoral du 12 septembre 1977, et non au sens géomorphologique que les scientifiques utilisent habituellement. Selon cet arrêté, la limite externe du lagon correspond à la ligne de déferlement des eaux océaniques, à marée basse de vives eaux, sur le haut de la pente externe du récif barrière.

2.2.1. La marée

La marée est la variation périodique du niveau de la mer sous l'effet de la position des astres. En effet sur le principe de la loi de la gravitation universelle de Newton, la lune et le soleil (principalement) déforment selon leur position l'enveloppe liquide de la terre que sont les océans :

- lorsque la terre, la lune et le soleil sont alignés l'influence est maximale, ce sont les périodes de vives-eaux (fort coefficient de marée) ;
- lorsque la terre intersecte à angle droit la lune et le soleil l'influence est minimale, ce sont les périodes de mortes-eaux (faible coefficient de marée).

A Mayotte, les marées sont de type semi-diurne à inégalité diurne, c'est-à-dire qu'on observe chaque jour deux basses mers et deux pleines mers mais qui ont des marnages³ sensiblement différents, ces différences pouvant varier entre 0,20 et 0,60 m. Le marnage est de type méso-tidal, les cotes extrêmes des marées de vives eaux étant (données SHOM) :

- PMVE (Pleine Mer de Vive-Eau) : + 4,50 m
- BMVE (Basse Mer de Vive-Eau) : + 0,60 m⁴

La marée induit des courants alternatifs liés à la marée montante ou à la marée descendante. On parle de flot pour le courant commençant entre la basse mer et la mi-marée montante et qui est maximum entre la mi-marée montante et la pleine mer. Le jusant est le courant qui va globalement en sens inverse. Il commence entre la pleine mer et la mi-marée descendante, puis est maximum entre la mi-marée descendante et la marée basse. Dans les zones côtières récifales telles que le lagon de Mayotte, ce courant peut-être particulièrement fort, notamment dans les passes du récif barrière et les détroits à l'intérieur du lagon. A titre d'exemple : dans le détroit de Mamoudzou, il a été mesuré au flot des vitesses de 0,8 m/s (Porcher *et al.*, 2002).

2.2.2. Les conditions climatiques

Les conditions climatiques influencent les courants de deux manières. D'une part, le vent, agit directement sur la surface de l'eau. Ce frottement sur la surface de l'eau génère des variations de hauteur d'eau (surcotes et décotes⁵) et des courants pouvant moduler les courants de marée. Dans certaines conditions ces courants peuvent

³ Le marnage est l'amplitude de la marée, c'est-à-dire la différence entre la hauteur d'eau à marée haute et celle à marée basse

⁴ Ces données sont exprimées par rapport au zéro des cartes marines (dit « zéro hydrographique ») qui est situé 2,18 m au-dessous du zéro NGM (Nivellement Général de Mayotte).

⁵ Surcote/décote : élévation/abaissement temporaire du niveau d'eau du fait de phénomènes climatiques.

empêcher la renverse⁶ des courants de marée. D'autre part, la pression atmosphérique peut générer des surcotes en période de dépression (moins de pression sur la mer) et des décotes en période anticyclonique (plus de pression sur la mer). Ces variations du niveau d'eau liées à la pression barométrique génèrent donc des courants qui interagissent avec les autres types de courants.

Le climat de Mayotte est de type tropical maritime. Deux saisons ponctuent l'année :

- l'une chaude et pluvieuse en été austral et marquée par le passage régulier de systèmes dépressionnaires voire occasionnellement de tempête ou de cyclone (influence de la zone de convergence inter-tropicale), c'est la mousson ;
- l'autre plus fraîche et moins pluvieuse, caractérisée par des situations anticycloniques, c'est la période de l'alizé.

Ces deux saisons principales sont séparées par deux intersaisons plus brèves.

Les principaux vents soufflant au-dessus de l'archipel des Comores et leur succession approximative dans l'année sont les suivants (Illustration 1) :

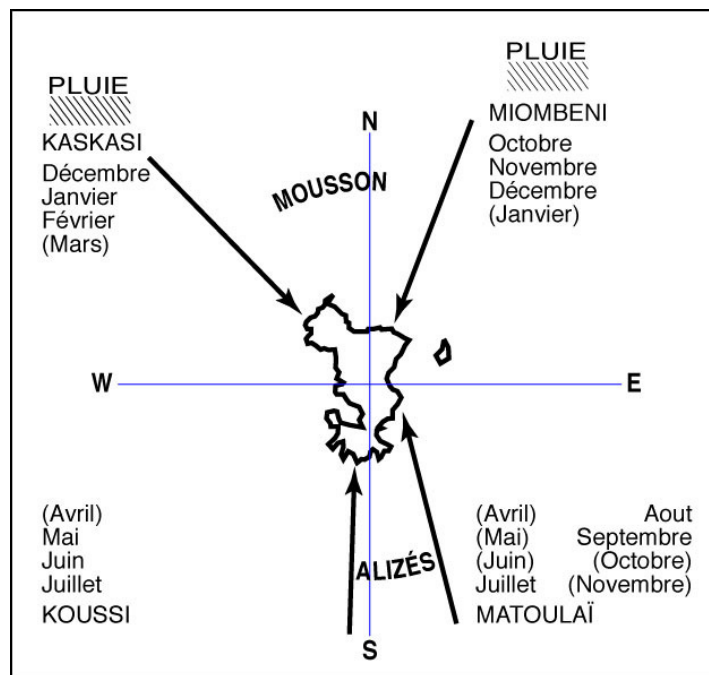


Illustration 1 – Direction des vents dominants (Raunet, 1992)

La mousson dure à peu près d'octobre à mars. Elle comporte deux phases :

⁶ Renverse de courant : inversion de direction du courant lors du passage du flot au jusant, ou du jusant au flot.

D'octobre à mi-janvier, elle souffle de secteur NE⁷ à N (« Miombéni ») : c'est l'établissement progressif des pluies. Pendant ce temps l'alizé Sud-Sud-Est va décroissant d'importance.

De janvier à mars, c'est la pleine mousson de secteur N-NW (« Kaskasi » de Grande Comores). L'alizé dure d'avril à septembre et comporte également deux phases successives :

- d'avril à juillet, l'alizé, de secteur S-SW à S-SE, arrive encore humide sur l'archipel, parce que remontant le canal de Mozambique. Ce vent (« Koussi » en grande Comore) prolonge les pluies sur les versants exposés S ;
- de juillet à septembre, l'alizé souffle de secteur S à SE arrivant sec sur Mayotte après avoir perdu son humidité au-dessus de Madagascar (« Matoulaï »). C'est le cœur de la saison sèche.

Il y a lieu d'ajouter à ces quatre grands types de vents :

- les transitions d'une saison à la suivante, plus ou moins progressives, avec plus ou moins d'interférence d'un vent à l'autre ;
- les vents locaux qui résultent de l'influence des alignements de reliefs selon leur orientation ;
- la brise de mer et la brise de terre, dont les effets sont relativement limités du fait de la faiblesse du relief, surtout pour la brise de terre.

En termes de fréquence et d'intensité, la rose des vents ci-dessous (Illustration 2) indique que les vents de secteur S (alizés) sont de loin les plus fréquents.

⁷ Dans ce rapport, les directions (de vents, courants, etc.) seront abrégées par les signes S, N, E, W pour Sud, Nord, Est, Ouest et les combinaisons possibles (ex : E-NE).

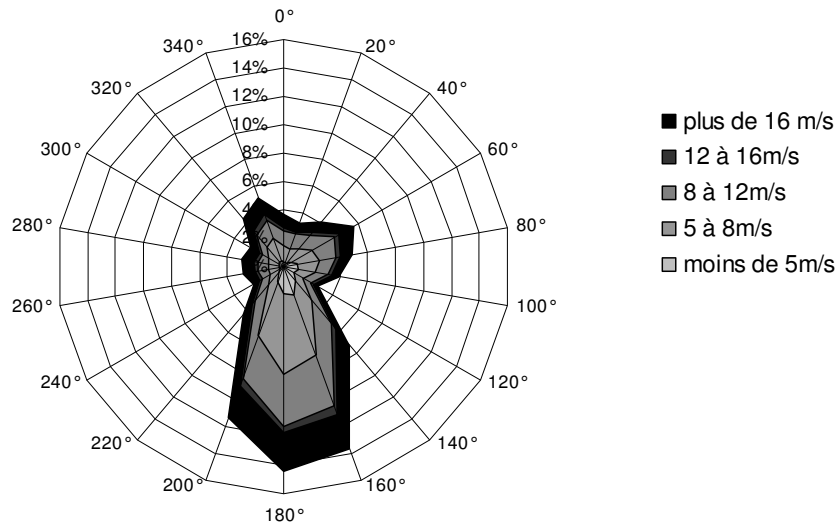


Illustration 2 – Vents maximums instantannés journaliers sur la période 1963-2007 à la station de Pamandzi (données Météo-France).

En période estivale, Mayotte peut être concernée par des cyclones ou tempêtes tropicales. Ces événements ont pour effet d'exacerber les effets du vent et de la pression mais aussi de la houle et par conséquent des courants induits. Lors du dernier cyclone, Kamisy en avril 1984, les vents ont été mesurés à 150 km/h (41,6 m/s) à Pamandzi pour une pression de 985 hPa.

2.2.3. La houle

La houle est à l'origine de deux types principaux de courants : les courants parallèles et perpendiculaires au rivage.

Les courants parallèles au rivage concernent le phénomène de dérive littorale généré par le déferlement des vagues à la côte. Ces courants ne concernent que la zone proche du rivage et n'affectent pas la circulation générale des eaux lagunaires.

Les courants perpendiculaires à la côte peuvent en revanche jouer un rôle non négligeable. Les vagues qui déferlent sur le récif barrière créent un courant allant de l'extérieur vers l'intérieur du lagon, perpendiculairement au récif (SYMONDS et *al.*, 1995). Le déferlement implique également un surplus d'eau à l'intérieur du lagon, qui est probablement évacué par les passes. Ceci pourrait avoir pour effet de créer un « courant de retour », renforçant le courant de marée sortant ou diminuant le courant de marée entrant. Aucune étude de ce phénomène de courant de retour en milieu corallien n'a été trouvée.

Le régime des houles est relativement faible à Mayotte qui bénéficie d'une position abritée dans le canal du Mozambique. En été les houles de mousson (globalement Nord) sont généralement faibles sauf passage d'un cyclone ou d'une tempête. En hiver, les houles polaires (globalement Sud) remontent le canal du Mozambique mais

parviennent très amorties sur le récif. En effet, après déferlement les vagues ne se reforment que faiblement dans le lagon. Des mers de vent (clapot généré par le vent local) sont toutefois possibles compte-tenu du fetch (distance sur laquelle peut se propager la houle) suffisant dans le lagon. La côte Ouest est toutefois plus exposée du fait des larges passes dans le récif barrière.

Il n'existe pas de houlographe à proximité de Mayotte, aussi jusqu'à peu, les seules données disponibles étaient issues de campagnes de courte durée ou des modèles numériques mondiaux. Récemment, Lecacheux *et al.* (2007) ont effectué des travaux de modélisation de la houle cyclonique à Mayotte.

2.2.4. Les courants océaniques

Mayotte est située sur une branche du Courant Sud Equatorial (CSE) et à l'extrémité Nord de la zone de tourbillons générés dans le canal du Mozambique (Shouten *et al.*, 2003).

Shouten *et al.* (2003) montrent, par modélisation et observations satellites, des variations du niveau d'eau atteignant 5 cm autour de Mayotte, avec une période de 5 à 7 cycles par an (e.g. 50 à 70 jours), pour des courants, loin dans le canal du Mozambique, de l'ordre de quelques dizaines de cm/s.

D'après (Gourbesville et Thomassin, 2000), l'hydrodynamique du lagon ne serait toutefois pas influencée par les circulations générales de l'océan Indien mais cette hypothèse reste toutefois à démontrer.

2.2.5. La bathymétrie

La bathymétrie joue un rôle prépondérant sur les courants. En effet, la morphologie sous-marine du lagon, la géométrie des passes (largeur, exposition) contraignent les échanges de masses d'eau. Les zones peu profondes ainsi que les goulets et les pointes (passes, détroits) ont tendance à accélérer le courant tandis que les eaux plus profondes participent à l'amortir. La géométrie du récif barrière détermine en grande partie la circulation des eaux lagunaires.

2.3. ETUDES ANTERIEURES

Un inventaire des études et données antérieures a été réalisé par De la Torre et Idier (2006). Sur cette base, et en utilisant d'autres études et données complémentaires, nous extrayons ici les ordres de grandeurs des courants modélisés et observés dans le lagon.

L'hydrodynamique sur l'ensemble du lagon de Mayotte reste à ce jour peu connue même si les initiatives pour l'étudier sont nombreuses. Les informations caractérisant la circulation des masses d'eau intra-lagonaire relèvent d'appréciations qualitatives, de mesures ponctuelles et de modélisations ciblées sur un secteur du lagon.

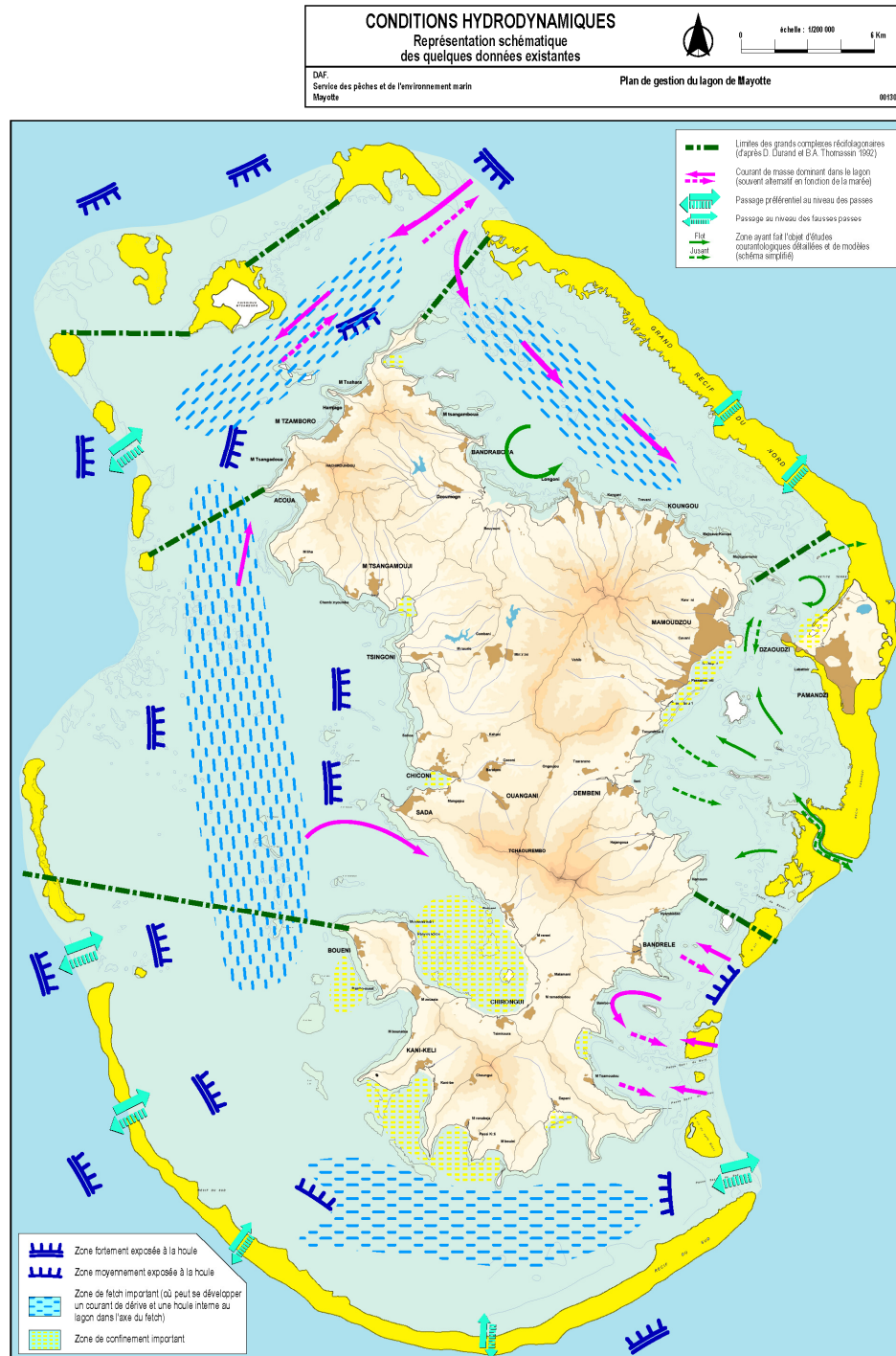


Illustration 3 – Cartographie interprétative de l'hydrodynamique du lagon
(Porcher et al., 2002)

En 2002 une carte de synthèse de l'hydrodynamique du lagon a été réalisée à partir d'informations qualitatives et de l'interprétation des courants en fonction de la morphologie du lagon et des récifs (Porcher *et al.*, 2002, Illustration 3).

2.3.1. Observations ponctuelles

Dans cette revue des observations ponctuelles, nous n'avons pas eu accès à toutes les données. L'objectif est ici de lister les sources de données et travaux antérieurs, ainsi que d'en extraire, quand c'est possible les ordres de grandeurs des courants en différents endroits du lagon. Les localisations de mesures de courants identifiées par De La Torre et Idier (2006) sont indiquées par l'Illustration 4. Les informations en termes de grandeurs de vitesses du courant qui ont pu être extraites sont synthétisées par les Illustration 5 et Illustration 6).

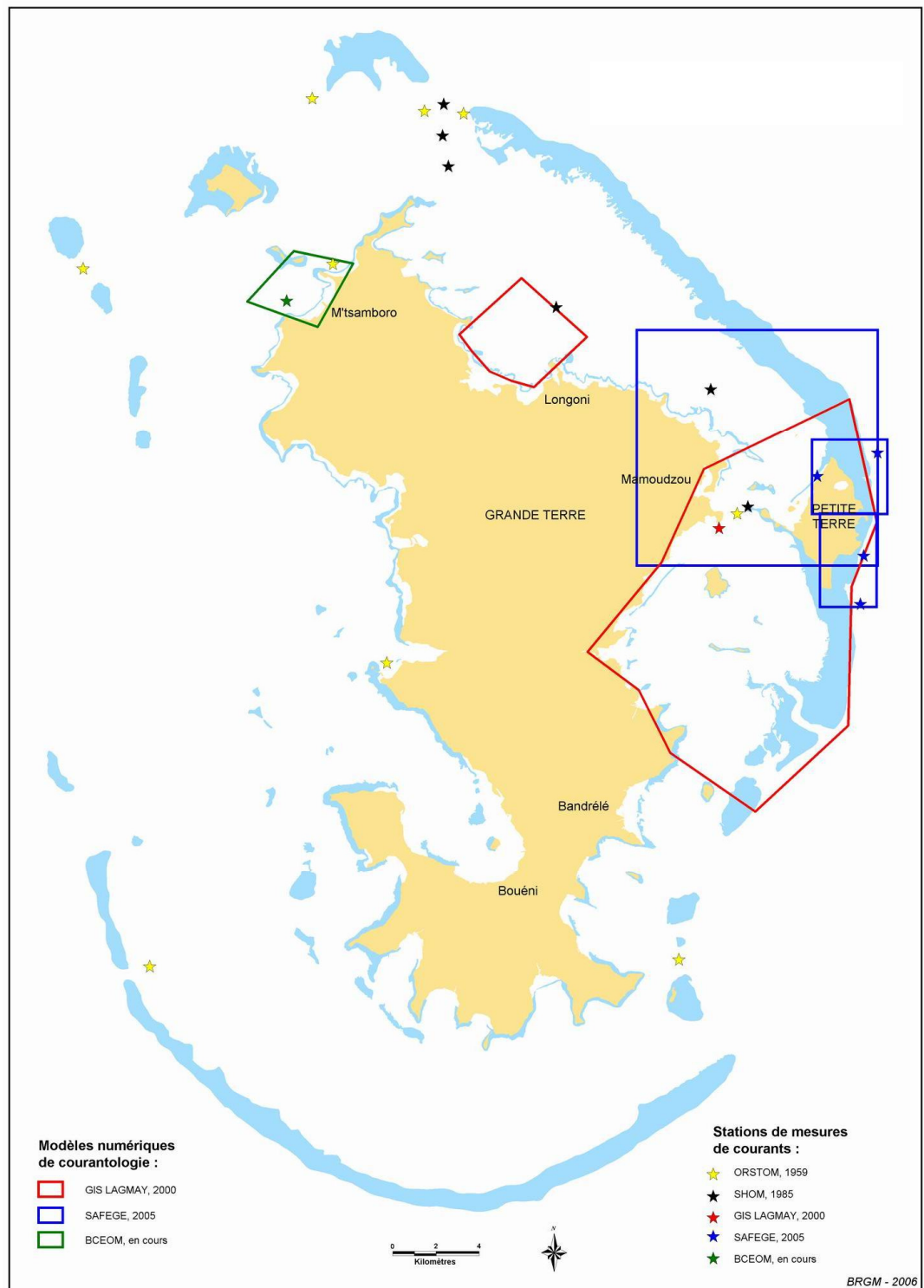
Mesures anciennes

En termes d'observations ponctuelles, la campagne de l'ORSTOM⁸ menée par A. Guilcher en 1959 (Guilcher *et al.*, 1965) a permis de réaliser les premières mesures connues (utilisation d'un « moulinet Richard ») sur une dizaine de points du lagon, en général dans des passes ou à leurs abords (Illustration 4 et Illustration 5). De cette étude, il ressort que les courants sont principalement liés à la marée, mais des anomalies furent observées, en espace aussi bien qu'en temps. Les facteurs importants d'anomalies sont le vent et les houles qui peuvent engendrer l'accumulation d'eau à l'intérieur du lagon et ainsi augmenter les courants sortants au niveau des passes. Les plus fortes vitesses observées durant ces mesures furent de 0,92 m/s dans la passe de M'tsambo (courant entrant, flot, vive-eau), et 1,02 m/s au milieu de la passe de Saziley (courant sortant, jusant, morte-eau, vent de SE).

Il est, en outre, fait état par Thomassin et Gourbesville (1998) d'observations anciennes dans le détroit de Mamoudzou-Dzaoudzi puis entre l'îlot Bouzi et la côte par le SETOI et le SPEM de la DAF. Il s'agit du suivi de flotteurs et de lâchers de rhodamine (colorant) en déc. 1987/avr. 1988 et sept. 1992. La littérature (Thomassin, 1986 ; Porcher *et al.*, 2002) fait également référence à des mesures réalisées en 1983, 1986, 1990, 1994 et 1998 lors des campagnes pluridisciplinaires du COM⁹ (missions ECOMAY, ECOLAG,...). Parmi les informations issues de ces travaux on peut noter l'ordre de grandeur des vitesses moyennes des courants qui est de 0,20-0,35 m/s dans le détroit entre Mamoudzou et Dzaoudzi (Gourbesville et Thomassin, 2000), ainsi que de 0,04 à 0,44 m/s au niveau du chenal de l'îlot Bouzi (Thomassin et Gourbesville, 1998).

⁸ ORSTOM : organisme appelé aujourd'hui IRD (Institut de Recherche pour le Développement).

⁹ COM : Centre d'Océanologie de Marseille.



*Illustration 4 – Synthèse des données courantologiques disponibles en 2006
(De La Torre et Idier, 2006).*

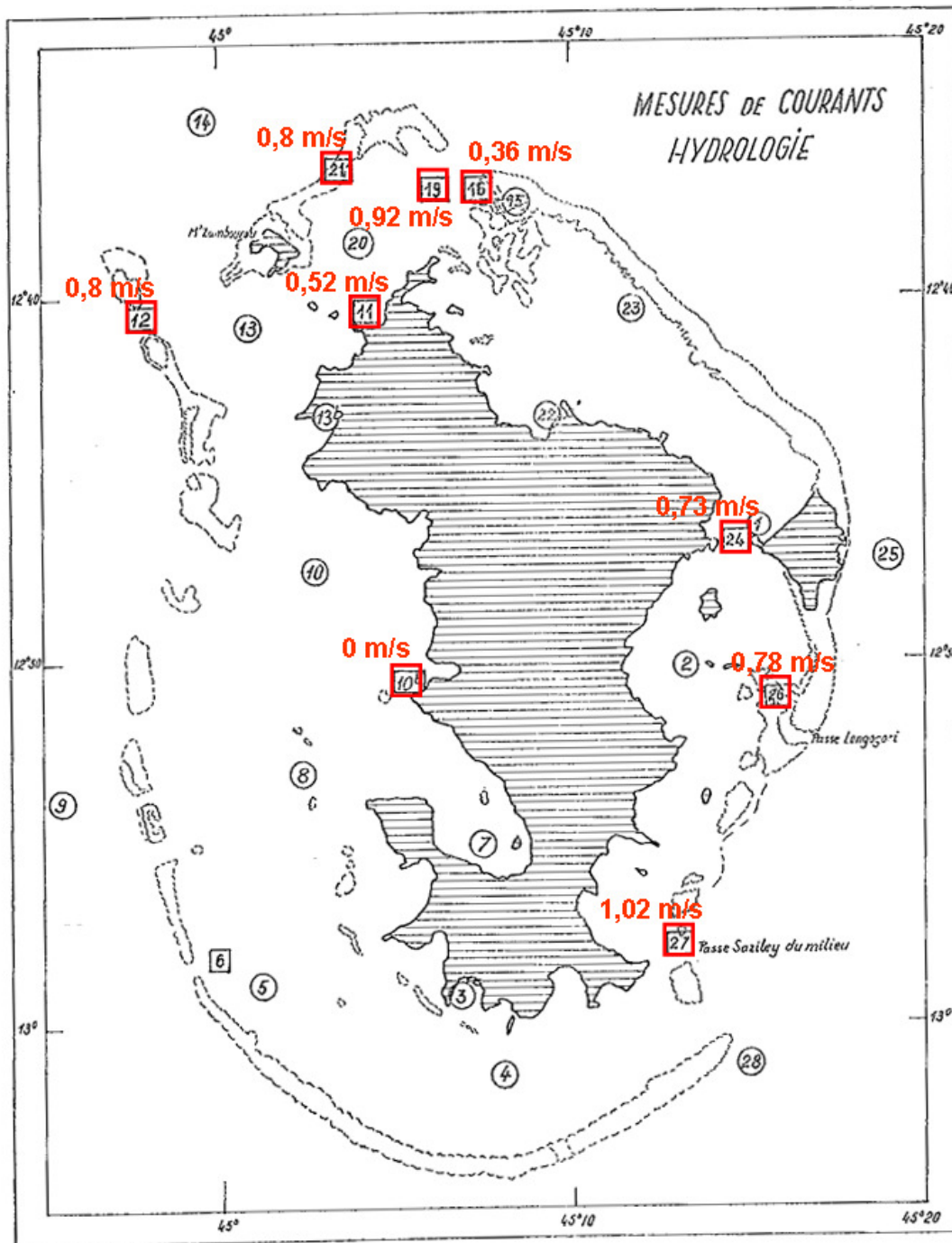


Illustration 5 – Localisation des mesures de courants (carrés rouge) et intensité maximale mesuré sur la tranche d'eau (adapté de Guilcher et al, 1965).

	Badamiers océan	Badamiers lagon	Pamandzi captage	Pamandzi rejet	M'Zambourou	Saziley	Mamoudzou - Dzaoudzi	Mamoudzou - Dzaoudzi
Réalisé pour	SIEAM (Pareto Eco Consult)	SIEAM (Pareto Eco Consult)	SIEAM (Pareto Eco Consult)	SIEAM (Pareto Eco Consult)	ORSTOM	ORSTOM	GIS-LAGMAY	GIS-LAGMAY
Position géographique	12.75588°S 45.2999° E Etoile bleue Illustration 4.	12.76227°S 45.27158°E Etoile bleue Illustration 4.	12.79927°S 45.29818°E Etoile bleue Illustration 4.	12.82089°S 45.29581°E Etoile bleue Illustration 4.	Etoile jaune Illustration 4.	Etoile jaune Illustration 4.	Etoile rouge Illustration 4.	Etoile rouge Illustration 4.
Période	22/8/05 Au 13/7/05	19/02/05 Au 05/03/05	31/5/05 Au 21/6/05	05/03/05 Au 23/03/05				
Capteur	Aanderaa (eg mesure près du fond)	Aanderaa (eg mesure près du fond)	Aanderaa (eg mesure près du fond)	Aanderaa (eg mesure près du fond)	Moulinet Richard	Moulinet Richard	Aanderaa (eg mesure près du fond)	divers
Umax/moy (m/s)	0,34	0,35	0,59	0,66	0,92	1,02	0,20-0,35	0,04-0,44
Hmoy (m)	6,7	8,1	8,7	8,2				

Illustration 6 – Synthèse de mesures de courants réalisées dans le lagon.

Il est à noter enfin que d'autres mesures courantologiques ont été réalisées par le SHOM en 1985 (six stations de mesures dans le N et le NW de l'île où se concentrent l'essentiel de la navigation, Illustration 4) et par les aménagements portuaires (Longoni), aéroportuaires (Pamandzi) et routiers (déviation de M'tsapéré/Passamaïnti).

Mesures récentes

Des mesures plus récentes ont été effectuées dans le cadre de la mise en place de modèles ou d'études sédimentologiques et biologiques dans le lagon

Des mesures ont été réalisées à partir de sondes Aanderaa pour les modèles de SAFEGE, BCEOM et plus anciennement du GIS-LAGMAY (Illustration 4). Des mesures du même type ont également été réalisées en 2007 pour les modèles en cours (cf. ci-dessous). Une partie de ces mesures a pu être récupérée (mesures de courants réalisées par Pareto Eco Consult pour le modèle de Petite-Terre, pour le compte du SIEAM). Une première analyse statistique de ces données (Illustration 6) montre que les courants sont relativement faibles à Badamier ($< 0,4$ m/s) et plus importants à Pamandzi (environ $0,6$ m/s) pour une même période (juin-juillet 2005 et février-mars 2005).

D'autres travaux sont en cours dont les données n'ont pas encore été publiées :

- des mesures fixes à l'aide de profileurs de courants ADCP ont été réalisées en 2007 et 2008 dans le cadre de la thèse de M. Jeanson sur la morphodynamique du littoral de Mayotte.
- des mouillages et transects d'ADCP ont été opérés par le CNRS (G. Rougier), l'IRD (C. Chevalier) et l'Ifremer (JL Devenon) en 2006 pendant une mission d'étude des cycles biogéochimiques et des facteurs de contrôle des communautés planctoniques et benthiques d'une partie du lagon de Mayotte.

2.3.2. Les modèles courantologiques

Quelques modèles numériques de courantologie (données de sortie : courants, hauteur d'eau) ont été réalisés depuis 1994 sur certaines zones ciblées dans le cadre d'études de rejet d'effluents dans le lagon. Les trois sources connues sont le GIS LAGMAY, SAFEGE et BCEOM/Egis Eau¹⁰ (Illustration 4).

¹⁰ La structure BCEOM s'appelle depuis peu Egis Eau.

Les modèles du GIS LAGMAY

Le GIS LAG-MAY a été le premier organisme à produire des modèles courantologiques à Mayotte. Il s'agit des modèles développés par Arnoux *et al.* (1994) et Gourbesville *et al.* (2000 a, b et c).

Le modèle mis en oeuvre par Arnoux *et al.* (1994) est le plus ancien et se base sur le code de Verdier-Bonnet *et al.* (1993). Son emprise géographique correspond aux limites du complexe récifo-lagonaire « Hajangoua-Bandréle » tel que défini par Thomassin (1986 ; 1998). Les modèles de P. Gourbesville concernent les secteurs du détroit de Mamoudzou-Dzaoudzi ; la vasière des Badamiers et l'estuaire de Kawéni. Ces travaux s'appuient sur le code MIKE21 développé par le Danish Hydraulic Institute, résolvant les équations de Saint-Venant (comme le code MARS2D).

Le plan de gestion du lagon indique également l'existence d'un modèle dans la baie de Longoni mais la référence bibliographique n'est pas donnée. Il est néanmoins pris en compte dans la carte de synthèse en Illustration 4.

Les modèles SAFEGE

Trois modèles distincts ont été réalisés par SAFEGE (2005) pour le compte du SIEAM¹¹ dans le cadre d'une étude de rejets en mer de part et d'autre de Petite-Terre.

Les calculs ont été effectués avec les codes MARS 2D et 3D. Les variables prises en compte par le modèle sont : le courant (vitesse et direction), la température, la salinité et le niveau de surface libre. Les bons résultats rapportés par le SIEAM sur cette étude ont participé au choix du modèle MARS pour nos travaux (cf. § 4.1). En outre, ayant pu avoir accès au rapport d'étude, les résultats des présents travaux de modélisation à l'échelle du lagon seront comparés à cette étude plus locale réalisée pour le SIEAM (cf. Ch. 7).

Le modèle BCEOM/EGIS-Eau

La modélisation numérique du BCEOM (actuellement EGIS-Eau) est également produite à la demande du SIEAM pour le projet d'assainissement du village de Mtsamboro. Les détails sur la nature du code et des simulations ne sont pas connus.

Les modèles en cours

Plusieurs modèles locaux (sur Sada ; Mtsangamouji ; Koungou) sont en cours d'élaboration toujours à la demande du SIEAM dans le cadre des rejets en mer des stations d'épuration.

¹¹ SIEAM : Syndicat Intercommunal d'Eaux et d'Assainissement de Mayotte

3. Observations in-situ

3.1. CAMPAGNE DE MESURE

3.1.1. Choix des mouillages et appareils utilisés

Choix des mouillages

La campagne de mesure a pour objectif :

- de fournir des données hydrodynamiques (niveau d'eau et courants) relativement représentatives de l'hydrodynamique à l'échelle du lagon
- de fournir des données hydrodynamiques utilisables pour la validation de modèles hydrodynamiques du lagon.

Pour cela, il est nécessaire que ces mesures hydrodynamiques couvrent des échelles spatio-temporelles suffisamment larges. Ainsi, un effort a été porté pour acquérir des données hydrodynamiques à la fois dans les passes et à l'intérieur du lagon. En outre, les capteurs ont été déployés pendant un mois car c'est une durée nécessaire (deux cycles vive-eau – morte-eau) pour pouvoir extraire les principales composantes de marée des mesures.

Les appareils utilisés

Trois types de capteurs (Illustration 7) ont été utilisés durant cette campagne :

- 3 capteurs de pression (OSSI-010-003B)
- 4 courantomètres ponctuel à effet Doppler (« Aquadopp » de Nortek) qui ont mesuré les composantes horizontales et verticales en un point de la tranche d'eau
- 2 profileurs à effet Doppler (WorkHorse Sentinel ADCP 1200kHz et 600kHz) qui ont mesuré les composantes horizontales et verticales à différents niveaux de la tranche d'eau

Ces appareils ont été positionnés dans les passes principales du lagon, ainsi que dans les zones à fort fetch à l'intérieur du lagon (Illustration 8).

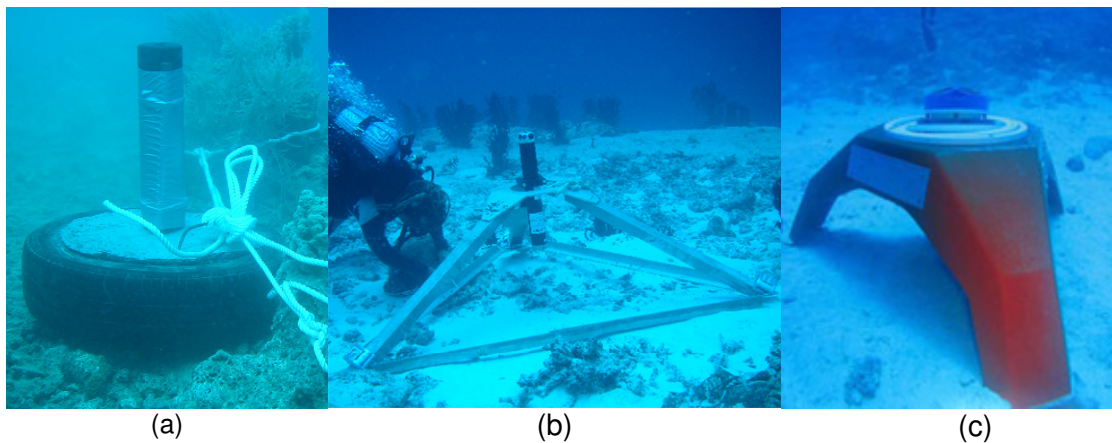
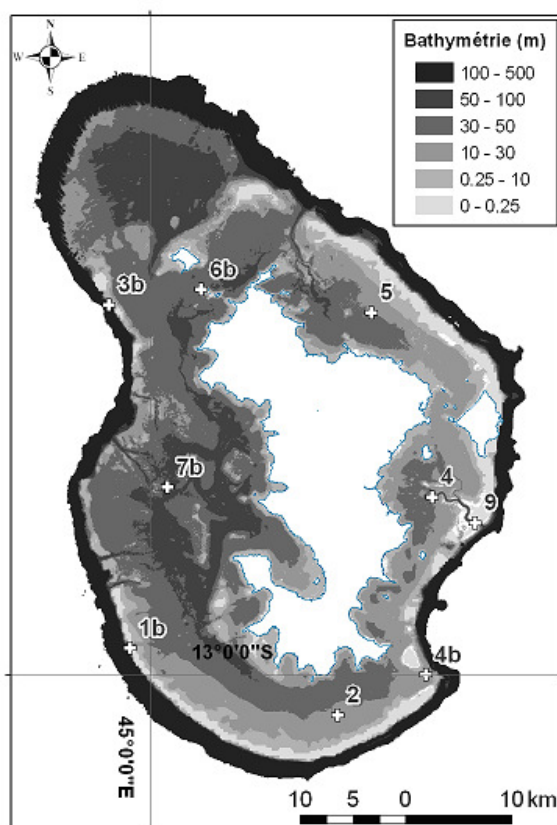


Illustration 7 - Capteurs et leur structure de fixation
 (a) capteur pression OSSI, (b) capteur Aquadopp, (c) Profileur ADCP.



Capteurs

- 1b : Aquadopp
- 2 : OSSI
- 4 : OSSI
- 4b : profileur ADCP
- 5 : OSSI
- 6b : Aquadopp
- 7b : Aquadopp
- 9 : Aquadopp

Illustration 8 - Localisation des capteurs déployés en novembre-décembre 2007. Bathymétrie du lagon et des marges externes. MNT issu de données bathymétriques SHOM.

3.1.2. Contexte hydrométéorologique

Pendant la campagne, les coefficients de marée étaient compris entre 43 et 102 (Illustration 9).

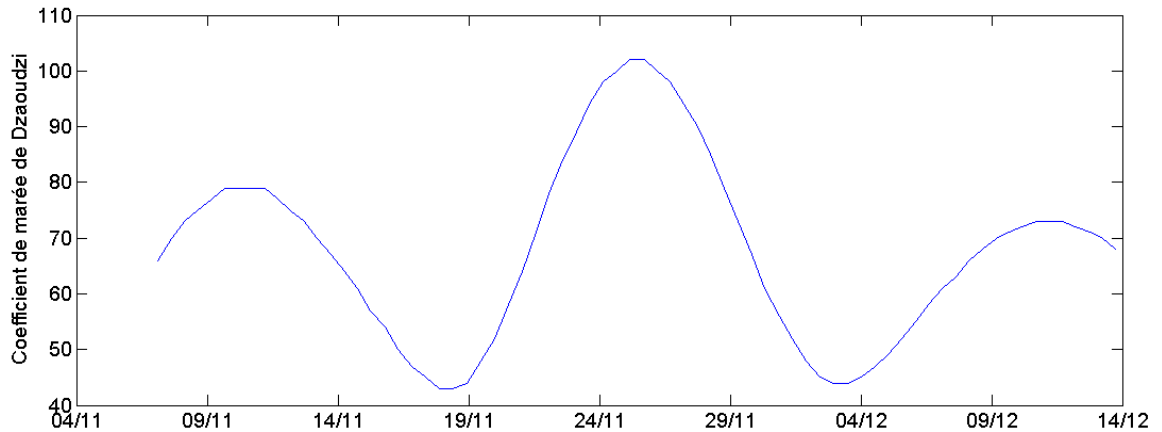


Illustration 9 – Coefficient de marée (SHOM) à la station de Dzaoudzi pendant la campagne.

Les prévisions du SHOM (Illustration 10) à Dzaoudzi (12°47' S, 45°17' E) illustrent le fait que les marées sont de types semi-diurne à inégalité diurne (cf. 2.2.1). L'écart entre les marnages de deux marées successives varie entre 10 cm et 70 cm.

Pendant la campagne de mesures, d'après les prédictions SHOM, les marnages dus à la marée devraient être de l'ordre de 1 à 3,5m, selon que c'est une période de mortes-eaux (e.g. ~ 17 novembre et ~ 2 décembre) ou de vives-eaux (e.g. : ~10 novembre et ~ 25 novembre).

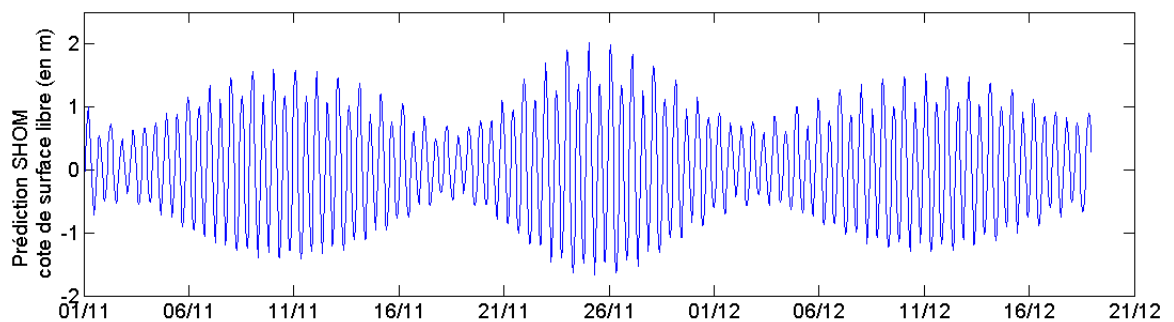


Illustration 10 – Prédiction de la cote de surface libre (marée) du SHOM à Dzaoudzi pendant la campagne par rapport au zéro hydrographique.

Pendant la campagne de mesures, d'après les données de la station météorologique de Dzaoudzi, la météorologie a été calme (Illustration 11). On peut distinguer deux régimes de vent, le premier provenant de la direction NE (70°N) avec des vitesses avoisinant 4 à 6 m/s, surtout présent en début de campagne et un régime de vent plus faible autour de 3 m/s avec une provenance moins marquée autour de la direction NNW (270-360°N).

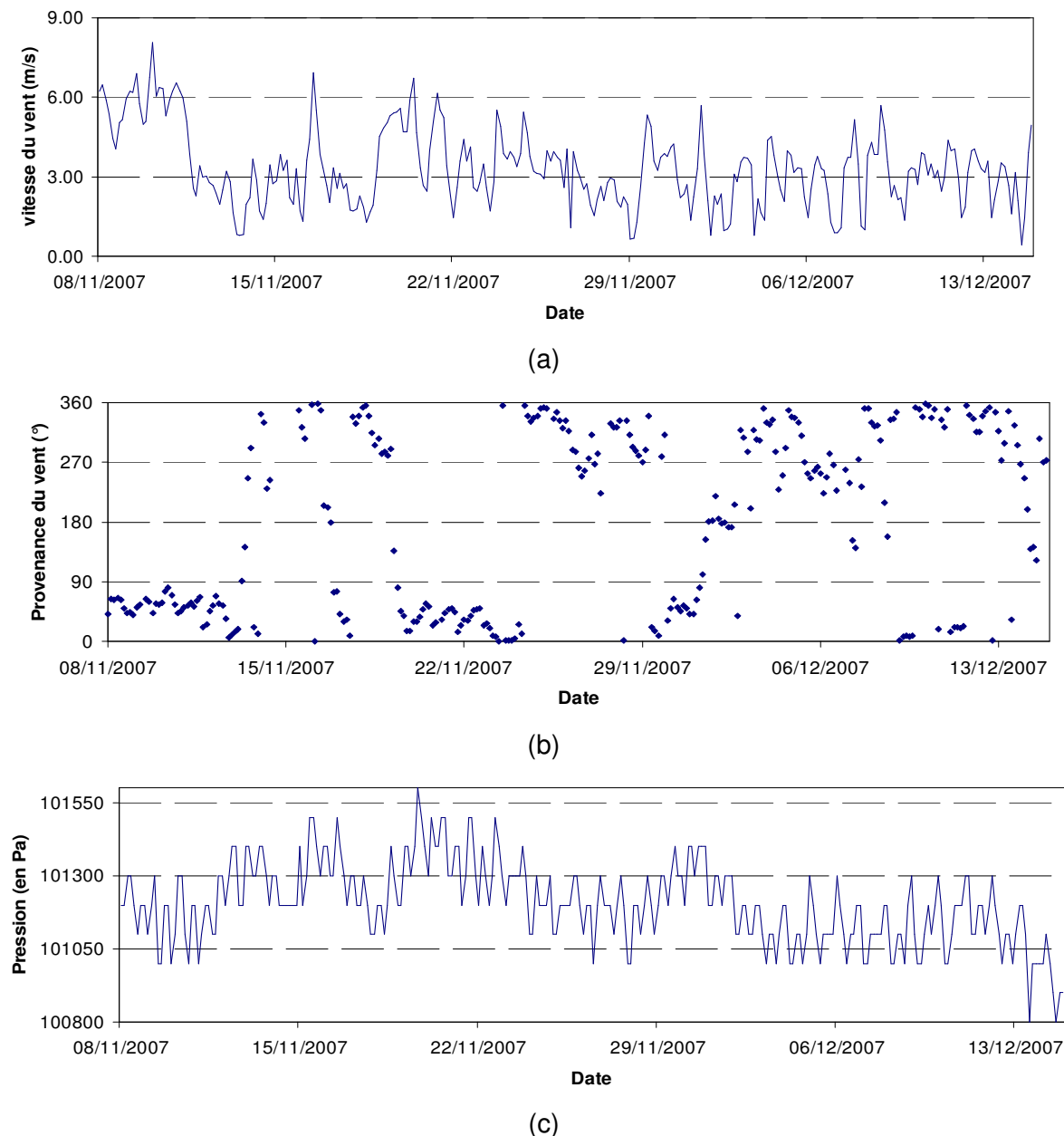


Illustration 11 - Météorologie locale à partir des données Météo France de la station de Dzaoudzi : (a) vitesse du vent, (b) direction du vent, (c) pression atmosphérique.

Afin de caractériser la météorologie à l'échelle des phénomènes des surcotes et ondes de tempête (phénomène qui est généré par la pression et les vents sur une emprise de plusieurs centaines à milliers de kilomètres, plus que par les vents locaux) pendant la campagne de mesure, les données de vent et pression de GFS ont été spatialement moyennée sur la zone Madagascar. Cette météorologie spatialement moyennée indique des vents relativement modérés pendant la campagne (vent moyen de 2m/s) et que la période du 22/11 au 26/11 est la période où les vents sont a priori négligeables. En termes de pression, on note une pression moyenne de 1012hPa, légèrement inférieure à la pression annuelle sur la même zone (~1015hPa d'après les données ECMWF). On note aussi les oscillations semi-diurnes de la pression (Illustration 12c).

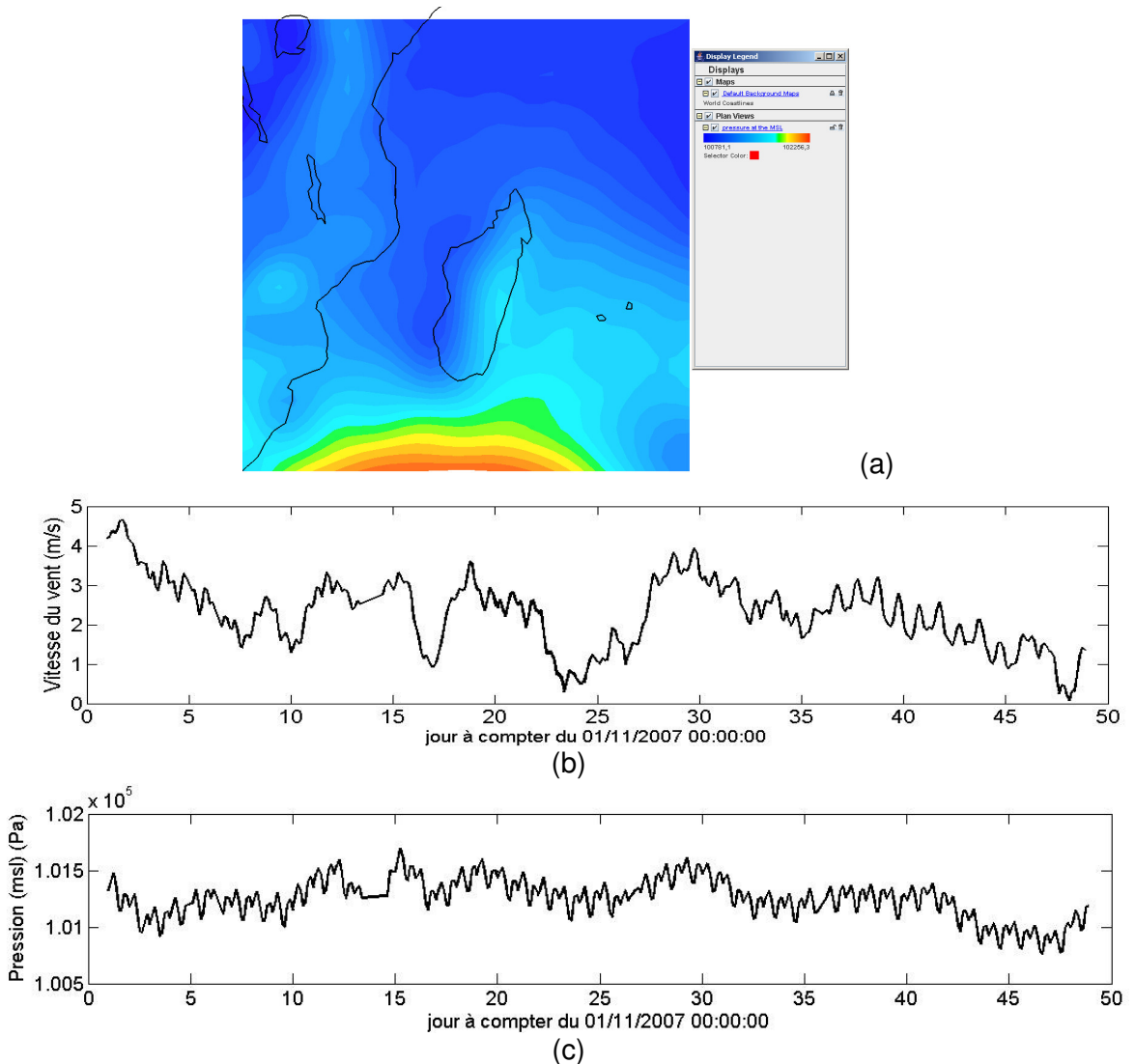


Illustration 12 - Météorologie régionale à partir des sorties de modèle GFS. (a) : domaine spatial d'intégration des données de vent, (b) : vitesse du vent, (c) : pression atmosphérique.

3.1.3. Déroulement de la campagne

Equipe mobilisée

B. Francois, D. Idier et Y. De La Torre du BRGM ont organisé et assuré le suivi technique de la campagne de mesure.

L'ensemble de la mission a bénéficié de l'appui de la Brigade Nature de Mayotte (BNM) de l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCFS) afin d'assurer toute la partie logistique des déplacements en mer et d'apporter une aide précieuse en surface pour le repérage, le déploiement et récupération des appareils.

L'intervention subaquatique a été réalisée par une équipe de 3 prestataires plongeurs professionnels des sociétés A.P.N.E.E Mayotte, ISSEO et LAGONIA, au minimum Classe 1 Mention B conformément à la réglementation en vigueur, ainsi qu'un CAH 1B supplémentaire grâce à la participation du Service Environnement et Forêt (SEF) de la DAF MAYOTTE. L'ensemble des plongeurs professionnels mobilisés durant l'opération résident à Mayotte et connaissent bien les sites du lagon.

Moyens techniques utilisés

- Moyen nautique : bateau M'Kombéde de la Brigade Nature de Mayotte (BNM) de l'Office National de la Chasse et de la Faune Sauvage (ONCF), adapté à la sécurité de l'équipe de plongeurs.
- Equipements de plongée complets pour la pratique de l'activité CAH 1B professionnelle dans le cadre de la réglementation en vigueur.
- Appareil photo-numérique bridge (CANON, Powershot S2IS, grand angle IKON) et caisson étanche IKELITE.
- GPS : GARMIN IXSurvey (précision 7m) pendant le déploiement, puis GPS Garmin Etrex Vista CX pendant la récupération pour le géo-référencement des données relevées.
- Sondeur à main et ordinateur de plongée sous-marine pour noter la hauteur d'eau
- Planches sous-marines pour la prise de note.
- Matériel divers :
 - Bout de 10 mm (100m) pour largage
 - Bouts de quelques mm (200 m en portions de 10 m) pour amarrages au corail
 - Cerflex (capteurs pression)
 - Scotch étanche

Déploiement et récupération des capteurs

Déploiement

La phase de mise en place s'est déroulée du 6 au 9 novembre 2007 inclus à raison de deux capteurs installés par jour.

L'illustration 13 récapitule les positions, dates et conditions de mouillage/relevage, ainsi que les configurations des capteurs.

Le paramétrage des capteurs a été réalisé par D. Idier et B. François. Tous deux ont assistés à la mise en place des appareils ainsi que Y. De La Torre. L'équipe a été assistée le 6 et 7 novembre par deux intervenants de la société iXSurvey, E. Richard et E. Chaumont pour la mise en place des capteurs Aquadopp.

Le déroulement des opérations a été facilité par les conditions courantologiques et météorologiques favorables (temps relativement calme et coefficients de marée faibles de 53 à 77).

La plupart du temps, l'appareillage (cage, appareil et lest) fixé à un bout a été mis à l'eau par l'équipage sur le pont, puis descendu à la profondeur désirée, guidé par les plongeurs. Dans le cas où le courant ne permettait pas au bateau de maintenir sa position en surface (ex : appareil 1b Passe Bateau, appareil 6b Choazil etc.), la structure métallique a été décrochée en surface puis descendue par les trois plongeurs à l'aide de leurs gilets stabilisateur. Une fois au fond, l'appareillage est décroché puis fixé aux reliefs environnants (ex : corail dur type Porites) par sécurité.

Récupération

Le relevage de l'ensemble des appareils a été effectué du 11 au 14 décembre inclus. Une fois le repérage de l'appareillage effectué (en surface grâce aux coordonnées GPS puis sous l'eau en fonction des « repères » géomorphologiques pris lors de la mise en place), l'appareillage est libéré de ses attaches au fond.

Les différents appareillages ont été remontés à la surface à l'aide d'un parachute de levage à purge rapide de 200 litres fixé à l'armature métallique de façon à ne pas endommager les capteurs.

Configuration des capteurs

Capteurs de pression OSSI

Les capteurs pression OSSI (Illustration 7a, description en Annexe 1) ont été paramétrés pour mesurer en continu à une fréquence de 10 Hz la pression (en Pa), e.g. la hauteur d'eau, ainsi que la température (en °C) à une fréquence de 0.8 Hz. La structure fabriquée pour maintenir le capteur au fond place la partie active du capteur à environ 60 cm au dessus du fond.

Courantomètres ponctuels Aquadopp

Les quatre courantomètres Doppler ponctuels sont des « Aquadopp » de la société Nortek (description en Annexe 1). Chacun des courantomètres a été placé sur une structure « Tripode » (Illustration 7b). Cette structure place la tête du courantomètre à 70 cm au dessus du fond, la mesure s'effectuant à 35 cm de la tête du capteur, la mesure se situe donc à 1,05 m au dessus du fond.

La configuration utilisée est la même pour tous les capteurs à savoir une mesure des trois composantes (deux composantes horizontales et une composante verticale) de la vitesse courant et une mesure de pression (e.g. hauteur d'eau) toutes les 10 minutes avec une période d'intégration de 90 secondes (la fréquence d'acquisition de base étant 1Hz). Les directions acquises sont données par rapport au Nord Magnétique. Des informations complémentaires comme la température de l'eau et l'orientation du capteur sont aussi enregistrées.

Profileurs ADCP

Deux profileurs ADCP ont été installés : un ADCP WorkHorse Sentinel 600kHz et un ADCP WorkHorse Sentinel 1200kHz (description en Annexe 1). Le premier a rencontré des problèmes d'étanchéité et il n'a pas été possible d'en récupérer des données. Il n'y a eu aucun problème avec le second. Les ADCP avaient été configurés pour enregistrer un profil de vitesse toutes les dix minutes avec une période d'intégration de 90 secondes.

La structure utilisée pour porter l'ADCP (Illustration 7c) est telle que la tête du capteur est placée à 70 cm du fond. Le profil de vitesse est mesuré par cellules de 1 mètre d'épaisseur, le centre de la première cellule se situe à 1,53 m de la tête du capteur. Ainsi les données de l'ADCP donnent les valeurs des composantes de la vitesse du courant dans les trois directions tous les mètres à partir de la cote 2.23 m à partir du fond. En outre, l'ADCP fournit des données hauteur de d'eau toutes les 10 minutes.

N°	1b	2	3b	4	4b	5	6b	7b	9
Type	Doppler	Pression	ADCP 600 kHz	Pression	ADCP1200 Hz	Pression	Doppler	Doppler	Doppler
Numéro appareil	Aquadopp 11	SN 3	WorkHorse 600	SN 4	ADCP 1200	SN 2	Aquadopp1153	Aquadopp1167	Aquadopp1130
Position	12°58'37"S 44°59'02"E	13°02'02"S 45°09'36"E	12°41'06"S 44°57'56"E	12°50'55"S 45°14'25"E	12°59'59"S 45°14'06"E	12°41'30"S 45°11'19"E	12°40'21"S 45°02'37"E	12°50'25"S 45°00'25"E	12°52'13"S 45°16'37"E
Période d'acquisition (min)	10	1.67E-03	Défaillance du capteur. Aucunes données récupérables	1.67E-03	10	1.67E-03	10	10	10
Période d'intégration (min)	1,5	-		-	1,5	-	1,5	1,5	1,5
Nbr de couches Epaisseur des couches (m)	-	-		-	22 1	-	-	-	-
Hauteur de mesure par rapport au fond de la pression Δz_{p-mes} (m)	0,7	0,6	Défaillance du capteur. Aucunes données récupérables	0,6	0,7	0,6	0,7	0,7	0,7
Hauteur de mesure par rapport au fond de la de la vitesse du courant Δz_{v-mes} (m)	1,05	-		-	à partir de 1,73 m jusqu'à la surface	-	1,05	1,05	1,05
Date mouillage	06/11/2007	08/11/2007	09/11/2007	08/11/2007	08/11/2007	09/11/2007	07/11/2007	06/11/2007	07/11/2007
Date relevage	14/12/2007	14/12/2007	13/11/2007	11/12/2007	14/12/2007	12/12/2007	12/12/2007	13/11/2007	11/12/2007
Profondeur observée lors du mouillage (m)	14,6	10,7	38,5	11	11	10	34,5	12	16,3
Nature du fond	Corail noir arborescent et sable fin	Fond sableux fin	Fond plat sableux	Patate de corail de 5m de diamètre	Substrat dur	Plaque de sable entouré de corail	Sable, gorgone	Sableux Détritique	Sable grossier, vase
Commentaires / validité mesures	OK	OK	Défaillance	OK	OK	OK	Mesure sujette à caution	OK	OK

Illustration 13 – Caractéristiques principales des déploiements de capteurs de courants et niveaux d'eau

Estimation de l'incertitude sur les données mesurées

Les sources d'erreurs de mesure sur la hauteur d'eau proviennent :

- du capteur en lui-même
- de la position du capteur dans un référentiel vertical connu type IGN
- de la verticalité du capteur
- du mode de calcul de la hauteur d'eau à partir de la pression mesurée.

Concernant les erreurs liées aux capteurs eux-mêmes, il faut prendre en compte les informations fournies par le constructeur sur la précision absolue et la précision relative. La précision absolue est la précision avec laquelle la pression totale (e.g. la hauteur totale au-dessus du capteur) est effectivement mesurée. La précision relative est la précision avec laquelle les variations de pression (e.g. les variations de la hauteur totale au-dessus du capteur) sont mesurées.

Pour la présente étude, les données qui vont être effectivement utilisées pour analyser la dynamique dans le lagon et pour valider le modèle sont les variations de la hauteur d'eau. C'est donc la précision relative qui doit être estimée pour quantifier les incertitudes sur les données présentées dans ce rapport.

Pour le capteur OSSI, la précision relative est égale à 0,0033 % de la mesure maximale qui est de 3 bars. Ainsi la précision sur les variations de la hauteur d'eau est de l'ordre de ± 1 mm. Pour l'Aquadopp la résolution est de $\pm 0,005\%$ de la mesure, soit $\pm 1,8$ mm. Pour le capteur ADCP, la hauteur d'eau est directement calculée par le capteur avec une résolution estimée par le constructeur de 1,3 mm.

L'incertitude sur la position du capteur peut être liée à différents facteurs (connaissance du niveau d'eau absolu au moment du mouillage, mouvement de la cage au fond, problèmes d'érosions ...). L'incertitude liée à la connaissance du niveau d'eau au moment du mouillage n'a d'influence que sur l'estimation de la hauteur d'eau absolue. Par contre, si la cage a bougé (action des vagues ou des courants) ou bien si la cage est sur une zone d'érosion, alors il peut y avoir une influence sur la précision de la variation temporelle de la hauteur d'eau.

La verticalité du capteur influe sur la position du point de mesure. Toutefois, les mesures sur l'orientation des capteurs montrent :

- d'une part que l'écart à la verticale n'excède jamais 10°. Cet écart moyen par rapport à la verticale se traduit par une incertitude sur le positionnement absolu du point de mesure de l'ordre du centimètre (2 cm au maximum).
- d'autre part que la variation de l'écart par rapport à la verticale des capteurs ADCP et Aquadopp est au maximum de 3,5°. La variation de la verticalité du capteur au cours du temps génère une incertitude sur la précision de la variation temporelle

des hauteurs d'eau de l'ordre de $\pm 1\text{mm}$. Ceci est comparable à la résolution estimée par le constructeur. Elle peut donc être négligée.

Concernant le calcul de la hauteur d'eau à partir de la pression mesurée, on peut noter que la formule (cf 3.2 traitement) utilisée ne prend pas en compte les variations de la pression atmosphérique qui varie tout au long de la campagne (Illustration 11) entre 1008 hPa et 1015,5 hPa. L'Illustration 14 présente les variations en termes de variations de hauteur d'eau induite par les variations de la pression atmosphérique. En négligeant ces variations on introduit une incertitude de $\pm 4\text{ cm}$ sur les valeurs de variations de hauteur d'eau mesurées. Étant donné que la période des données atmosphériques est de 3 heures et que les données disponibles ne sont pas continues, cette correction n'a pas été appliquée lors du traitement de la mesure pour garder des données homogènes.

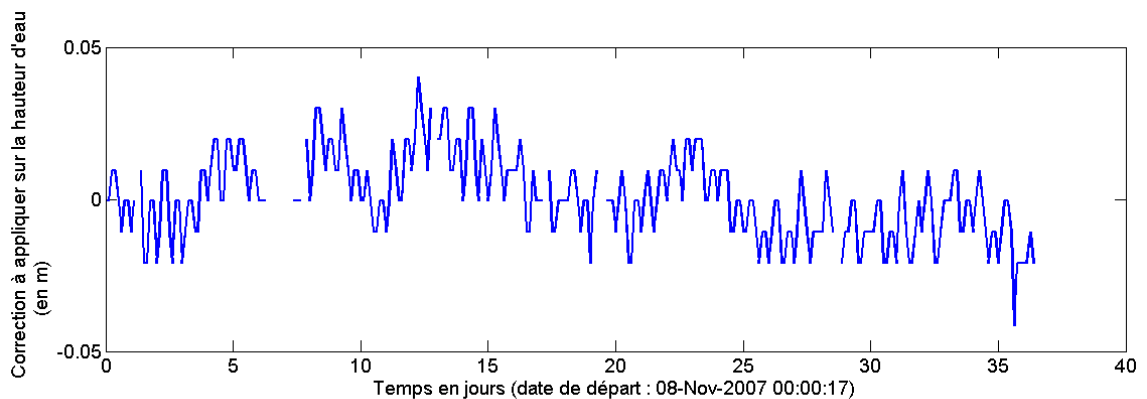


Illustration 14 – Correction à appliquer à la hauteur d'eau totale mesurée pour tenir compte de l'influence de la pression atmosphérique.

	OSSI	Aquadop	ADCP
Précision cote de la surface libre	$\pm 1\text{ mm}$	$\pm 1,8\text{ mm}$ (6b et 9) $\pm 0,6\text{ mm}$ (1b et 7b)	$\pm 1,3\text{ mm}$
Vitesse du courant		$\pm 1,5\text{ cm/s}$	$\pm 0,6\text{ cm/s}$

Illustration 15- Précision relative des mesures des capteurs sur la côte de surface libre et vitesse de courant.

Au niveau de la mesure des vitesses de courant, la seule source d'incertitude est liée au capteur. Pour le capteur Aquadop, la précision de la mesure est estimée par le constructeur, à 1% de la valeur mesurée $\pm 0,5\text{ cm/s}$, c'est-à-dire de l'ordre de 1,5 cm/s. Pour l'ADCP, elle est de 0,3% de la vitesse mesurée $\pm 0,3\text{ cm/s}$, c'est-à-dire de l'ordre de 0,6 cm/s.

L'Illustration 15 synthétise la précision et les incertitudes sur les variables mesurées et utilisées dans cette étude.

3.1.4. Bilan et validité des mesures pour l'étude

Pendant la campagne de mesure, 9 capteurs ont été déployés pour acquérir des mesures continues entre le 9/11/2007 et le 11/12/2007. Un capteur (profileur de courant ADCP) s'est avéré défectueux. Par ailleurs, la visualisation des données brutes (ainsi que des données analysées, cf § 3.3) montre que le capteur 6b (courantomètre ponctuel, aquadopp) montre de forts écarts, aussi bien en termes de marée que de courants par rapport aux autres capteurs. Aussi, ne pouvant pas garantir la validité de cette mesure, son traitement est présenté dans les paragraphes qui suivent, mais cette mesure en tant que telle ne sera pas utilisée ni pour la caractérisation de l'hydrodynamique du lagon ni pour la validation du modèle. Ainsi, par la suite, 7 jeux de mesures sont donc utilisées, issu des capteurs suivants : 3 courantomètres ponctuels Aquadopp, 1 profileur ADCP et 3 capteurs de pression OSSI.

3.2. TRAITEMENT DES DONNEES

Pour l'ensemble du traitement des données, le BRGM a utilisé et adapté une boîte à outils de traitement hydrodynamique déjà testée pour des données mesurées au large des Charentes Maritimes (Idier *et al*, 2006). Elle permet, entre autres, l'extraction des composantes de marée et signaux résiduels, ainsi que le calcul de la vitesse intégrée sur la verticale pour les capteurs Aquadopp et ADCP.

L'ensemble des données acquises pendant la campagne ainsi que les résultats des différents traitements expliqués ci-dessous sont présentés en Annexe 2 pour chaque capteur.

3.2.1. Pré-traitement

Les données brutes ont été soumises à un premier traitement préliminaire qui a consisté en les opérations suivantes :

- Elimination des enregistrements effectués lors des phases de mouillage et de relevage des capteurs.
- Pour les capteurs OSSI, le signal brut a été filtré avec un filtre passe bas avec une fréquence de coupure à 2 minutes puis re-échantillonné avec une période de 10 minutes de manière à avoir des données de hauteur d'eau échantillonnées à la même période pour tous les capteurs.
- Transformation de la valeur de pression mesurée par les capteurs OSSI en hauteur d'eau en utilisant la formule suivante :

$$h = \frac{P_{mesurée}}{\rho g} \text{ avec } \rho = 1\,025 \text{ kg/m}^3 \text{ et } g = 9,81 \text{ m/s}^2 \quad (1)$$

- Transformation de la hauteur d'eau mesurée au dessus du capteur en une hauteur d'eau totale (intégrant la cote du capteur au-dessus du fond).
- Calcul de la cote de surface libre par rapport à un niveau de référence. Dans l'absolu, il faudrait pouvoir ramener cette cote de surface libre par rapport à un zéro connu, comme le zéro hydrographique. Or pour ceci, il faudrait avoir la position précise du capteur par rapport au zéro hydrographique. Ceci n'est possible que lorsque : (1) la position du bateau lors du mouillage des capteurs est acquise avec un GPS différentiel, (2) la profondeur d'eau au niveau du capteur est mesurée avec précision (sondeur bathymétrique précis et centrale inertielle). Ceci est donc la plupart du temps impossible. Dans cette étude, le niveau de référence choisi est donc le niveau moyen de l'eau au-dessus du fond (pour chaque capteur), moyenné sur la durée de la campagne. Ainsi, chaque capteur à son propre niveau de référence, ces niveaux de références étant a priori assez proches entre eux.
- Pour les mesures de vitesses des capteurs Aquadopp et ADCP, passage des composantes de la vitesse du courant du repère orienté selon le Nord magnétique au repère orienté suivant le Nord géographique en corrigeant par la déclinaison magnétique calculé au point et instant de mesure par le logiciel Declimag (<http://vtopo.free.fr/declimag.htm>). La déclinaison calculée à Mayotte est d'environ -8.32°.

3.2.2. Extraction des composantes tidales

Le logiciel T_tide

Le logiciel T-Tide a été utilisé pour estimer les composantes tidales des mesures de hauteurs d'eau et vitesse de l'ensemble des capteurs. Cette estimation est effectuée par analyse des composantes harmoniques (logiciel T_Tide, PAWLOWICZ *et al.*, 2002). Une fois les composantes de marée extraites dans le domaine fréquentiel, le signal (hauteur d'eau et vitesse) est recomposé en signal temporel.

Pour tous les signaux mesurés (hauteur d'eau et vitesse de courant), le logiciel T_tide a été appliqué après avoir soustrait le niveau moyen du signal.

Extraction de la composante tidale des niveaux d'eau

Afin de vérifier la qualité de l'analyse T-tide, les niveaux d'eau bruts et les niveaux d'eau obtenus après analyse harmonique sur la durée de un mois sont comparés pendant une période de temps calme (22-23 novembre, Illustration 16).

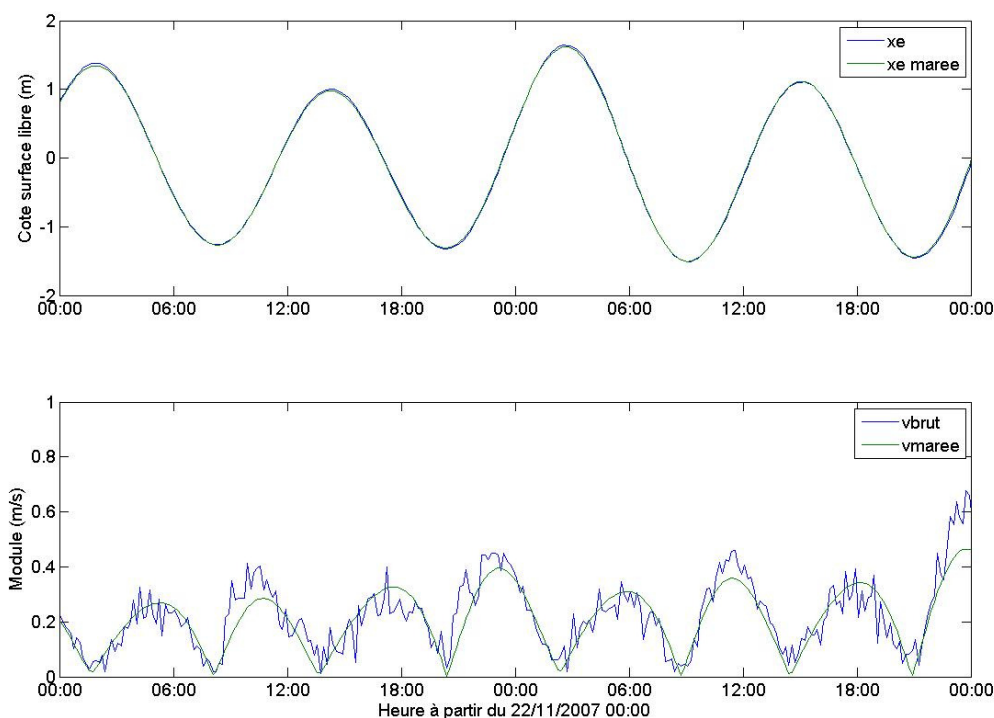


Illustration 16 - Composantes brutes et composantes de marée (point n°9), les 22 et 23 novembre : niveau d'eau et courant mesuré à 1,05 m au dessus du fond.

L'analyse T-Tide permet de reproduire le signal brut observé avec un écart rms de 2 cm, ce qui est une bonne reproduction du signal mesuré. Sur cette même période de 2 jours, les capteurs donnent des écarts de 1 à 2,5 cm entre marée et niveau d'eau brut, ce qui est satisfaisant.

Un deuxième test est effectué pour estimer la qualité de T-tide, plus particulièrement concernant les courants. Un signal quelconque obtenu en composant des composantes de marée est utilisé. A ce signal on ajoute du bruit blanc (qu'on peut considérer correspondre à un signal résiduel haute fréquence) dont on fait varier l'amplitude. On constate que tant que l'amplitude de ce bruit reste relativement faible (inférieure à 50% de l'amplitude du signal composé initialement), alors T-Tide effectue une assez bonne prédiction. Par contre, dès que l'amplitude du bruit est du même ordre que l'amplitude du signal initial, alors les erreurs de T-Tide ne sont plus négligeables. En conclusion, concernant les courants, le traitement T-Tide, sera d'autant meilleur que les courants résiduels sont faibles par rapport aux courants de marée. Dans le cas où ces courants seraient du même ordre de grandeur, il faudra utiliser les analyses T-Tide avec précaution.

Extraction de la composante tidale des courants

Afin de vérifier la validité du traitement T-Tide sur les vitesses mesurées, le signal brut est comparé au signal de courant de marée obtenu par traitement T-Tide (Illustration 17), pendant la période de temps calme du 22-23 novembre. On observe un bon accord. En fonction des capteurs, les écarts rms entre signal brut et signal tidal, sur cette période de deux jours, vont de 0,05 à 0,15 m/s (Illustration 17).

	adcp4b	aqdp1b	<i>aqdp6b</i>	aqdp7b	aqdp9
Ecart RMS vitesse résiduelle (m/s)	0.16	0.11	<i>0.049</i>	0.050	0.071

Illustration 17- Ecart rms entre de la vitesse résiduelle (vitesse de courant brute mesuré moins composante tidale) les 22 et 23/11/2007.(en italique grisé : mesure sujette à caution cf. 3.1.4).

L'illustration 16 montre que l'inégalité semi-diurne (eg., pour la journée considérée, la marée du matin est plus forte que la marée de l'après-midi, Illustration 16) est visible sur les courants, mais que les différences entre les courants lors de deux périodes de flot ou jusant successives restent relativement faibles au regard de l'amplitude des courants. Aussi, dans la partie traitant des résultats de modélisation, pour faciliter la lecture, les résultats seront principalement montrés pour un cycle de marée (e.g. de période 12,4h).

3.2.3. Calcul de la vitesse intégrée sur la verticale

Cas du profileur ADCP

Dans le cas du profileur ADCP, l'ensemble des données de vitesse de courant estimées par le capteur en dessous de la surface libre sont considérés pour le calcul de la vitesse intégrée sur la verticale. Chaque valeur de vitesse représente la vitesse d'une couche de 1m de hauteur. La partie active du capteur étant positionnée à 70 cm du fond, et la distance entre celle-ci et la première couche de mesure étant 1,03m, il n'y a pas de mesure de vitesse de la cote 0 à 1,73 m par rapport au fond.

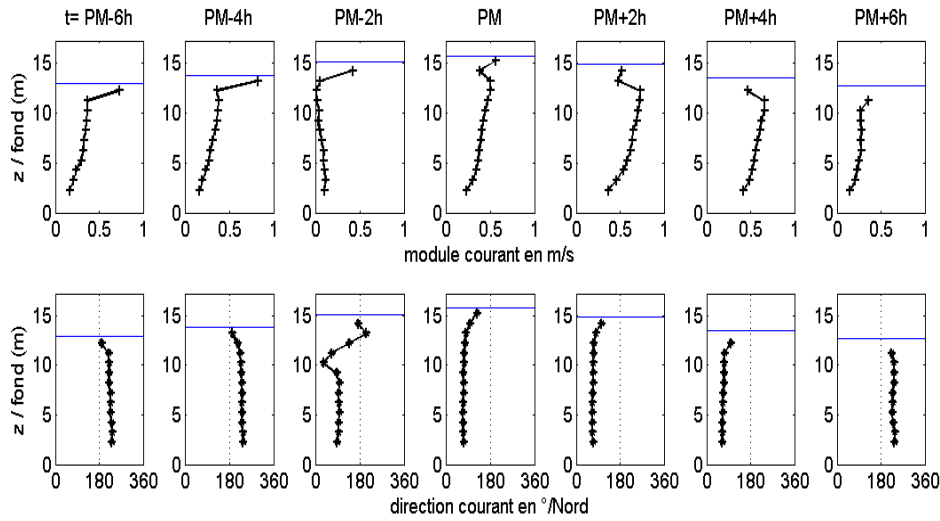


Illustration 18 - Profils de vitesses par rapport à la Pleine Mer, le 23/11/2007. Capteur 4b. Les traits horizontaux indiquent le niveau de la surface libre.

Le profil théorique de vitesse est, en domaine côtier, hors des zones de déferlement des vagues et lorsqu'il n'y a aucune stratification thermo-haline, un profil logarithmique (profil de Prandtl). Pour calculer la vitesse intégrée sur la verticale à partir des données mesurées, il faut faire une hypothèse sur la vitesse sur la partie inférieure du profil de 0 à 1,73 m du fond. Dans le cas théorique du profil logarithmique, la vitesse croît en fonction de la cote z , donc on peut encadrer la vitesse de la manière suivante : $0 < v(0 < z < 1,73) < v(1,73 < z < 2,73)$.

Pour la couche inférieure du profil ($0 < z < 1,73$) on considère $v=0$ comme hypothèse minimale et $v=v(1,73 < z < 2,73)$ comme hypothèse maximale. Ainsi on donne un encadrement de vitesse intégrée sur la verticale v_{2DH} sur l'ensemble du profil par les formules :

$$v_{2DH \min} = \frac{1}{h} \sum_{i=1}^n v_{mesurée}(i) \cdot dh(i) \quad (2)$$

$$v_{2DH \max} = \frac{1}{h} \left(\sum_{i=1}^n v_{mesurée}(i) \cdot dh(i) + 1,73 \cdot v_{mesurée}(1) \right) \quad (3)$$

avec n le nombre de couches sur lesquelles la vitesse a été mesurée au point et instant considéré, $dh(i)$ l'épaisseur de la couche i en m.

Cas des capteurs Aquadopp

Les capteurs Aquadopp ne produisent qu'une seule valeur de vitesse de courant selon les trois composantes à 35 cm au dessus de la tête du capteur soit 1,05 m au dessus

du fond dans cette étude. Pour calculer la vitesse intégrée sur la verticale, on est alors obligé de faire l'hypothèse que le profil de vitesse est logarithmique et respecte la loi suivante de Prandtl:

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (4)$$

avec :

- $z_0 = 0.033 \text{ ks}$ en écoulement turbulent (m)
- ks : coefficient de rugosité (m)
- u : vitesse du courant à la cote z (m/s)
- u_* : vitesse de frottement au fond (m/s)
- κ : constante de Von Karman (0.41)
- z : cote par rapport au fond (m)

Estimation du coefficient de rugosité ks

Le coefficient ks représente la rugosité du fond. Il est constitué d'une rugosité de peau ks_{peau} et d'une rugosité de forme ks_{forme} : $ks = ks_{\text{peau}} + ks_{\text{forme}}$. Ces deux termes ont été estimés à partir des formules suivantes (van Rijn, 1989) :

- $ks_{\text{peau}} = 3 \cdot Dg$ avec Dg la taille de grain des sédiments
- $ks_{\text{forme}} = 20 \cdot \eta_r^2 / \lambda_r$ avec η_r la hauteur de rides de fond et λ_r leur longueur d'onde.

Dans le cas présent, d'après les observations visuelles des plongeurs lors des mouillages, la taille Dg des sédiments est estimée à 0,2 mm (sable fin). Concernant la rugosité de formes, lors des mouillages, aucune ride de sable n'a été observée. Par contre, nous étions en présence de nombreux pinacles coralliens. Aussi, pour prendre en compte ces rugosités, ces pinacles ont été assimilés à des rides faisant 0,25 m de haut et 1m de longueur d'onde.

Estimation de la vitesse de frottement et de la vitesse 2DH

La contrainte au fond est définie par l'équation (5), avec u^* la vitesse de frottement au fond. Par ailleurs, lorsque l'on connaît la vitesse intégrée sur la verticale U , cette contrainte au fond, pour des écoulement non stratifiés, en domaine côtier, est donnée par l'équation(6), avec Ch le coefficient de Chézy tel que $Ch = 18 \cdot \log(12 \cdot h / ks)$ avec h la hauteur d'eau en mètre.

$$\tau = \rho u_*^2 \quad (5)$$

$$\tau = \rho g \frac{U^2}{C_h^2} \quad (6)$$

Ainsi, la vitesse intégrée sur la verticale s'exprime sous la forme :

$$U = C_h \frac{u_*}{\sqrt{g}} \quad (7)$$

Au final, à partir de les équations (4) et (7), on peut donc exprimer la vitesse intégrée sur la vertical U en fonction de la rugosité, du courant à la cote z et du coefficient de Chézy :

$$U = \kappa C_h \frac{u(z)}{\sqrt{g}} \frac{1}{\ln\left(\frac{z}{z_0}\right)} \quad (8)$$

Ce calcul repose sur l'hypothèse que le profil logarithmique des vitesses est valide. Si l'on examine les données du profileur 4b au cours d'une marée (Illustration 18), on peut noter que, la plupart du temps, les courants vont quasiment tous dans la même direction, à l'exception de l'instant de renverse, tandis que le module des vitesses suit un profil relativement logarithmique, à l'exception du moment de renverse pendant lequel les courants sont faibles. Ce type de profil conforte l'utilisation de l'hypothèse d'un profil logarithmique pour estimer les courants 2DH à partir d'une seule mesure de vitesse.

3.3. RESULTATS ET ANALYSES

3.3.1. Hydrodynamique tidale

Niveaux d'eau

Le tracé temporel des niveaux d'eau de marée (traitement T-tide), le 22 novembre, pour un coefficient de marée de 80 (Illustration 19) montre :

- Des différences de marnage :
 - Les marnages les plus forts sont situés au Sud-Ouest du lagon (capteurs 1b et 7b), avec un marnage de 3,40 m.
 - Le marnage le plus faible est situé au Nord Ouest, près de Choizil, avec un marnage de 2,40 m.
 - Aux autres localisations de capteurs, les marnages sont assez proches, de l'ordre de 3,10 m.

- Des différences de phase :
 - Les PM et BM semblent se produire plus tôt (d'environ 5 à 10 min) à l'Ouest du lagon (capteurs 1b, 7b) qu'à l'Est. Cependant comme la fréquence d'échantillonnage du signal est de 10 min, on ne peut pas quantifier avec précision cette tendance qui est par ailleurs visible sur le terrain.

Mis à part le capteur 6b dont les données sont sujettes à caution, la marée est pratiquement uniforme autour du lagon avec des variations spatiales de marnage par exemple de 30 cm pour la journée du 22 novembre. Pour cette même journée, les déphasages entre capteurs sont de l'ordre de 10 min. La visualisation des composantes de marée, calculée sur la totalité de la campagne, (Illustration 20) obtenues pour chaque capteur fournit l'information complète sur la variabilité spatiale de la marée en ces différents capteurs.

Aux positions 2, 4, 4b, 5, 7b, 9 (Illustration 8), les composantes restent relativement proches, tandis que les composantes en 1b (passe Sud-Ouest), 4b (passe Sud-Est) montrent un marnage légèrement plus fort. Ainsi, par exemple entre les capteurs 1b et 4b, l'onde M2 (resp. S2) diffère de 15 cm (resp. 12 cm). Ces différences peuvent se visualiser sur le signal temporel (Illustration 19).

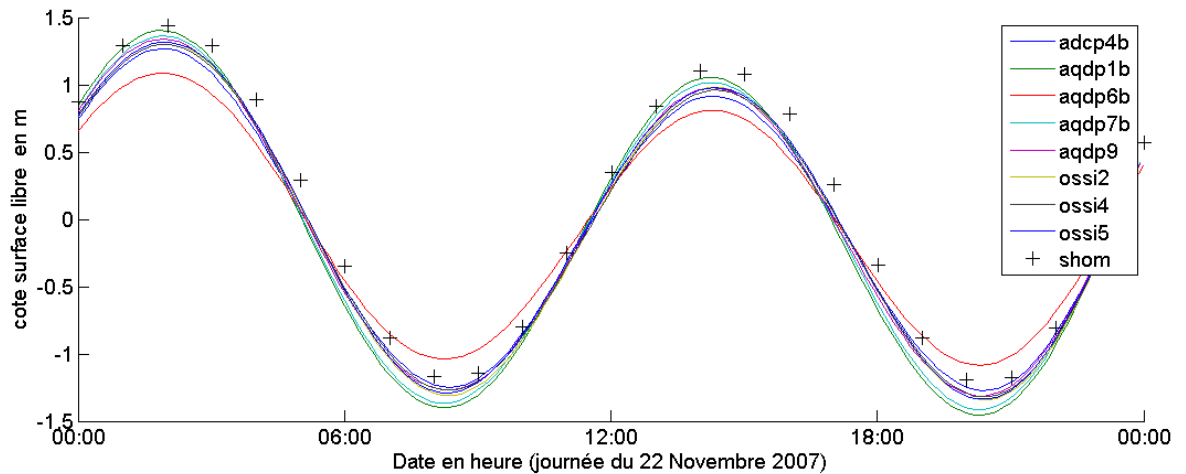


Illustration 19 – Composante tidale de la hauteur d'eau obtenues par traitement T-tide pour tous les capteurs le 22 Novembre 2007. Le référentiel vertical est le zéro relatif à chaque capteur pendant la campagne cf. 3.2.1. (Les données du capteur 6b sont sujettes à caution cf. 3.1.4).

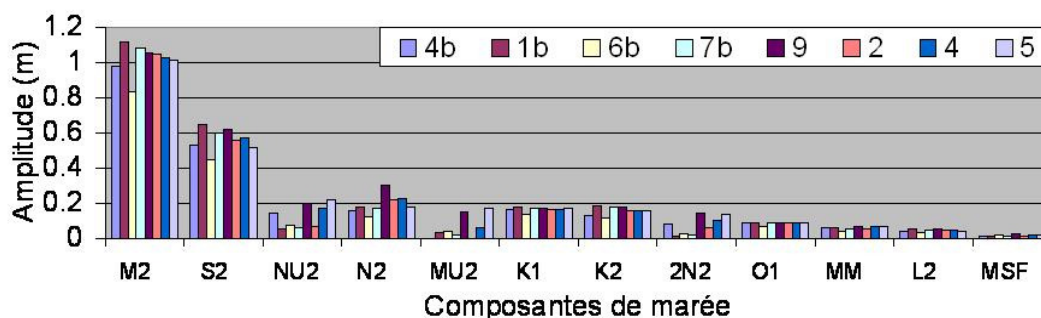


Illustration 20 – Amplitude des composantes de marée obtenues par analyse T-Tide sur les huit capteurs.

Courants mesurés à Δz_{Vmes} m au dessus du fond

Afin d'analyser la variabilité spatiale du courant de marée, les courants de marée sont tracés pour toute la durée de la campagne de mesure (sous forme de roses de courant, e.g. v-composante Nord- en fonction de u-composante Est). L'illustration 21 montre que les courants mesurés à l'intérieur du lagon (capteurs 6b et 7b) sont faibles (intensité maximale de l'ordre de 0,10 à 0,20 m/s) tandis que ceux mesurés dans les passes sont de l'ordre de 0,50 à 0,80 m/s avec un caractère fortement alternatif (courants chenalisés par la présence des passes).

3.3.2. Hydrodynamique tidale 2DH

Les valeurs mesurées des vitesses de courants représentent des vitesses mesurées à des profondeurs différentes et donc ne sont pas directement comparables. Pour pouvoir les comparer, il est nécessaire de s'intéresser aux vitesses de courants tidaux intégrées sur la verticale qui représentent une même variable pour tous les capteurs mesurant la vitesse de courant. L'illustration 22 montre les courants tidaux 2DH, en chaque capteur, pour toute la durée de la campagne, et superposé aux courants totaux 2DH.

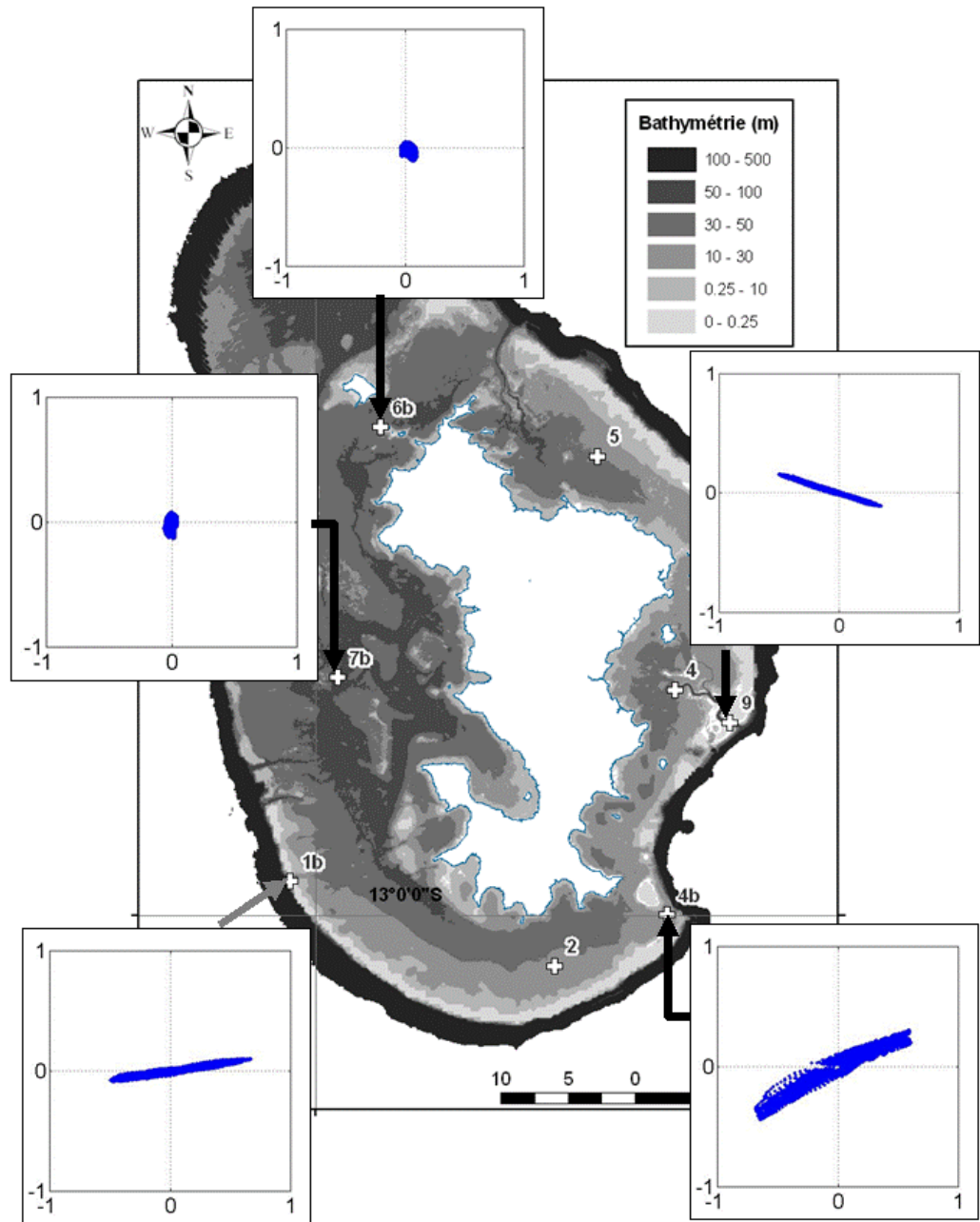


Illustration 21 – Courant tidaux à Δz_{Vmes} au dessus du fond (v en fonction de u en m/s) pour les capteurs ADCP et les Aquadopp.

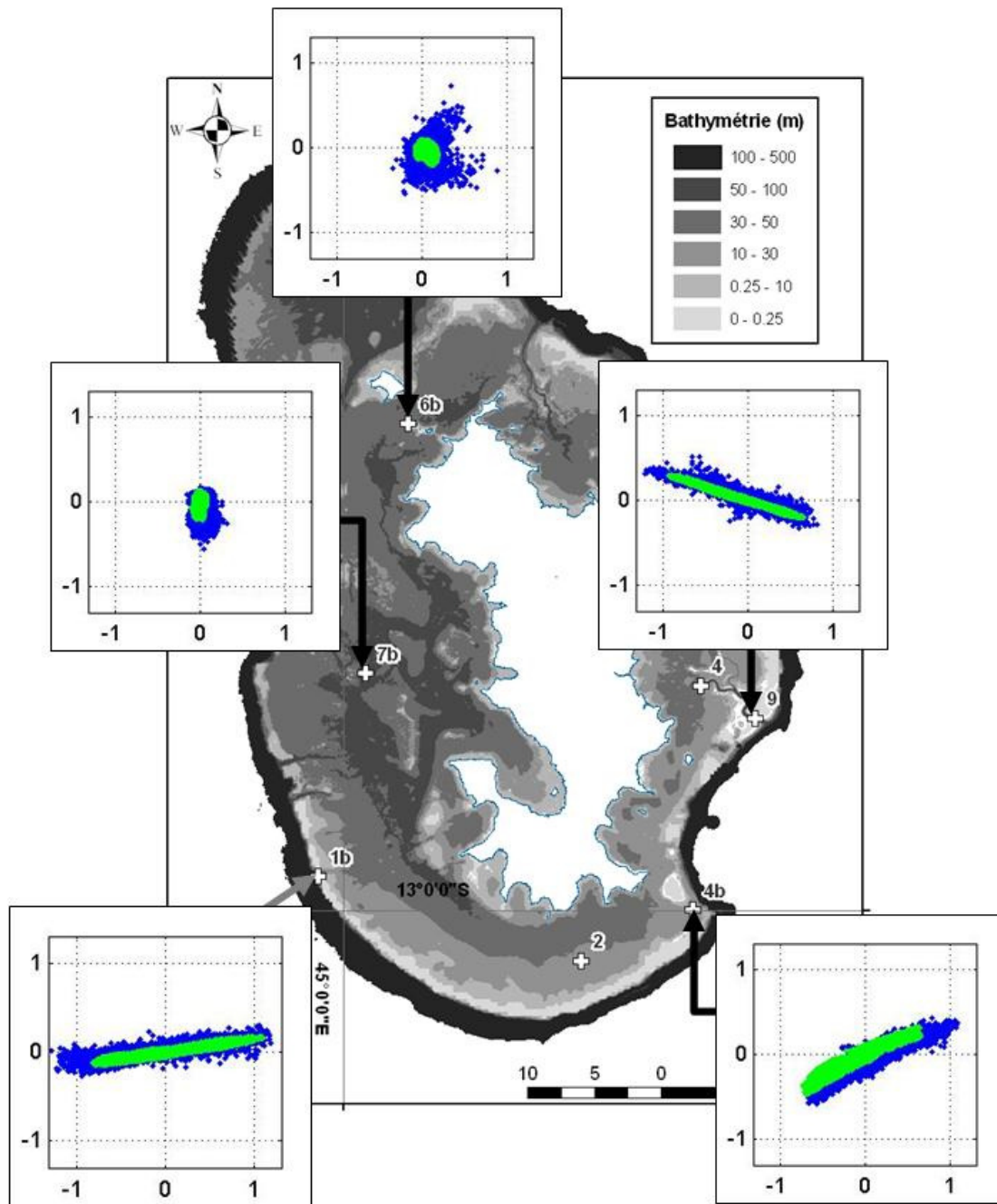


Illustration 22 – Courants totaux (bleu) et de marée (vert) 2DH (intégrés sur la verticale), en faisant l'hypothèse d'une rugosité de fond $k_s=1.25m$. v en fonction de u (m/s)

	le 22/11/07	adcp4b	aqdp1b	aqdp6b	aqdp7b	aqdp9
Flot	module max (m/s)	0.41	0.17	0.06	0.04	0.44
	direction (°)	218	72	22	188	290
Jusant	module max (m/s)	0.49	0.48	0.04	0.05	0.3
	direction (°)	69	255	258	263	108

Illustration 23- Module et direction des vitesses maximales de courants intégrées sur la verticale – Flot et jusant du 22/1/07.

L'illustration 23 synthétise les caractéristiques principales des courants de flot et jusant, pour la journée du 22/11/07, journée où les courants de marée sont dominants. Dans les passes (capteurs 9, 4b et 1b), les courants sont de l'ordre de 0,40 m/s, avec des variations selon les capteurs et selon la phase (jusant ou flot) :

- Capteur 4b : le courant de jusant domine le courant de flot
- Capteur 1b : le courant de jusant domine très fortement le courant de flot
- Capteur 9 : le courant de flot domine le courant de jusant.

Les autres capteurs (6b et 7b), situés à l'intérieur du lagon, indiquent de très faibles vitesses de l'ordre de 5 cm/s.

Afin d'analyser l'hydrodynamique tidale 2DH (courants intégrés sur la verticale), les modules de vitesses sont tracés pour une durée limitée de un jour, le 22/11/2007 (Illustration 24).

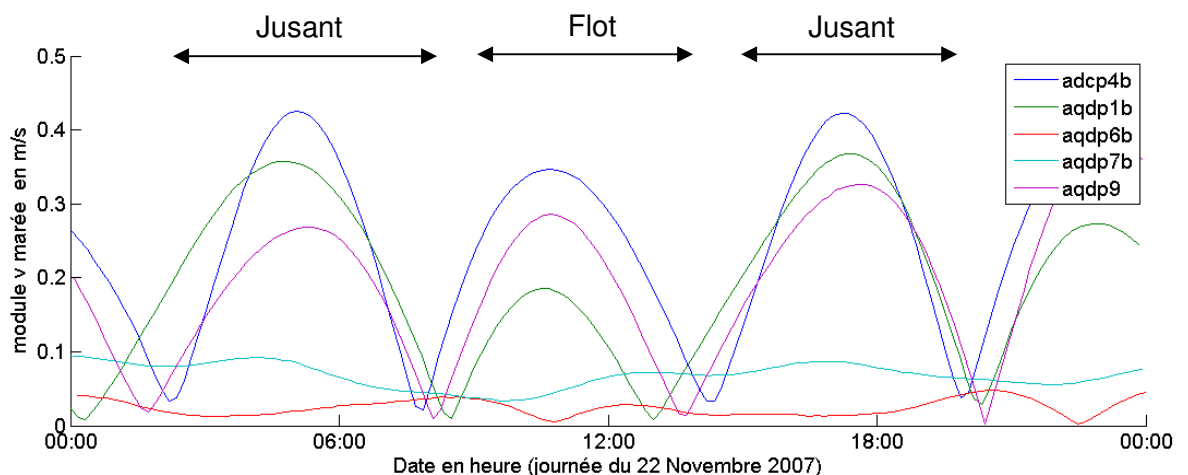


Illustration 24- Modules des courants tidaux estimés par T-Tide le 22/11/2007.

On constate que les flots, jusants et renverses n'ont pas lieu de manière simultanée sur tout le lagon. En effet :

- Les courants maximaux de jusan ont lieu d'abord au Sud-Ouest (capteur 1b), puis à l'Est (capteur 4b, puis 9) avec un décalage temporel atteignant 1h30min (Illustration 24 et Illustration 25).
- Les courants maximaux de flot ont aussi d'abord lieu à l'Ouest, puis à l'Est, avec un décalage temporel moindre (Illustration 24 et Illustration 25).
- La renverse du flot vers le jusan a lieu d'abord au Sud-Ouest, puis à l'Est, et connaît aussi un décalage temporel, de 1h30min (Illustration 24 et Illustration 25).
- Par contre, la renverse du jusan vers le flot est quasiment synchrone entre l'Ouest et l'Est, à 25 min près (Illustration 24 et Illustration 25).

	Décalage par rapport à la marée à Dzaoudzi (SHOM)		
Capteur	adcp4b (SE)	aqdp1b (SW)	aqdp9 (E)
Renverse Jusan/Flot	PM - 6:20	PM - 6:10	PM - 5:55
Max Flot	PM - 3:00	PM - 4:10	PM - 3:25
Renverse Flot/Jusan	PM + 0:10	PM - 1:40	PM - 0:15
Max Jusan	PM + 3:00	PM + 2:50	PM + 3:25

Illustration 25 – Heures des courants tidaux maximaux de flot, jusan et de renverse par rapport à la première Pleine Mer du 22/11/2007 prédite à Dzaoudzi par le SHOM.

Toutes ces observations de décalage temporel sont valables pour la journée du 22/11. Si on analyse les résultats sur toute la durée de la campagne de mesure, on constate que :

- Le déphasage temporel entre les capteurs 4b et 9 reste relativement constant. La circulation dans l'Est du lagon semble donc régulière.
- le déphasage entre les capteurs 4b et 1b n'est pas constant et pas toujours dans le même sens. Ainsi globalement, le déphasage temporel entre le capteur 1b (SW) et le capteur 4b (SE) est tel que :
 - Le maximum de flot a lieu 3h plus tard et le maximum de jusan a aussi lieu 3h plus tard. Exemple : le 14/11/07 – coef de marée 64.
 - Le maximum de flot a lieu ~1h plus tôt et le maximum de jusan est synchrone. Exemple : le 22/11/07 – coef de marée 78.
 - le maximum de flot a lieu 2h plus tard et le maximum de jusan est quasiment synchrone. Exemple : le 26/11/07 – coef de marée 100.

Ainsi, la circulation due à la marée dans la passe SW apparaît complexe, et, dans tous les cas, n'est pas synchrone avec les autres capteurs.

3.3.3. Hydrodynamique totale 2DH

Signal résiduel (brut-marée)

Le signal résiduel est obtenu en faisant la différence entre le niveau d'eau brut et le niveau d'eau dû à la marée (Illustration 26). La grandeur comparée est la cote de surface libre par rapport à un niveau de référence, qui est propre à chaque capteur, et propre à la campagne de mesure. En effet, ce niveau de référence choisi est la moyenne des mesures au cours de la campagne, cette moyenne étant assimilée au niveau moyen de la mer au point considéré. Tout phénomène constant au cours de la période est donc assimilé à ce « niveau moyen » et ne peut donc pas être extrait des mesures. Le signal résiduel extrait après traitement est donc centrée sur zéro. Ainsi, le signal résiduel présenté ici ne donne pas de valeur absolue des surcotes, mais donne par contre les tendances en valeur relative, e.g. la pente du signal résiduel est égale à la pente des surcotes réelles absolues).

Le signal résiduel suit une tendance allant d'une baisse du niveau d'eau (de 5 cm) par rapport au niveau d'eau de référence pendant la campagne, et ce, en début de campagne, le 08/11, à une hausse du niveau d'eau (environ 8 cm) par rapport à ce niveau de référence.

A cette tendance, se superposent des oscillations semi-diurnes, qui semblent, elles, dues aux conditions météorologiques semi-diurnes (Illustration 11 et Illustration 12).

L'Illustration 27 synthétise les caractéristiques principales en niveau d'eau de chaque capteur. On note des signaux résiduels allant de -0,25 m à +0,16 m, selon les capteurs. En outre, la moyenne des signaux résiduels dans le temps est négative pour chaque capteur. Ainsi, on note que les variations temporelles du signal résiduel sont de l'ordre de +/- 25 cm.

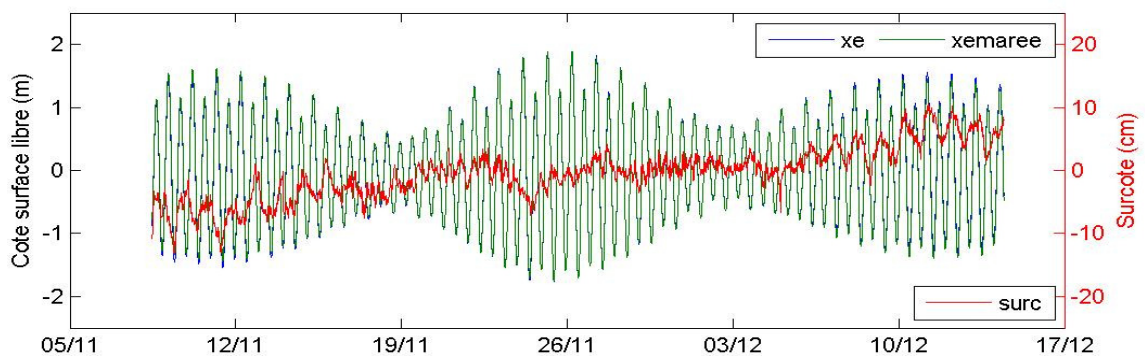


Illustration 26 - Composantes brutes (xe), composantes de marée (xemaree) et de signal résiduel (surc) (point n°2) sur toute la durée de la campagne.

	<i>en m</i>	adcp4b	aqdp1b	aqdp6b	aqdp7b	aqdp9	ossi2	ossi4	ossi5
Xe brut	Max	1.87	2.06	1.56	1.97	1.89	1.88	1.86	1.889
	Min	-1.66	-1.87	-1.42	-1.86	-1.73	-1.77	-1.71	-1.74
signal résiduel	Max	0.12	0.16	0.14	0.14	0.21	0.11	0.16	0.15
	Min	-0.17	-0.25	-0.13	-0.15	-0.19	-0.13	-0.15	-0.16
	Moyenne	-0.003	-0.007	-0.003	-0.008	-0.004	-0.003	-0.006	-0.002

Illustration 27 – Statistiques sur les cotes de surface libre mesurées pendant la campagne.

Composantes de la vitesse

L'illustration 28 montre les courants totaux (marée et résiduel) 2DH, e.g. intégrés sur la verticale. On retrouve le fait que les courants les plus forts se situent dans les passes. Ils atteignent environ 1 m/s, jusqu'à 1.27 m/s dans la passe Sud-Ouest (capteur 4b). Ces courants sont toujours à caractère fortement alternatif, chenalisés par les passes. A l'intérieur du lagon, côté Ouest (capteur 7b), les courants totaux 2DH restent relativement faibles avec une vitesse maximale de 0.56 m/s.

	<i>en m/s</i>	adcp4b	aqdp1b	aqdp6b	aqdp7b	aqdp9
V 2DH TOTAL	Max	1.14	1.27	0.93	0.56	1.25
	Moy	0.38	0.46	0.11	0.11	0.32
V 2DH MAREE	Max	0.83	1.11	0.25	0.21	0.97
	Moy	0.28	0.33	0.06	0.07	0.30
V 2DH RESIDUEL	Max	0.67	0.98	0.81	0.46	0.51
	Moy	0.10	0.12	0.06	0.04	0.03

Illustration 28 – Statistiques sur les modules de vitesse intégrée sur la verticale (2DH). Modules calculés en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale) pendant la campagne. V2DH TOTAL : courants totaux intégrés 2DH, V2DH MAREE : courants de marée intégrés 2DH calculé par T_Tide, V2DH RESIDUEL : courants résiduels intégrés 2DH.

L'illustration 28 montre que les courants maximaux résiduels sont du même ordre de grandeur que les courants de marée. Ainsi, l'hydrodynamique non-tidale (e.g. résiduelle) n'est pas négligeable par rapport aux courants de marée, que ce soit à l'intérieur du lagon, ou bien dans les passes. Ceci est aussi mis en évidence par la visualisation des courants sur toute la durée de la campagne (Illustration 29).

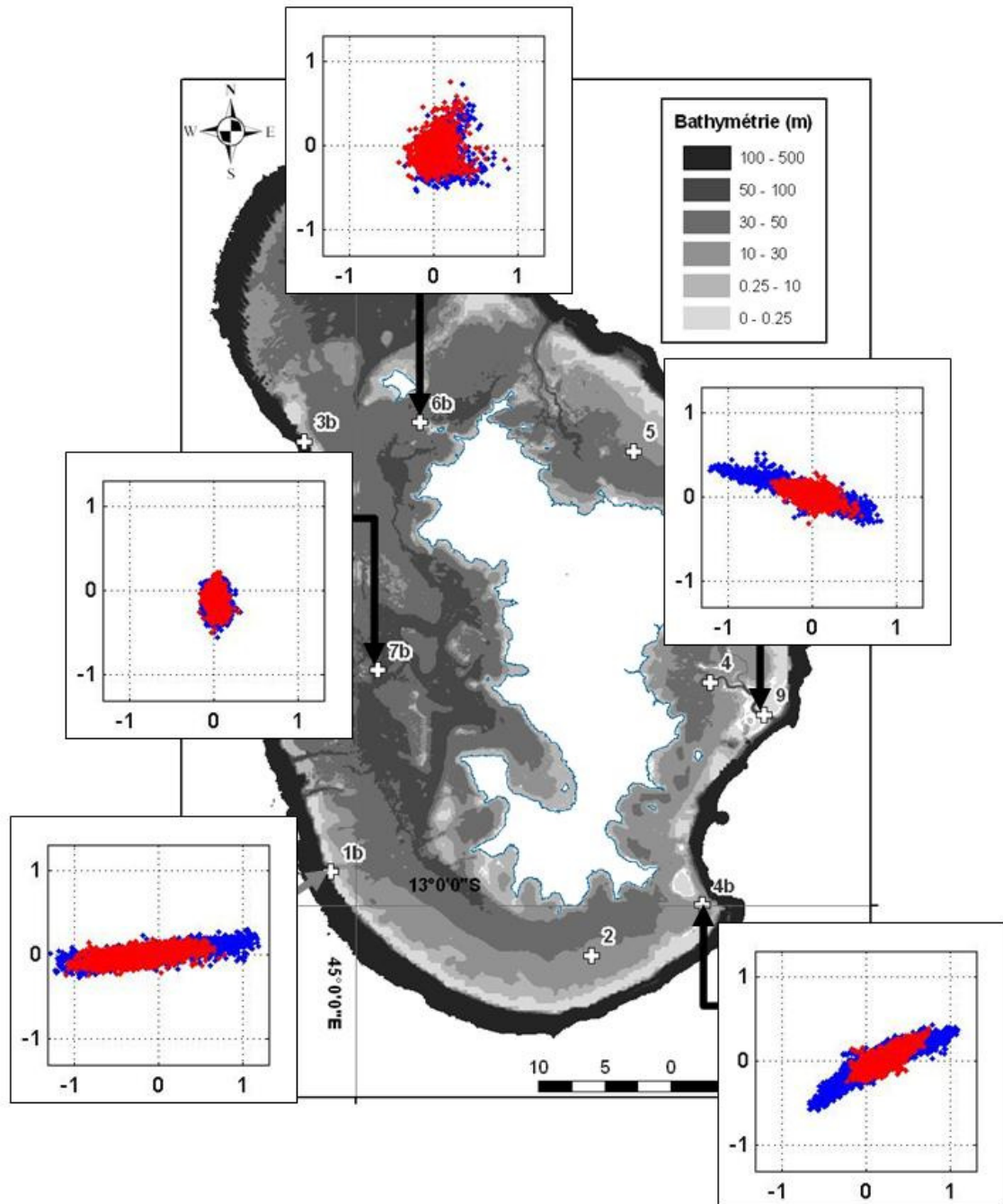


Illustration 29 – Courants totaux (bleu) et résiduels (rouge) 2DH (intégrés sur la verticale), en faisant l'hypothèse d'une rugosité de fond $k_s=1.25m$. v en fonction de u (m/s)

Pendant la campagne de mesure, à plusieurs reprises, aucune renverse des courants n'est observée (Illustration 30). Ainsi, pendant parfois plusieurs jours, le courant garde une direction à peu près constante. L'illustration 31 illustre ce phénomène en montrant une direction des courants totaux (vbrut) qui reste constante toute la journée du 17/11, alors que le signal de marée (vmarée) indique la renverse qui aurait eu lieu si il n'y avait pas eu de courants résiduel. Ce phénomène est observé particulièrement en période de morte-eau, quand les courants de marée sont plus faibles (cf. Annexe 2).

On constate des corrélations entre les données météorologiques (intensité et provenance du vent) et les courants résiduels (Illustration 31). Ainsi, les courants résiduels sont plus forts en périodes de tempête, avec parfois une intensité atteignant celle des courants de marée, et c'est alors que se produisent les phénomènes de non-renverse du courant. On peut noter que pendant les périodes de non renverse, les courants dans les passes, tout au moins pendant la campagne, sont orientés vers l'extérieur du lagon).

	Période de non renverse		Direction principale	Commentaire
	début	fin		
adcp4b	16/11/2007 16:00	18/11/2007 19:00	77°	
	21/11/2007 02:00	22/11/2007 06:00	75°	
	01/12/2007 06:00	03/12/2007 17:00	69°	
aqdp1b	07/11/2007 12:40	09/11/2007 22:00	262°	
	16/11/2007 18:00	21/11/2007 09:00	262°	
aqdp6b				Vitesse faible signal trop bruité pour pouvoir interpréter
aqdp7b			175°	Vitesse faible Renverse quasi absente (direction quasi constante pour vitesse significative de courant)
aqdp9	18/11/2007 10:00	19/11/2007 09:00	101°	

Illustration 30- Récapitulatif des périodes de non renverse du courant pendant la campagne.

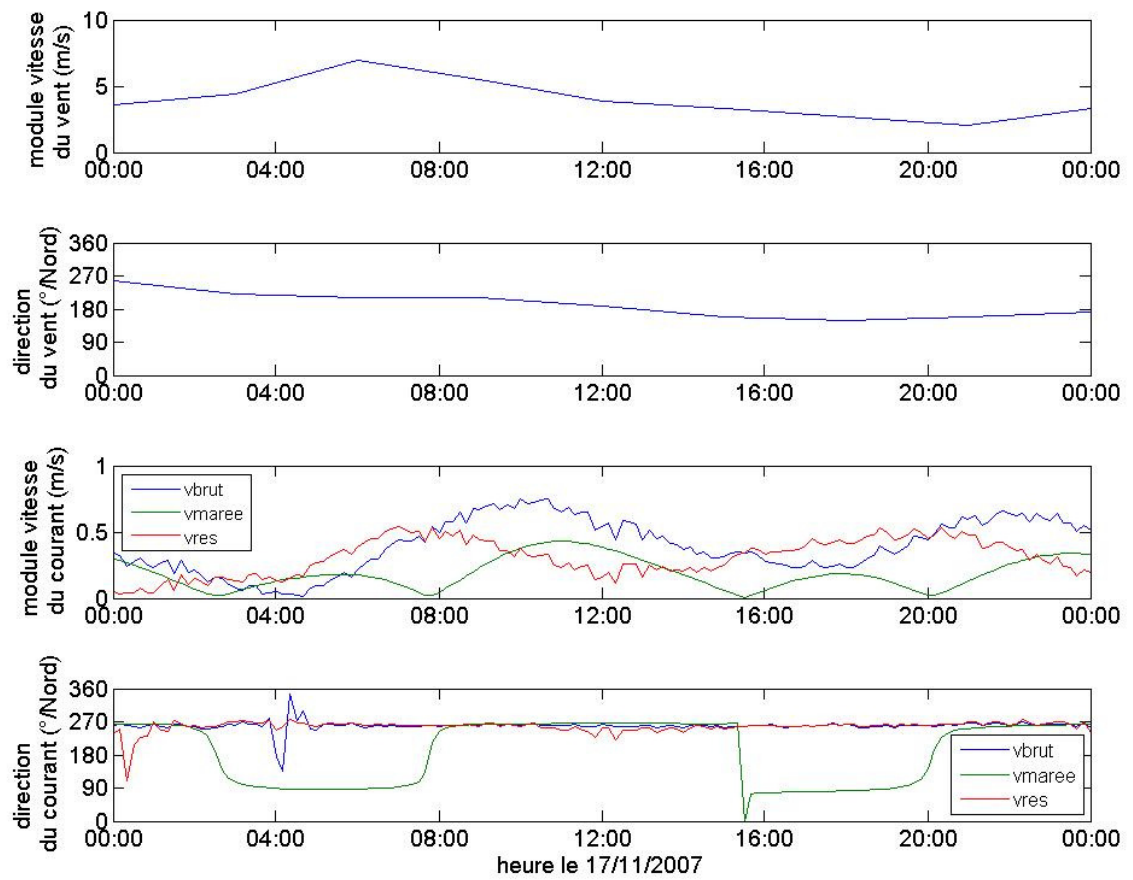


Illustration 31- Point 1b : module et direction du vent local et du courant mesuré (vbrut), courant de maré (vmaree) et courant résiduel (vres) le 17/11 /2007.

4. Mise en place du modèle

4.1. CHOIX DU CODE

L'hydrodynamique du lagon semble être sous l'influence principale de la marée d'une part, et des effets météorologiques d'autre part (Gouberville et Thomassin, 2000). Les grands courants océaniques sont supposés avoir une importance négligeable à l'échelle du lagon. Les effets de la houle sur la courantologie dans les lagons peuvent être localement importants (Symonds *et al*, 1995) mais sont négligés dans la présente étude du lagon de Mayotte (Gouberville et Thomassin, 2000).

Afin d'avoir une bonne représentation de l'hydrodynamique du lagon de Mayotte, il est nécessaire de prendre en compte les effets de la marée d'une part et ceux de la météorologie d'autre part. La prise en compte des effets météorologiques nécessite la couverture d'une grande emprise avec une connaissance de la météorologie sur cette zone, et par conséquent des conditions de marée sur cette même zone également.

Conformément au cahier des charges, l'objectif est ici de modéliser la courantologie avec un modèle 2DH (hypothèses et limites décrites dans le paragraphe ci-dessous). Deux codes ont été envisagés : Telemac (EDF/Sogreah) et MARS (Ifremer).

Le code de calcul MARS développé par l'Ifremer est un outil permettant de modéliser l'hydrodynamique au niveau régional à partir de composantes de marée et de données de météorologie, directement accessibles (fichiers .nc de composantes de marée et fichiers de météorologie au format .nc issus de modèles globaux validés et dont les données sont accessibles). Ce code permet en outre de passer de l'échelle régionale à l'échelle locale du lagon de Mayotte, avec une résolution spatiale et temporelle adaptée. Enfin, ce code a déjà été utilisé pour modéliser le lagon de Nouvelle Calédonie par Douillet (1998).

Le code Telemac présente de nombreux avantages, mais ne dispose pas de l'option directement opérationnelle de pouvoir utiliser en entrée des fichiers de composantes de marée et de données météorologiques non-uniformes et instationnaires. Par ailleurs, la littérature montre peu d'étude de courantologie de lagon avec ce code.

Les résultats obtenus avec le code MARS sur le lagon de Nouvelle-Calédonie (Douillet, 1998) et de Mayotte (Safege, 2005) ayant été jugés satisfaisants, nous avons donc choisi d'utiliser le code MARS pour la présente modélisation de l'hydrodynamique du lagon de Mayotte.

4.2. DESCRIPTION DU CODE MARS

Le modèle Mars-2D, développé par l'Ifremer, est un modèle hydrodynamique résolvant les équations de Saint-Venant. Ces équations régissent les écoulements à surface

libre en deux dimensions d'espace dans le plan horizontal, après une intégration verticale des équations de départ (dites de Navier Stokes). Les hypothèses liées à cette formulation impliquent que le modèle sort de son domaine de validité dès que :

- les ondes de surface sont trop courtes devant la hauteur d'eau (typiquement, la houle, de longueur d'onde de plusieurs dizaines de mètres à centaines de mètres, ne peut pas être résolue par les équations de Saint-Venant),
- les pentes sont trop fortes (en théorie, les équations de Saint-Venant ne sont valables que pour des pentes faibles, inférieures à 10%),
- la configuration étudiée est estuarienne avec des gradients verticaux de température et (ou) de salinité.

Mars-2D calcule donc la courantologie en intensité et direction de courants moyennés sur la verticale, ainsi que les hauteurs d'eau. Ces grandeurs sont calculées en fonction :

- de conditions aux limites imposées au bord du domaine de calcul (frontières). Ces conditions aux limites peuvent contenir les effets de la marée et de la météorologie.
- de conditions de forçages météorologiques (vent et pression) appliquées en chaque nœud du modèle.

La résolution des équations se fait :

- par discrétisation spatiale selon une méthode aux différences finies. Ceci revient à calculer sur un domaine les grandeurs physiques en chaque point d'un maillage régulier en longitude et latitude.
- par discrétisation temporelle : les variables sont calculées à chaque pas de temps du modèle.

Le modèle est construit pour permettre un emboîtement de modèles gigognes, le modèle de plus grande emprise fournissant les conditions aux limites du modèle d'emprise immédiatement inférieure et ainsi de suite jusqu'au modèle de détail. Cette méthode d'emboîtement a été utilisée dans cette étude (Illustration 32).

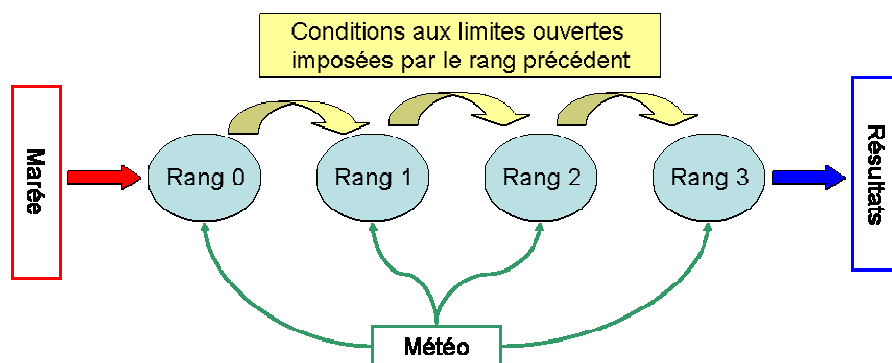


Illustration 32 - Principe d'emboîtement du modèle Mars-2D.

4.3. MISE EN PLACE DU MODELE A MAYOTTE

4.3.1. Configuration : emprise et résolution

Afin de tenir compte des effets hydrodynamiques induits par la météorologie (surcotes et courants induits par le vent), le modèle a besoin d'une grande emprise spatiale. Ceci oblige à choisir un premier domaine de calcul – appelé rang0 – suffisamment grand, de résolution spatiale faible (maille de 5km) pour avoir des temps de calcul acceptables. Afin d'arriver au niveau de détail voulu dans le lagon de Mayotte, trois autres rangs emboîtés ont été construits (Illustration 33) en faisant en sorte d'éviter les forts gradients de pente bathymétrique aux frontières. Les résolutions spatiales sont affinées jusqu'au dernier rang (rang3) représentant le lagon de Mayotte avec une taille de maille de 130m (Illustration 34).

4.3.2. Bathymétrie

A chaque rang doit être associée la grille bathymétrique correspondante. Par convention, la bathymétrie est positive pour les points situés sous le zéro hydrographique, et négative pour les points situés au dessus. Les valeurs de bathymétrie sont exprimées en mètre par rapport au zéro hydrographique.

Les grilles bathymétriques des différents emboîtements du modèle ont été établies à partir de différentes sources (Illustration 35), en choisissant pour chaque zone le jeu de données le plus précis disponible. Les bathymétries des rangs 0 et 1 ont été réalisées à partir de la bathymétrie GEBCO par interpolation linéaire. Un filtrage passe-bas a été appliqué au rang 0 afin d'atténuer les fortes pentes bathymétriques dans la zone d'étude.

Les bathymétries des rangs 2 et 3 ont été réalisées en combinant toutes les sources de données puis en calculant une grille bathymétrique régulière par krigeage isotrope (Illustration 36). La méthode de krigeage a permis de ne pas interpoler au dessus des récifs coralliens qui sont identifiés grâce aux données de délimitation des récifs issus

de la BdTopo IGN. Ensuite, une sonde uniforme de 0,25 m est affectée à tous les points situés dans une zone récifale. Cette hypothèse de niveau d'eau au dessus du pied des coraux des barrières a été réalisée par dire d'expert à partir des observations de récif lors des grandes marées (Illustration 36).

D'autre part les courbes de niveau à 5 m et 10 m d'altitude de la BdTopo de l'IGN sont utilisées pour délimiter les points à terre.

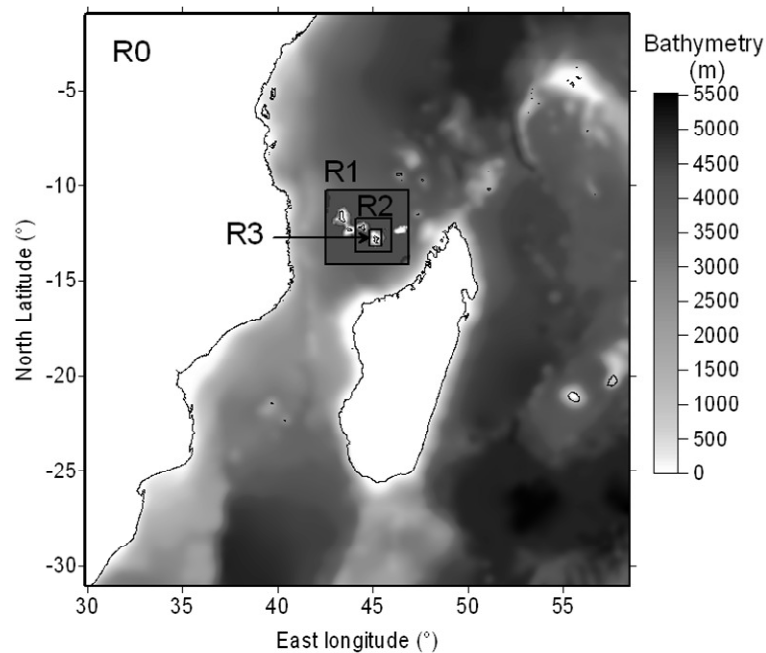


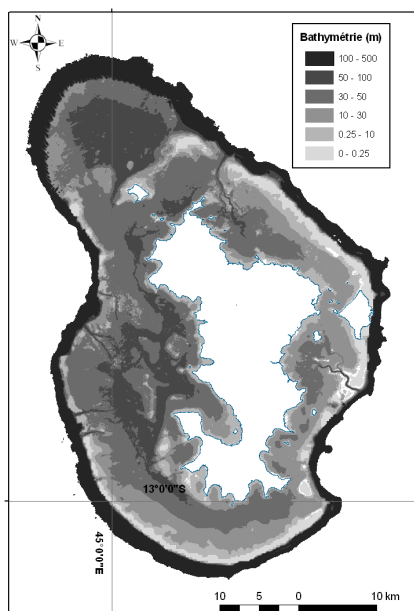
Illustration 33 - Emboitements des domaines de calcul du rang0 (R0) au rang3 (R3).

	Coordonnées géographiques des grilles (en ° - WGS84)				Pas moyen de la grille (en m)		Nombre de mailles	
	Ouest	Est	Sud	Nord	dX	dY	nbX	nbY
Rang0	30	58,398	-31	-1,035	6831	6837	445	488
Rang1	42,6	46,926	-14,2	-10,2	1857	1852	254	241
Rang2	44,087	45,953	-13,533	-11,765	444	444	456	443
Rang3	44,834	45,416	-13,205	-12,377	133	133	474	688

Illustration 34 - Caractéristiques des domaines emboîtés du modèle Mars-2D pour Mayotte

Source	Description	Résolution (m)	Date
GEBCO	Bathymétrie mondiale accessible sur internet (http://www.gebco.net/)	1800	2003
SHOM	Levé bathymétrique à l'extérieur du lagon	100	2004
SHOM	Levé bathymétrique à l'intérieur du lagon	25	2007
Bambou Pêche	Levé bathymétrique dans les passes de Mayotte	5	2004
IGN - BdTopo	Délimitation des récifs coralliens	-	1997
IGN - BdTopo	courbes de niveau à 5m et 10m d'altitude	-	1997

Illustration 35 - Sources de données pour la construction des grilles bathymétriques.



(a)



(b)

Illustration 36 - Lagon de Mayotte : (a) bathymétrie du rang 3 du modèle ; (b) photographie de la barrière récifale de la passe en S lors d'une marée basse de vive eau (source : APNEE)

4.3.3. Méthode d'emboîtement adoptée

Deux limites sont à apporter à l'utilisation des bathymétries des rangs 0 et 1 :

- les bathymétries sont peu précises (en raison de l'impossibilité d'avoir des données bathymétriques validées sur de grandes emprises comme le rang 0)
- elles comportent de fortes pentes et donc l'utilisation des équations de Saint-Venant (code MARS2D) atteint ses limites (approche valable pour des pentes inférieures à 10%).

Les données utilisées pour construire les bathymétries aux rangs 2 et 3 ont des résolutions bien plus fines que celles utilisées pour les rangs 0 et 1 (Illustration 35). Ainsi, afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles en terme de représentation de la marée, il a été choisi de propager la marée uniquement sur les rangs 2 et 3. Cependant, la faible emprise du modèle aux rangs 2 et 3 implique une mauvaise prise en compte des ondes de tempête. En effet, les phénomènes dus à la météorologie sont très fortement liés aux circulations induites au large. Les rangs 0 et 1 sont donc indispensables pour la représentation des ondes de tempête.

Il est possible avec le code Mars d'imposer comme conditions limites à la fois la marée et les effets météorologiques calculés par le rang précédent (Romieu *et al.* 2007). Cette méthode a été adaptée au cas de Mayotte, ce qui permet de reproduire la marée à partir du rang 2, tout en prenant en compte les ondes de tempête créées par les rangs 0 et 1 (Illustration 37).

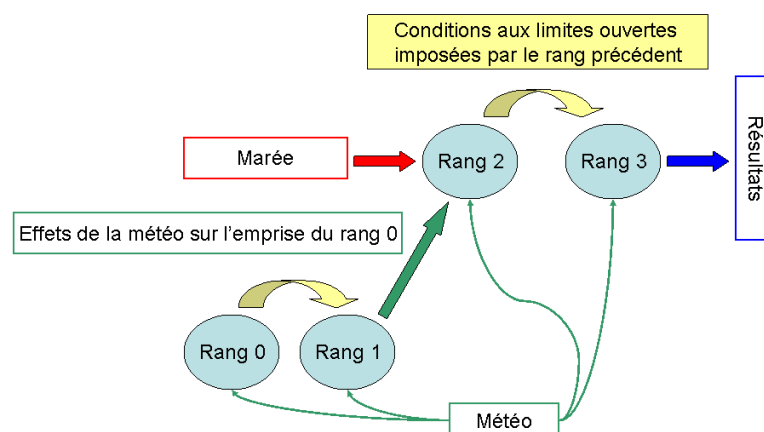


Illustration 37- Méthode d'emboîtement des quatre rangs pour le modèle de Mayotte

Les premiers tests ont confirmé l'apport de cette méthode : les erreurs de reproduction de la marée sont fortement réduites grâce à cette méthode et les oscillations numériques sont réduites (Illustration 38). C'est donc cette méthodologie qui est appliquée pour le projet.

	Oscillations numériques aux rangs 2 et 3	Erreur maximale (m)	Erreur RMS (m)
marée->R0->R1->R2->R3	Fortes et régulières	0,38	0,14
marée->R1->R2->R3	Moyennes et régulières	0,33	0,11
marée->R2->R3	Très faibles et rares	0,24	0,08
marée->R3	Très faibles et rares	0,24	0,08

Illustration 38 - Ecart entre les résultats de marée du rang 3 du modèle et les prédictions SHOM à Dzaoudzi pour la période du 5 au 20 novembre 2007.

4.3.4. Forçage en marée à la limite ouverte

Les constantes de marée utilisées sont les données FES2004 du Legos¹² (Lyard, 2006). Ces données comprennent 14 composantes harmoniques (K1, K2, M2, M4, Mf, Mm, Msqm, Mtm, N2, 2N2, O1, P1, Q1 et S2) qui permettent de recomposer la marée avec une précision centimétrique en plein océan et décimétrique en zones côtières. Les harmoniques prépondérantes dans la zone de Mayotte sont les ondes M2 et S2 (Illustration 39), des ondes semi-dirunes de périodes respectives 0,5175 et 0,5 jour.

Harmonique	Période (jour)	Amplitude (m)
K1	0,9973	0,20
K2	0,4986	0,15
M2	0,5175	1,00
M4	0,2588	0,00
Mf	13,66	0,02
Mm	27,5546	0,01
Msqm	7,0958	0,00
Mtm	9,1329	0,00
N2	0,5274	0,20
2N2	0,5363	0,02
O1	1,0758	0,12
P1	1,0027	0,07
Q1	1,1195	0,03
S2	0,5	0,60

Illustration 39 - Amplitudes maximales des composantes de marée de la base de données FES2004 sur le domaine du rang 0 du modèle.

La cote de surface libre calculée en composant la marée à partir de ces composantes donne un signal qui oscille autour du niveau moyen de la mer. Or la bathymétrie calculée est exprimée par rapport au zéro hydrographique. La mise en place du modèle a donc nécessité le choix d'un niveau moyen de la mer par rapport au zéro

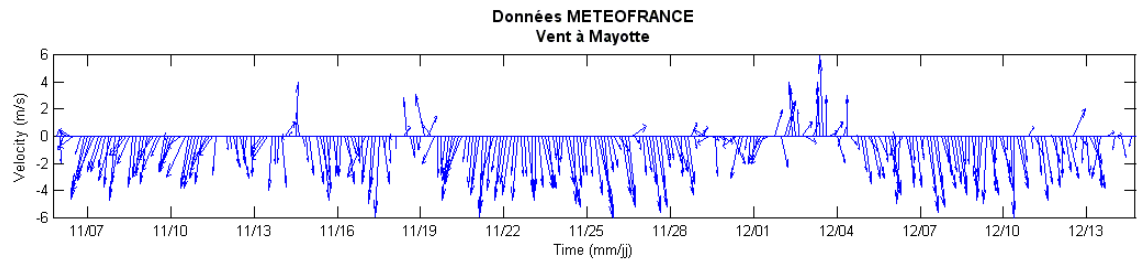
¹² Legos : Laboratoire d'Etudes en Géophysique et Océanographie Spatiale, Toulouse.

hydrographique. Après consultation des niveaux moyens observés depuis plusieurs décennies dans le canal du Mozambique (<http://www.gloss-sealevel.org/>), le niveau moyen a été établi à 2 m pour la modélisation.

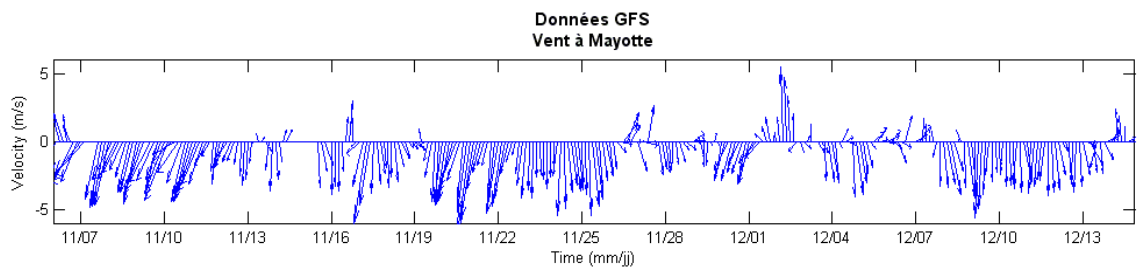
4.3.5. Forçage météorologique

La prise en compte des effets météorologiques induits par le vent et la pression nécessite une connaissance spatiale des conditions de vent et de pression pendant les périodes de simulation. Les données du Global forecast system (GFS) produites par la NOAA ont été utilisées. Elles fournissent les champs de vitesse du vent à 10m et de pression atmosphérique au niveau de la mer toutes les 3h sur une grille de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (<http://www.emc.ncep.noaa.gov/>).

Les données pour le point du modèle le plus proche de Mayotte (13°S , 45°E ; à 35km de Dzaoudzi) sont comparées aux données horaires de Météo France à l'aéroport de Dzaoudzi pour la période du 6 novembre au 14 décembre 2007. Les écarts sont relativement élevés (1m/s d'écart absolu moyen, soit un écart relatif de 50%), mais une comparaison visuelle permet de valider qualitativement les données de vent du modèle pour la période considérée (Illustration 40). En effet, les périodes de vent de N-NE ou de N-NW sont bien représentées, de même que les périodes de vent plus faible ou de vent du Sud.



(a)



(b)

Illustration 40 - Conditions de vent pour la période du 6 novembre au 24 décembre : (a) données Météo France à Dzaoudzi ; (b) données GFS à 35 km de Dzaoudzi au point (13°S , 45°E)

4.4. CALIBRATION DU MODELE

Les premiers tests effectués sur le modèle ont amené à mettre en place la technique de modélisation suivante, afin de reproduire au mieux à la fois les ondes de tempêtes et les ondes de marées (§ 4.3.3) :

- Même s'ils calculent aussi les ondes de marées, les rangs R0 et R1 sont principalement utilisés pour calculer les ondes de tempêtes aux frontières du rang R2
- les deux derniers rangs (R2 et R3) sont utilisés pour propager ces ondes de tempêtes et calculer la marée.

Une fois les emprises définies et les bathymétries calculées, la mise en place du modèle nécessite alors un calage fin des paramètres numériques. Pour caler ces paramètres numériques, nous travaillons sur le cas sans vent, où seule la marée est prise en compte.

4.4.1. Calibration de chaque rang

Dans un premier temps, les quatre rangs utilisés indépendamment les uns des autres, ont été calibrés de telle sorte qu'ils reproduisent au mieux la marée prédite par le SHOM à Dzaoudzi pour la période de novembre – décembre 2007 ainsi que le signal de marée extrait des instruments qui ont été posés lors de la campagne de mesure en novembre et décembre 2007.

a) Choix des pas de temps de calcul

Le pas de temps de calcul est un paramètre primordial pour la stabilité du calcul et pour la qualité des résultats. Dans le code de Mars, ce pas de temps est compris entre une valeur minimale (dtmin) et une valeur maximale (dtmax) déterminée par l'utilisateur. Le code fait ensuite en sorte de choisir, dans cette fourchette, le pas de temps tel que la condition de stabilité numérique (dite condition CFL) soit respectée :

$$u \frac{dt}{dx} \leq C ; \text{ avec } u \text{ vitesse calculée en une maille (en m/s), } dt \text{ pas de temps (en s), } dx$$

pas d'espace (en m) et C nombre de Courant, maximal autorisé, souvent choisi entre 0.5 et 1. Afin d'éviter tout problème numérique, un pas de temps minimal a pu être déterminé pour chaque rang, en fonction du pas d'espace du rang considéré, de sorte que le modèle reste stable malgré de fortes vitesses calculées. Des tests de sensibilités ont aussi été effectués pour ajuster le pas de temps dtmax.

	Rang 0	Rang 1	Rang 2	Rang 3
dtmax (s)	600	300	120	60
dtmin (s)	600	100	10	10

Illustration 41 - Choix des paramètres dtmin et dtmax du modèle Mars-2D pour les quatre rangs de la configuration

b) choix des paramètres de frottement au fond

Pour prendre en compte le frottement au fond, le code Mars-2D fait usage de la paramétrisation de Strickler (plus le coefficient est grand, moins il y a de frottement sur le fond) de la forme :

$$St = 18 \cdot h^{-1/6} \cdot \log\left(12 \cdot \frac{h}{ks}\right)$$

Avec St coefficient de Strickler ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$), ks coefficient de rugosité du sédiment, h la hauteur d'eau (m).

Ce coefficient de Strickler est un paramètre utilisateur qui peut être choisi comme étant homogène sur toute la zone ou comme étant variable dans l'espace. Des premiers tests effectués avec des coefficients de Strickler homogènes (30, 35 et $40 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$) ont fait apparaître des vitesses calculées trop faibles par rapport aux observations. Afin de représenter la configuration particulière du lagon de Mayotte, un frottement différent a été appliqué selon que le point se trouvait sur un récif (zone de fort frottement) ou en dehors d'un récif (zone de plus faible frottement). Ce coefficient variable est utilisé aux rangs 2 et 3 du modèle. En reprenant la littérature des écoulements de faible profondeur sur une végétation basse, ce qui est comparable au cas des récifs, un coefficient de Strickler égal à $20 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ a été imposé sur les récifs, alors qu'il a été imposé à $35 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ ailleurs (Chow, 1959). Les résultats restent inchangés en termes de hauteur d'eau mais sont améliorés en termes de vitesse grâce à ce coefficient de frottement variable (Illustration 42).

Strickler ($\text{m}^{1/3}/\text{s}$)	Hauteur d'eau		Vitesse	
	Erreur RMS (m)	Erreur max (m)	Erreur RMS (m/s)	Erreur max (m/s)
30	0.07	0.12	0.29	0.6
35	0.07	0.12	0.29	0.6
40	0.07	0.12	0.30	0.62
Inhomogène 20/35	0.07	0.13	0.26	0.58

Illustration 42 - Erreurs sur les vitesses et les hauteurs d'eau calculées par le modèle au rang 3 au point du capteur adcp4b pour la période du 9 au 13 novembre 2007, sans prise en compte de la météorologie.

4.4.2. Choix final des paramètres

L'illustration 43 rassemble les différents paramètres choisis pour chacun des quatre rangs du modèle. f_{visc} est le paramètre de viscosité du modèle. Il permet de prendre en compte la viscosité turbulente.

Rang	Résolution spatiale (m)	dtmin (s)	dtmax (s)	f_{visc}	Strickler ($\text{m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$)
R0	6800	600	600	5	35
R1	1850	100	300	5	35
R2	444	10	120	5	20/35
R3	133	10	60	5	20/35

Illustration 43 - Paramètres numériques de Mars-2D choisis pour le modèle courantologique de Mayotte.

5. Validation du modèle

5.1. DONNEES DE VALIDATION ET METHODOLOGIE

La calibration du modèle, décrite précédemment, s'est faite à partir de différentes données et avait pour but de choisir les paramètres du modèle afin d'avoir la meilleure qualité possible en termes de courant et de hauteur d'eau.

Une fois le modèle calibré, l'étape de validation a pour but de confronter les résultats du modèle à un jeu de données complet et de présenter objectivement les erreurs commises par le modèle. Le jeu de données de validation utilisé est l'ensemble des données des capteurs posés lors de la campagne de mesure de novembre – décembre 2007 dans le lagon de Mayotte. Le modèle a calculé pour cette même période les hauteurs d'eau et vitesses aux points de chaque capteur. Les données des capteurs sont ensuite confrontées aux résultats du dernier rang du modèle (rang 3). Cette confrontation se fait soit sous forme graphique pour visualiser les écarts entre données et modèle au cours du temps, soit sous forme statistique en calculant les erreurs commises par le modèle lors du calcul de la hauteur d'eau ou de la vitesse en un point (Annexe 4).

La période de validation est choisie commune à tous les capteurs, du 9 novembre au 11 décembre 2007. Le traitement des données brutes des capteurs a permis d'obtenir une valeur pour la hauteur d'eau (tous les capteurs) et pour la vitesse (capteurs 1b, 4b, 6b, 7b et 9), et ce, toutes les dix minutes. En raison de la taille des mailles (133 m pour le rang 3), la bathymétrie utilisée dans le modèle n'étant pas exactement égale à la bathymétrie du point de mouillage, seules les cotes de surface libre par rapport au niveau moyen du point de mesures peuvent être comparées entre modèle et observations. Les écarts entre modèle et mesures peuvent donc être calculées toutes les dix minutes. Les points de validation sont les points de positionnement des capteurs dans le lagon (cf. chapitre 3).

Afin d'avoir une vue précise des limites du modèle, la validation a été décomposée en trois étapes :

- capacité du modèle à reproduire la cote de surface libre et les courants induits par la marée (hydrodynamique tidale). Pour cela le modèle a tourné en composant la marée mais sans forçage météorologique. Les résultats au rang 3 sont ensuite confrontés aux données des capteurs après traitement par le logiciel T-Tide pour extraire le signal de marée (cf. chapitre 3).
- capacité du modèle à reproduire la surcote induite par la météorologie. Le modèle a tourné en composant la marée et en prenant en compte ou non le forçage météorologique (vent et pression), la différence des deux simulations fournissant l'effet du vent et de la pression calculé par le modèle (surcotes). Cette différence est comparée au signal résiduel des capteurs après traitement

par le logiciel T-Tide, ce signal correspondant à la partie des mesures qui n'est en théorie pas liée à la marée (cf. chapitre 3).

- validation complète du modèle pour sa capacité à calculer l'hydrodynamique totale. Les résultats du modèle ayant tourné en composant la marée et en prenant en compte le forçage météorologique sont comparés aux données totales des capteurs.

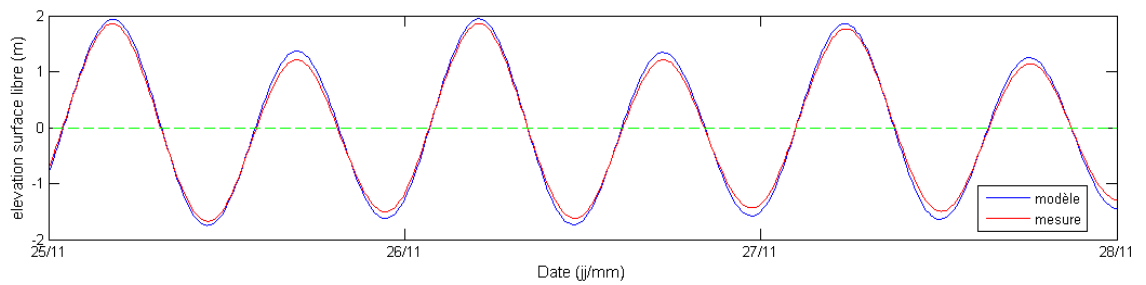
5.2. HYDRODYNAMIQUE TIDALE

Cette partie a pour but de valider la représentation par le modèle de la marée dans le lagon de Mayotte. Pour cela, les données des capteurs ont été traitées par T-Tide afin d'extraire le signal dû à la marée (cf. chapitre 3). Ces données servent à valider les résultats du modèle en chacun des points des capteurs. Les visualisations se font autour du 25 novembre, période où les mesures brutes sont les plus proches du signal de marée obtenu par analyse T-Tide. Les erreurs sont évaluées pour l'ensemble de la campagne (du 9 novembre au 11 décembre 2007).

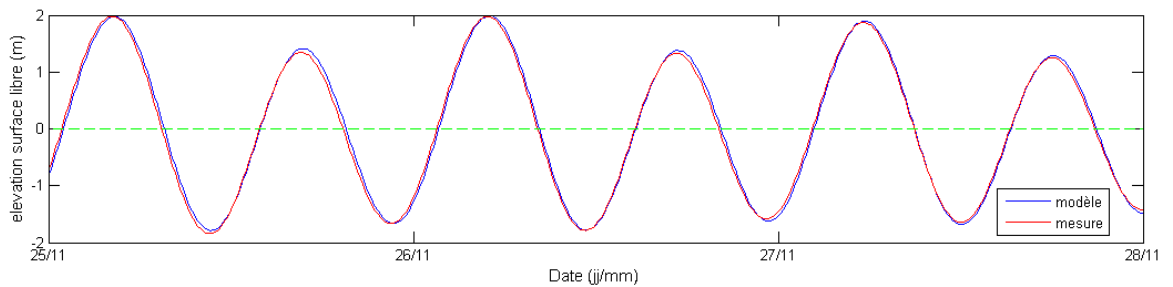
5.2.1. Hauteur d'eau

Les variations temporelles de hauteur d'eau dues à la marée sont extraites des observations des sept capteurs de la campagne de mesure qui ont données des mesures valides. En chacun des points correspondant à ces capteurs, le modèle donne accès à cette même grandeur physique calculée. Les résultats du modèle montrent une très bonne représentation des oscillations semi-diurnes de la cote de surface libre et une bonne représentation des variations d'amplitude des marées (Illustration 44) pour l'ensemble des capteurs autour de Mayotte.

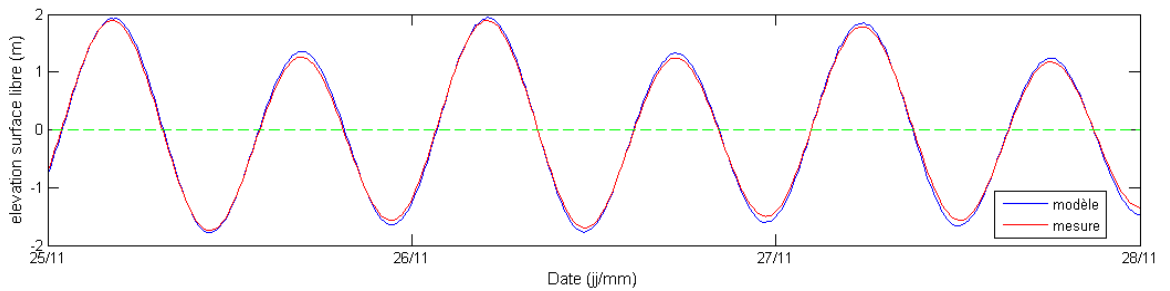
Les erreurs quadratiques moyennes restent inférieures à 10 cm (Illustration 45). Ces erreurs sont faibles en comparaison du marnage observé qui varie temporellement entre 1,4 et 3,8 m pendant la campagne de mesure. D'autre part les erreurs sont centrées sur 0 et suivent une distribution gaussienne (Illustration 46). Ceci montre que les erreurs commises suivent une loi statistique classique et sans biais, ce qui permet de facilement représenter la précision des résultats par un seul indicateur d'étalement des erreurs : l'erreur RMS. L'information d'erreur maximale est également intéressante pour rappeler la marge d'erreur maximale à un instant donné lors de la prédiction de la hauteur d'eau.



(a)



(b)



(c)

Illustration 44 - Niveau d'eau : modèle et mesures traitées, (a) capteur 4b ; (b) capteur 7b ; (c) capteur 5

Capteur	Erreur rms (m)	Erreur max (m)
1b	0,097	0,26
7b	0,078	0,21
9	0,073	0,19
4b	0,087	0,23
2	0,073	0,20
4	0,077	0,19
5	0,071	0,20

Illustration 45 - Synthèse des erreurs du modèle sur les cotes de surface libre aux différents points d'observation (période du 9 novembre au 11 décembre 2007)

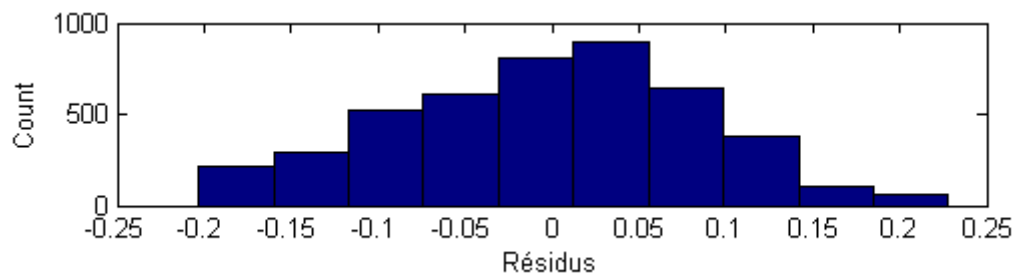


Illustration 46 - Distribution des erreurs modèle/mesure sur la cote de surface pour l'ensemble de la campagne, capteur 4b.

5.2.2. Courants de marée

La reproduction par le modèle des courants observés est très variable en qualité selon les zones du lagon (i.e. de la position des capteurs).

a) Les passes

Aux positions des trois capteurs positionnés dans les passes, le modèle reproduit bien la forte chenalisation des courants (Illustration 48).

La forte intensité des courants observée dans les larges passes (~2 km de large, passe Sud Est) est relativement bien représentés par le modèle. La phase est moins bien représentée, avec un déphasage maximal avec la mesure de l'ordre de l'heure dans ces larges passes (Illustration 48). Par contre, dans des passes plus étroites (400-500m, passe en S), la phase des courants est mieux représentée (Illustration 49a). Cependant, l'intensité calculée reste toujours inférieure aux mesures (Illustration 49a). Cette sous estimation des vitesses, ainsi que les écarts de phases, peut venir à nouveau de la résolution du modèle, la passe y étant représentée uniquement par quelques mailles de calcul (taille de maille du modèle : 133 m). Les fortes pentes bathymétriques à l'extérieur du lagon pourraient être responsables des quelques instabilités numériques observées (Illustration 49b).

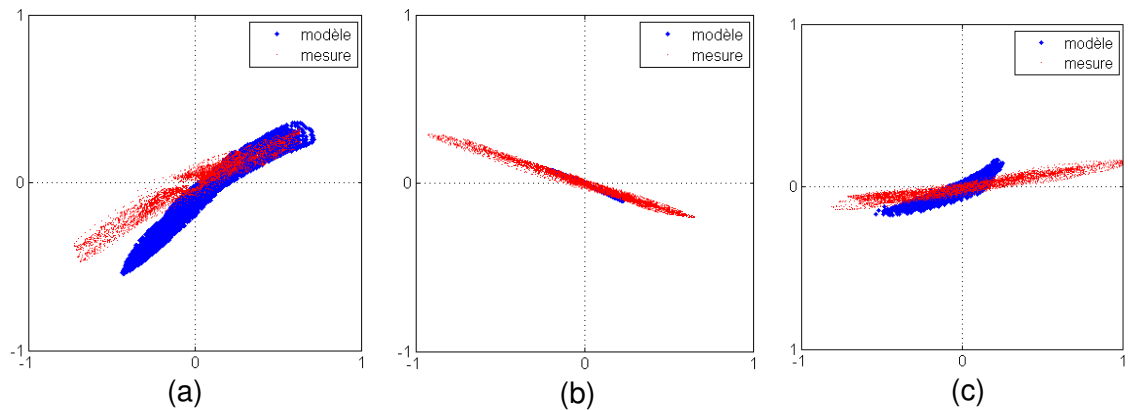


Illustration 47 - Rose des courants de marée (v en fonction de u , en m/s) mesurés et calculés pour l'ensemble de la campagne de mesure : (a) capteur 4b ; (b) capteur 9 ; (c) capteur 1b

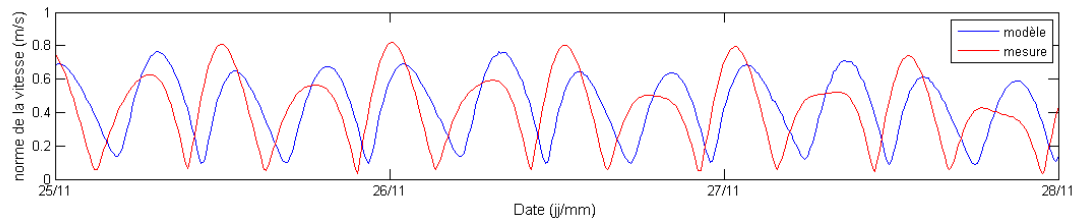
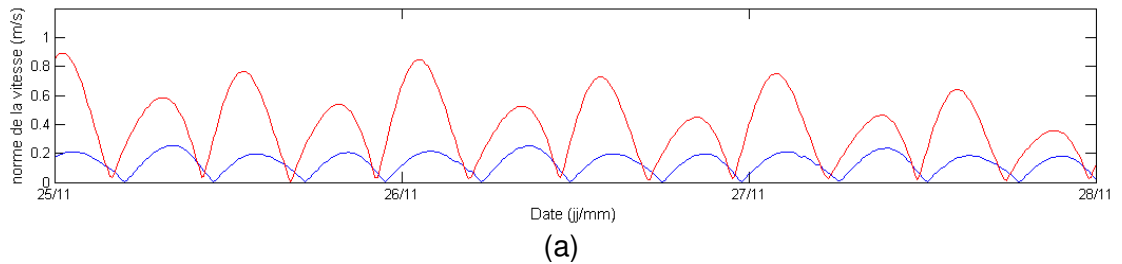
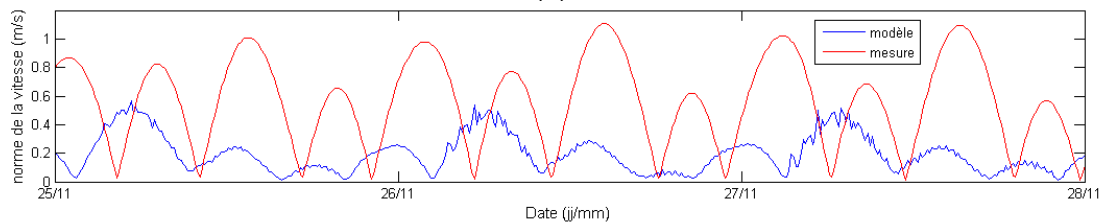


Illustration 48 - Intensité des courants de marée 2DH dans une passe large : modèle (en bleu) et mesures traitées (en rouge), capteur 4b (passe Sud Est)



(a)



(b)

Illustration 49 - Intensité des courants de marée 2DH dans des passes étroites : modèle (en bleu) et mesures traitées (en rouge), (a) capteur 9 (passe en S) ; (b) capteur 1b (passe Sud Ouest)

b) L'intérieur du lagon

Comme cela a été vu dans le chapitre sur l'analyse des mesures, lorsque les courants de marées sont du même ordre de grandeur que les courants résiduels, alors le traitement T-tide est à utiliser avec précaution. Or, à l'intérieur du lagon, les courants de marées (et totaux) sont relativement faibles, avec une vitesse totale maximale de 0.2 m/s, vitesse qui est du même ordre de grandeur les courants résiduels possibles à l'intérieur du lagon. Par conséquent, l'analyse T-Tide du capteur 7b ne permet pas d'accéder au vrai courant de marée. La comparaison des résultats du modèle et de la mesure traitée ne peut donc être faite que sur les ordres de grandeurs. Le modèle reproduit bien la cyclicité semi-diurne et les mêmes ordres de grandeurs en amplitude, avec une vitesse par exemple de l'ordre de 0.1 m/s, v.s. 0.12 m/s pendant la période du 25 au 27 novembre (Illustration 50).

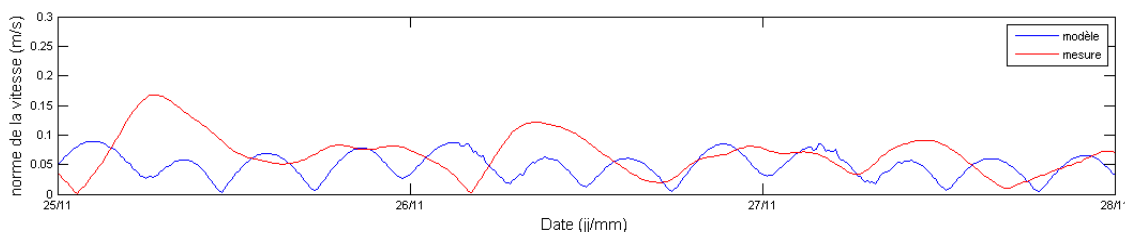


Illustration 50 - Intensité du courant de marée 2DH : modèle et mesures traitées, capteur 7b

c) Statistiques

La distribution statistique fait apparaître un biais entre modèle et mesures. Par exemple, pour le capteur 1b, le modèle a tendance à sous-évaluer les vitesses, impliquant un biais négatif (Illustration 51). La distribution des erreurs étant normale, les erreurs quantitatives peuvent être interprétées à partir de l'information de biais, d'erreur quadratique moyenne et d'erreur maximale commise (Illustration 52). Ces erreurs confortent les observations précédentes, montrant une sous-estimation des courants dans les passes étroites (capteurs 1b et 9, biais négatifs), des erreurs relatives fortes lorsque les courants mesurés sont faibles (capteur 7b) et une bonne estimation des courants au point 4b.

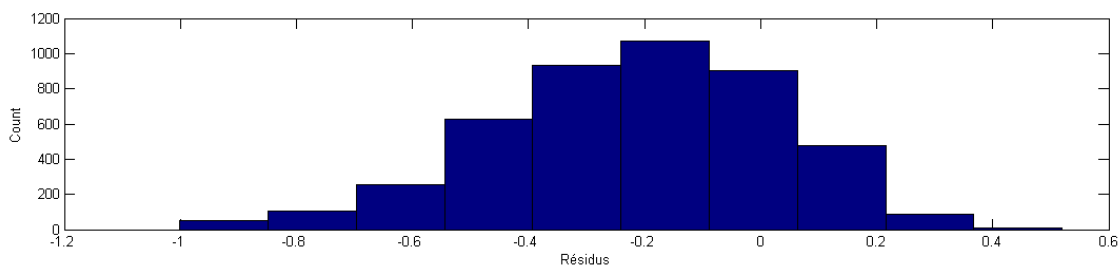


Illustration 51 - Distribution des erreurs entre modèle et mesures pour l'intensité des courants, capteur 1b.

Capteur	Biais (m/s)	Erreur rms (m/s)	Erreur max (m/s)	Vitesse maximale mesurée 2DH (m/s)
1b	-0,21	0,32	1	1,11
7b	-0,04	0,05	0,19	0,2
9	-0,20	0,27	0,81	0,9
4b	0,03	0,18	0,49	0,95

Illustration 52 - Synthèse des erreurs du modèle sur l'intensité des courants de marée aux différents points d'observation (période du 9 novembre au 11 décembre 2002)

5.3. HYDRODYNAMIQUE TOTALE

Le modèle mis en place représente la marée et les phénomènes induits dans le lagon de Mayotte de manière satisfaisante dans les zones de forts courants et permet de mettre en avant les zones plus ou moins hydrodynamiques (§ 5.2). D'autres phénomènes, comme les ondes de tempêtes dues aux conditions météorologiques, s'ajoutent aux effets de la marée dans le lagon, et la validation du modèle dans son ensemble (onde de marée et onde de tempête) peut être faite en le comparant aux observations des capteurs pour connaître les erreurs commises par un tel modèle dans des conditions réelles.

5.3.1. Reproduction de la cote de surface libre

La validation du modèle pour le calcul de la cote de surface libre peut être décomposée en deux étapes :

- Validation des surcotes : la différence entre le signal brut des capteurs – filtré des ondes courtes (vagues) - et le signal de marée extrait grâce à T-Tide permet d'avoir accès aux observations de hauteur d'eau non expliquées par la marée (signal résiduel). Ces observations servent à valider la reproduction par le modèle des phénomènes hydrodynamiques induits par la météorologie (surcote). Ces surcotes calculées par le modèle peuvent être extraites en faisant la différence entre une simulation avec forçage de marée et météo et une simulation avec forçage de marée uniquement. Ces grandeurs sont visualisées pour l'ensemble de la campagne.
- Validation de la cote de surface libre totale calculée par le modèle (onde de marée et surcote) par rapport au signal brut des capteurs. Cette validation montre la qualité du modèle pour la prédiction d'une hauteur d'eau à un instant donné en conditions réelles.

a) Surcotes

Les signaux résiduels observés pour chacun des capteurs ne peuvent prendre en compte la surcote moyenne pendant toute la campagne de mesure (cf. chapitre 3). Aussi, ici, nous comparons donc uniquement les ordres de grandeurs entre les signaux

résiduels observés et les surcotes obtenues avec le modèle. Au cours de la campagne, le signal résiduel observé varie au maximum d'environ 25 cm. Le modèle (Illustration 53), quant à lui, représente, pour chaque capteur, tout au long de la campagne une surcote variable de 0 à une quinzaine de centimètres, soit des variations maximales de 15 cm.

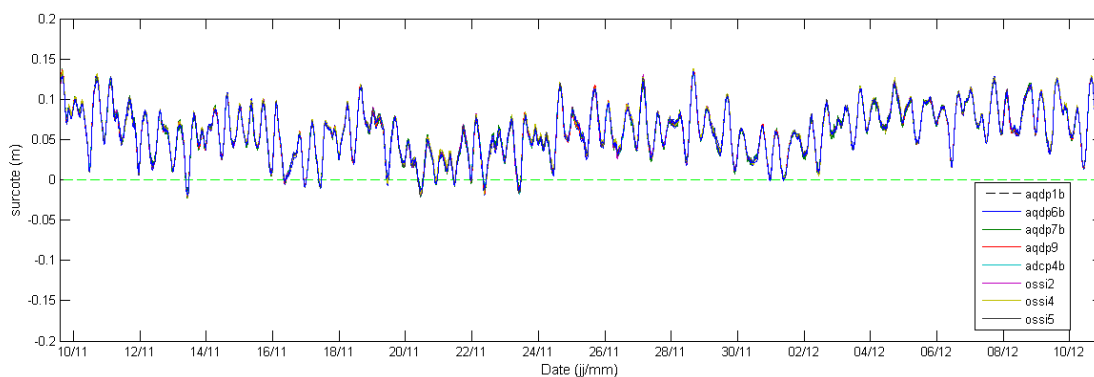


Illustration 53 - Surcotes calculées par le modèle aux différents capteurs

Outre la comparaison des ordres de grandeurs avec les capteurs, on peut noter que le modèle prévoit une surcote moyenne positive, de l'ordre de 7 cm pour tous les capteurs. Cette observation peut être utilisée pour valider un peu plus l'estimation des surcotes faite par le modèle. En effet, à partir de données marégraphiques sur une période de plusieurs années, nous avons comparé les niveaux moyens observés du 1 novembre au 15 décembre par rapport au niveau moyen annuel. Pour les données marégraphiques de Dzaoudzi fournies sur le site du Gloss (Global sea level observing system, <http://www.gloss-sealevel.org/>), le niveau moyen observé en novembre-décembre est toujours 4 à 9 cm au dessus du niveau moyen annuel pour les années de 1986 à 1995. Le modèle donne donc une surcote moyenne positive (+7 cm) tout à fait cohérente avec l'analyse des données marégraphiques.

A noter que nous n'avons pu utiliser ces données marégraphiques pour valider exactement la surcote à chaque instant pendant la campagne de mesure, car, pendant cette période, aucune donnée marégraphique n'a été acquise à Dzaoudzi.

Afin de compléter l'analyse, nous étudions les corrélations entre les surcotes fournies par le modèle et les conditions météorologiques. Les surcotes calculées par le modèle sont induites par les conditions météorologiques à l'échelle du canal du Mozambique. En supposant que les résultats du modèle GFS utilisé pour le forçage du modèle sont acceptables, ce qui est probable après confrontation aux données locales (§ 4.3.5) et aux vues de l'acceptation scientifique de ce modèle (Seo *et al* 2005), il est possible d'analyser les résultats du modèle à partir des données GFS. L'analyse des résultats demande une connaissance des conditions de vent et de pression sur l'ensemble de la zone pour la période de la campagne de mesure. Les données de pression montrent une faible variabilité temporelle de la pression dans le canal du Mozambique (entre 1010 et 1017 hPa), et quelques centres anticycloniques passant au sud de la zone (plus de 1020hPa).

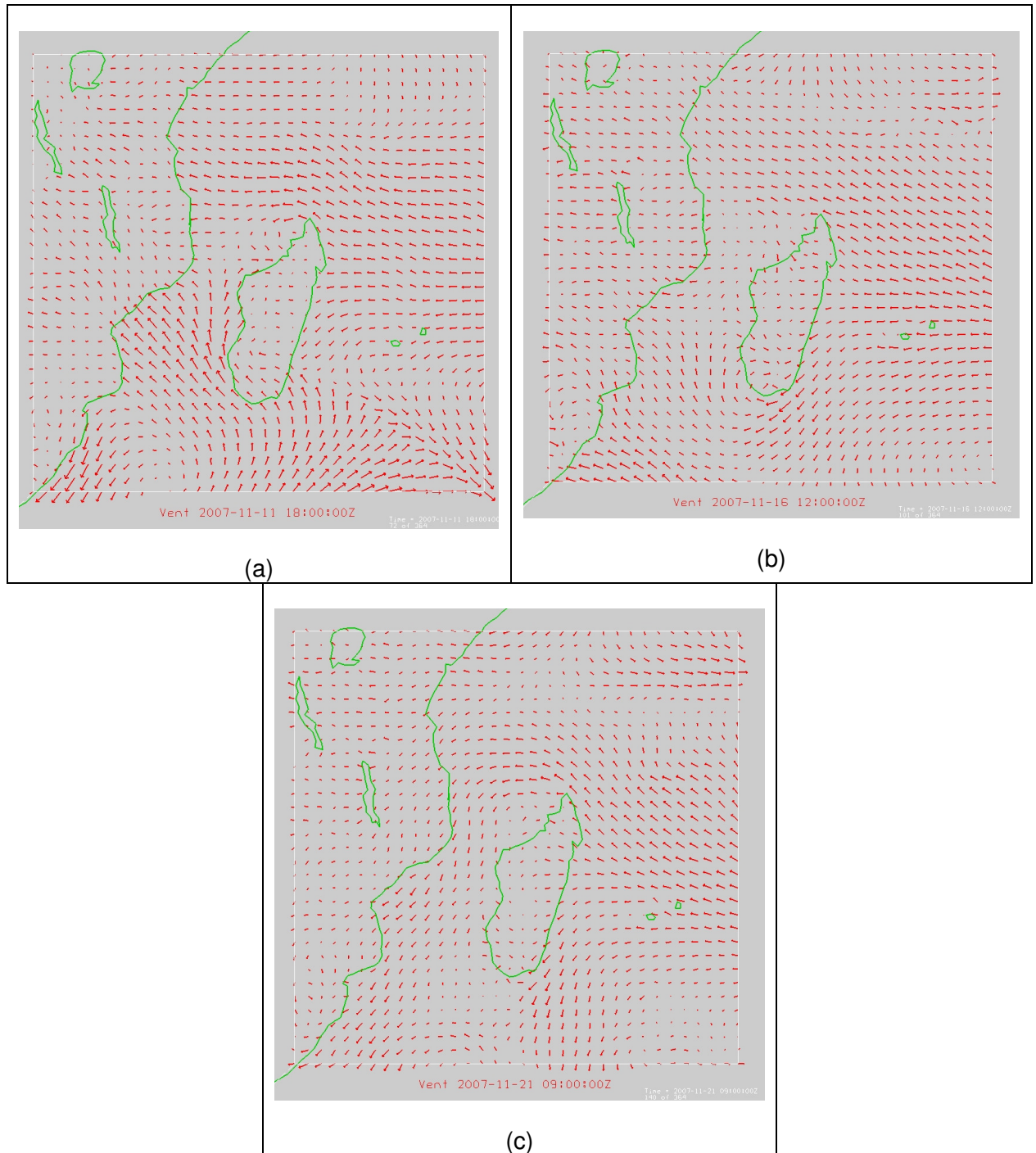


Illustration 54 - Conditions de vent au rang 0 du modèle pour trois instants représentatifs de trois période (données GFS) : (a) Période de rencontre de vents du Nord et du Sud dans le canal du Mozambique – 11/11/2007 à 18h UT ; (b) période de vent calme – 16/11/2007 à 12h UT ; (c) période de vent du Nord modéré dans le canal – 21/11/2007 à 9h UT

Les données de vent font apparaître différentes configurations générales (Illustration 54). Les périodes où la surcote calculée est maximale correspondent à des périodes où des vents de secteur Nord et Sud se rejoignent dans le canal du Mozambique - du 25 au 28 novembre ou du 6 au 12 décembre par exemple - (Illustration 54a). La surcote calculée devient faible pour des périodes de temps calme – du 15 au 19 novembre - (Illustration 54b) ou lorsqu'un vent du Nord modéré est établi dans le canal – du 19 au 25 novembre ou du 1 au 4 décembre - (Illustration 54c). Les surcotes calculées par le modèle semblent cohérentes physiquement avec les phénomènes météorologiques de la période de la campagne (Illustration 55).

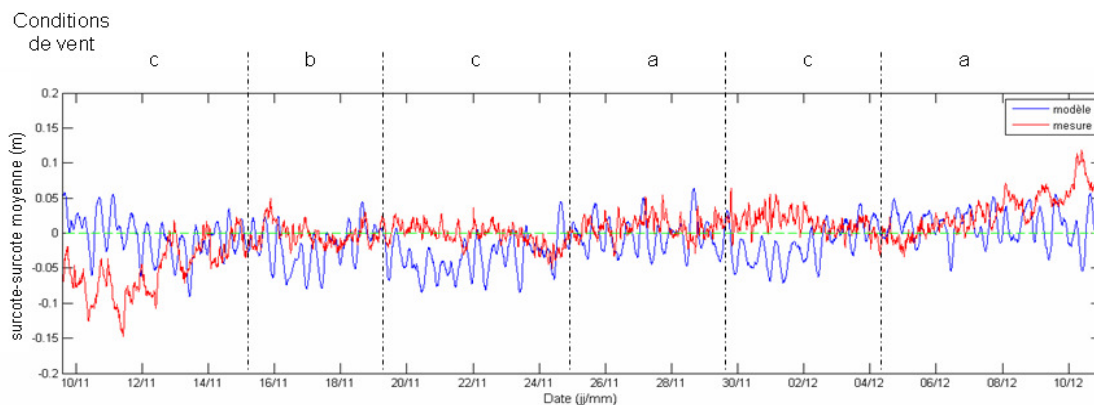


Illustration 55 - (surcotes-surcote moyenne) au capteur 5 et analyse qualitative des conditions de vent sur la période (configurations a,b,c de Illustration 54)

Sur la base des trois comparaisons effectuées (signal résiduel observé, données marégraphiques, corrélations météorologiques), et sachant que la fiabilité du modèle MARS pour évaluer les ondes de tempête a été déjà confirmée (Idier, 2007), on peut donc en déduire que le modèle mis en place reproduit relativement correctement, au moins, en termes de tendance et d'ordre de grandeurs, les ondes de tempête, et donc les surcotes.

b) Cote de surface libre

La marée dans le lagon est bien reproduite en termes de cote de surface libre (§ 5.2.1). Les tendances de surcotes (sur la durée de la campagne) calculées par le modèle ont également été validées.

L'Illustration 56 permet de visualiser la capacité du modèle à reproduire la hauteur d'eau due à la fois à la marée et à la fois aux ondes de tempête à un instant donné en conditions réelles. Les comparaisons montrent effectivement une bonne représentation de l'évolution des hauteurs d'eau en différents points du lagon au cours du temps (Illustration 56). Les cotes de surfaces libres sont prédites tout autour du lagon par le modèle, avec des erreurs moyennes inférieures à 10 cm (Illustration 57).

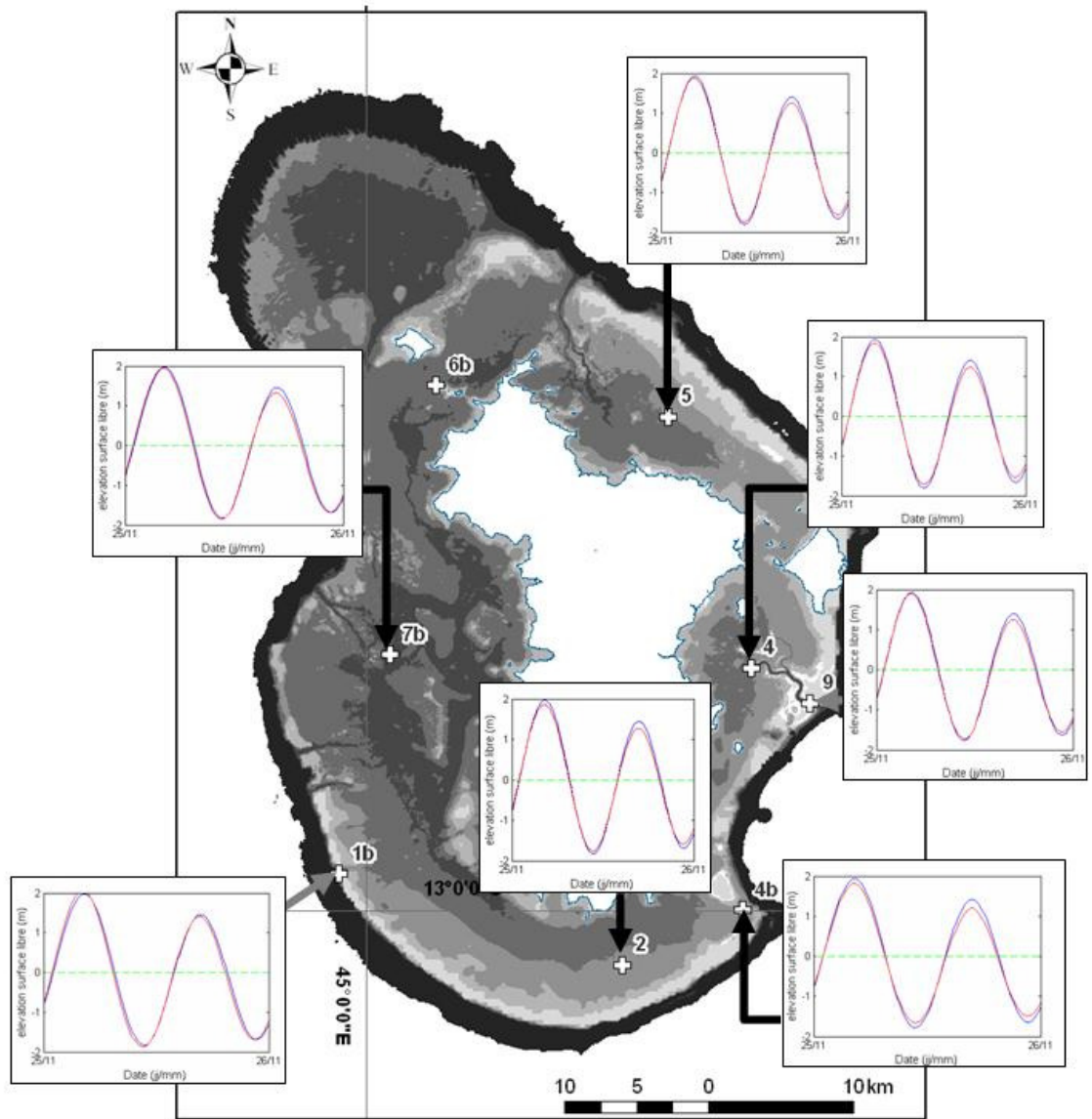


Illustration 56 - Comparaison de cote de surface libre entre modèle et mesures du 25 au 28 novembre pour tous les points d'observation dans le lagon

	Capteur						
	1b	2	4	4b	5	7b	9
Erreur rms (m)	0,11	0,08	0,09	0,10	0,08	0,09	0,9

Illustration 57 – Ecart rms entre : (1) le modèle et (2) les niveaux d'eaux observés auxquels les niveaux moyens pendant la période de campagne ont été soustraits.

N.B. : afin de prédire la hauteur d'eau totale en un point du lagon, il convient de rajouter à la cote de surface libre calculée la bathymétrie du point et le niveau moyen de la mer dans le lagon par rapport au zéro hydrographique (mesuré à 2,03 m entre 1986 et 1995, fixé à 2 m dans le modèle).

5.3.2. Courants totaux

Nous comparons les courants totaux obtenus par modélisation avec les mesures réalisées en nov-déc 2007. Les courants induits par la marée sont plus ou moins correctement représentés par le modèle (§ 5.2.2). Cependant l'analyse des courants mesurés par les capteurs placés dans des passes (4b, 1b et 9, Illustration 58 à Illustration 60) a fait apparaître des courants non induits par la marée. Par exemple on observe plusieurs périodes où les courants ne s'inversent pas, alors qu'une « renverse » des courants induits par la marée est attendue. De plus, les courants observés dans le lagon loin des passes (capteur 7b, annexe 2) ne suivent pas une cyclicité régulière du type semi-diurne. Plusieurs phénomènes pourraient être à l'origine de courants non provoqués par la marée :

- les effets météorologiques, induits par les gradients de pression et par le vent. Les masses d'eau peuvent être entraînées par le frottement du vent à la surface de l'eau, provoquant ainsi des « courants de tempête ». Ces effets météorologiques sont pris en compte dans le modèle ;
- le déferlement de la houle provoque un courant cross-récif entrant dans le lagon, et donc une accumulation d'eau dans le lagon (Symonds *et al*, 1995). Il est possible que se crée alors dans les larges passes un courant de « vidange » dû à une accumulation d'eau dans le lagon. Ce phénomène est un sujet de recherche en lui-même et n'est pas pris en compte dans la modélisation existante pour l'hydrodynamique côtière ;
- plusieurs études d'océanographie mettent en lumière les courants thermo-halins dans l'Océan Indien, dont la conséquence la plus connue sont les courants forts (de 2 à 3 m/s) au Sud de l'Afrique sur le banc des Aiguilles. Cependant les observations dans le canal du Mozambique ne sont pas suffisantes actuellement pour évaluer exactement les courants thermo halins, et les modèles semblent donner des résultats contradictoires. Une circulation du Nord vers le Sud est prédite qualitativement dans le canal du Mozambique, mais avec une intensité relative faible (Schott and McCreary, 2001). Devant

l'absence de consensus scientifique, la modélisation entreprise ne prend pas en compte les circulations thermo halines liées à la stratification de l'océan.

Pour les capteurs dans la partie Ouest du lagon relativement ouverte au Nord (7b et 1b), les mesures montrent sur certaines périodes des courants orientés vers le Sud, sans la renverse des courants attendue sous l'effet de la marée. Ce phénomène est particulièrement visible du 18 au 25 novembre, alors qu'un vent modéré du Nord souffle de façon homogène dans le canal du Mozambique (Illustration 54c). Ce phénomène, probablement dû aux conditions de vent, est bien reproduit par le modèle (Illustration 58).

Les observations de la campagne de mesure aux capteurs 4b et 9 montrent des courants tournés majoritairement :

- vers l'extérieur du lagon pour le capteur 4b (Illustration 59) ;
- vers l'intérieur pour le capteur 9 (Illustration 60),

ce qui n'est pas prédit par le modèle. Ces deux capteurs sont dans la partie Est du lagon et sont donc dans une zone protégée des courants de secteur Nord éventuellement induits par le vent à l'extérieur du lagon. Une hypothèse est que les phénomènes observés pourraient être dus à une influence des vagues plus fortement ressentie dans ces passes. Ces dernières peuvent en effet créer des courants cross-récif au point 9 ou des courants de vidange au point 4b. Or cette influence n'est pas prise en compte par le modèle. De fait, de tels courants entrants ou sortants dans les passes ne pourraient pas être reproduits.

En conclusion, le modèle semble en mesure de représenter les courants induits par le vent. Ceux-ci ne sont pas toujours prépondérants dans certaines passes du lagon. En effet, certains phénomènes de non renverse des courants n'ont pu être expliqués par le modèle en tenant compte de la météorologie. Des explications possibles ont été exposées, leur analyse demande un travail de recherche spécifique, hors du champ de cette étude.

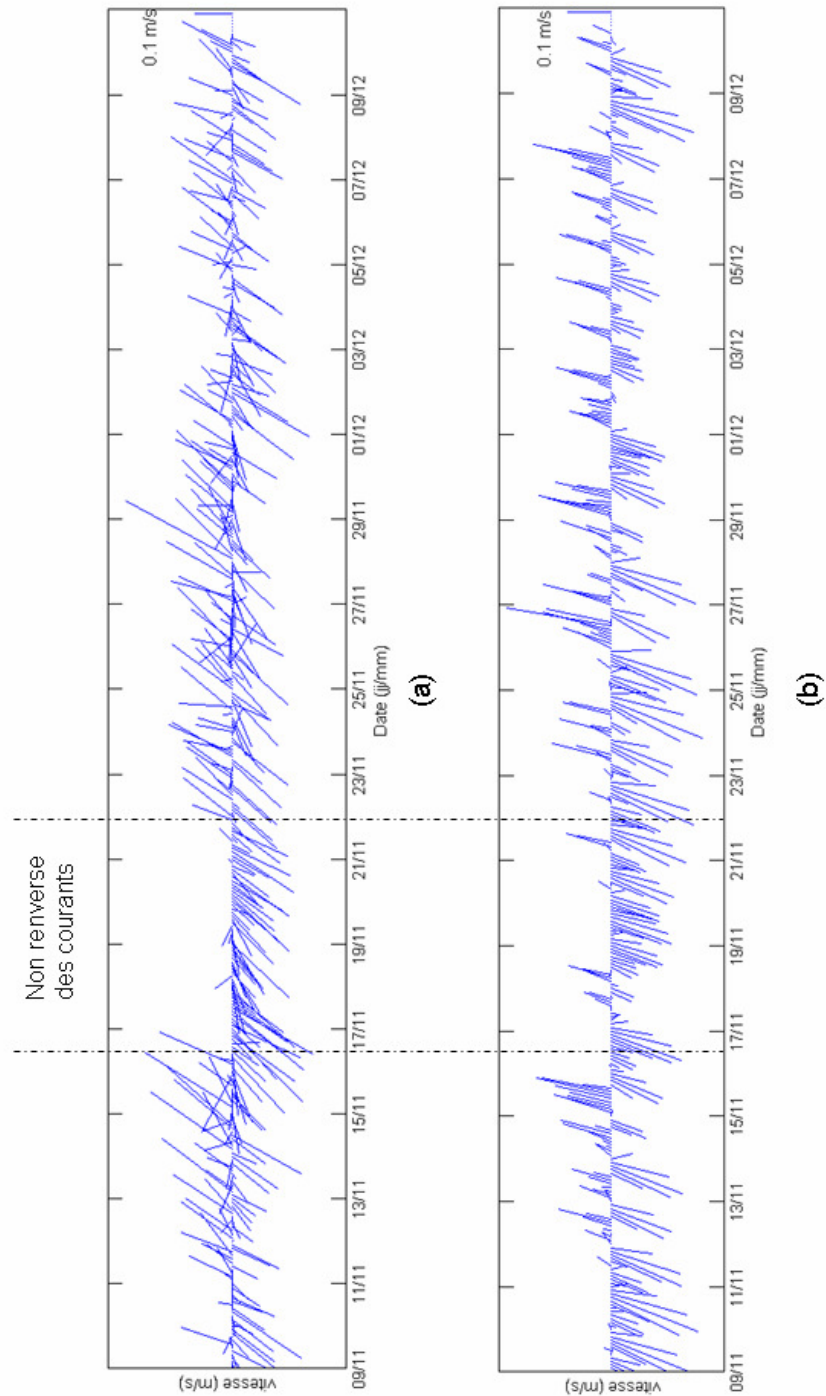


Illustration 58 - Vecteurs courant pour la période de mesure au capteur 1b : (a) mesures ; (b) modèle

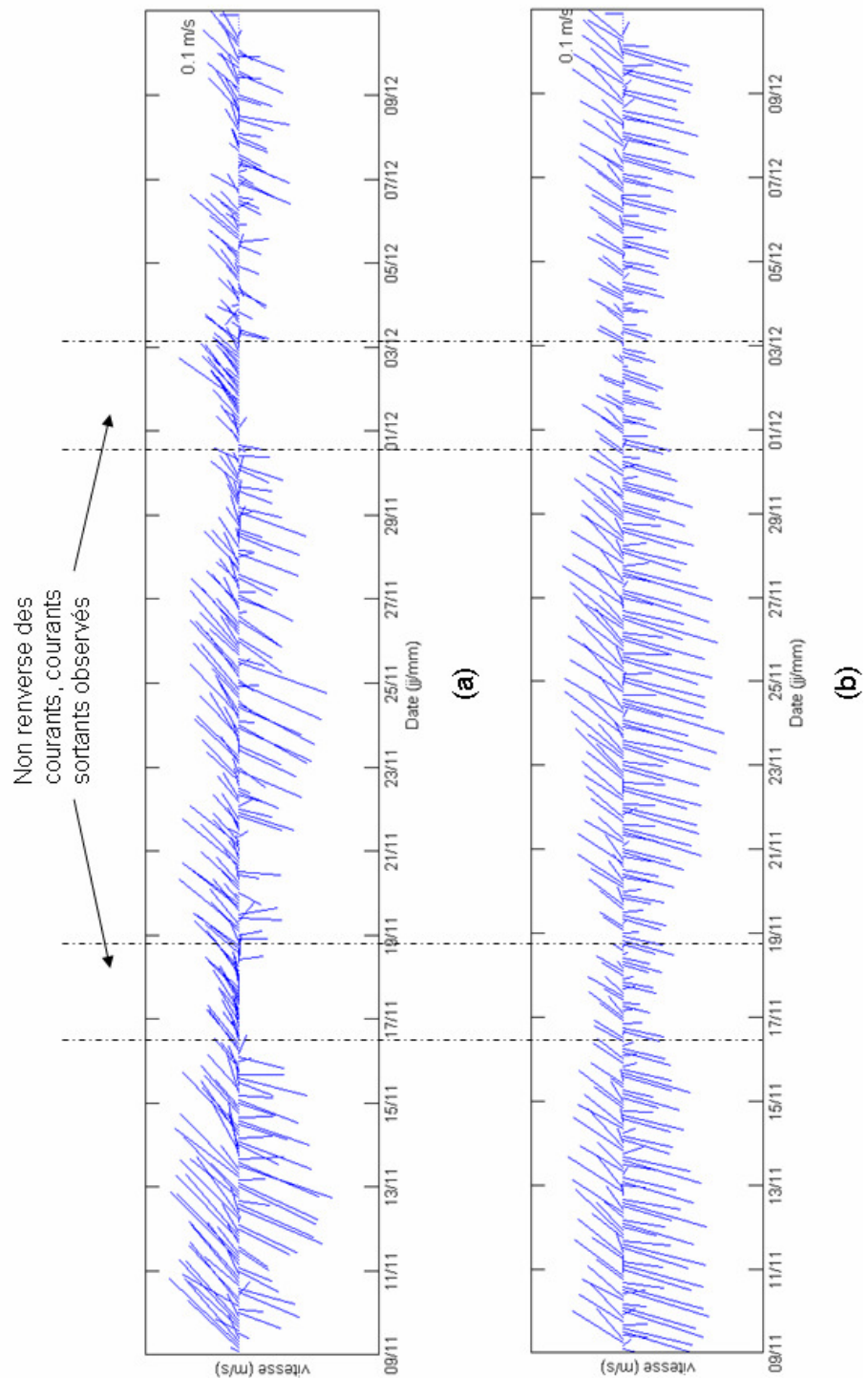


Illustration 59 - Vecteurs courant pour la période de mesure au capteur 4b : (a) mesures ; (b) modèle

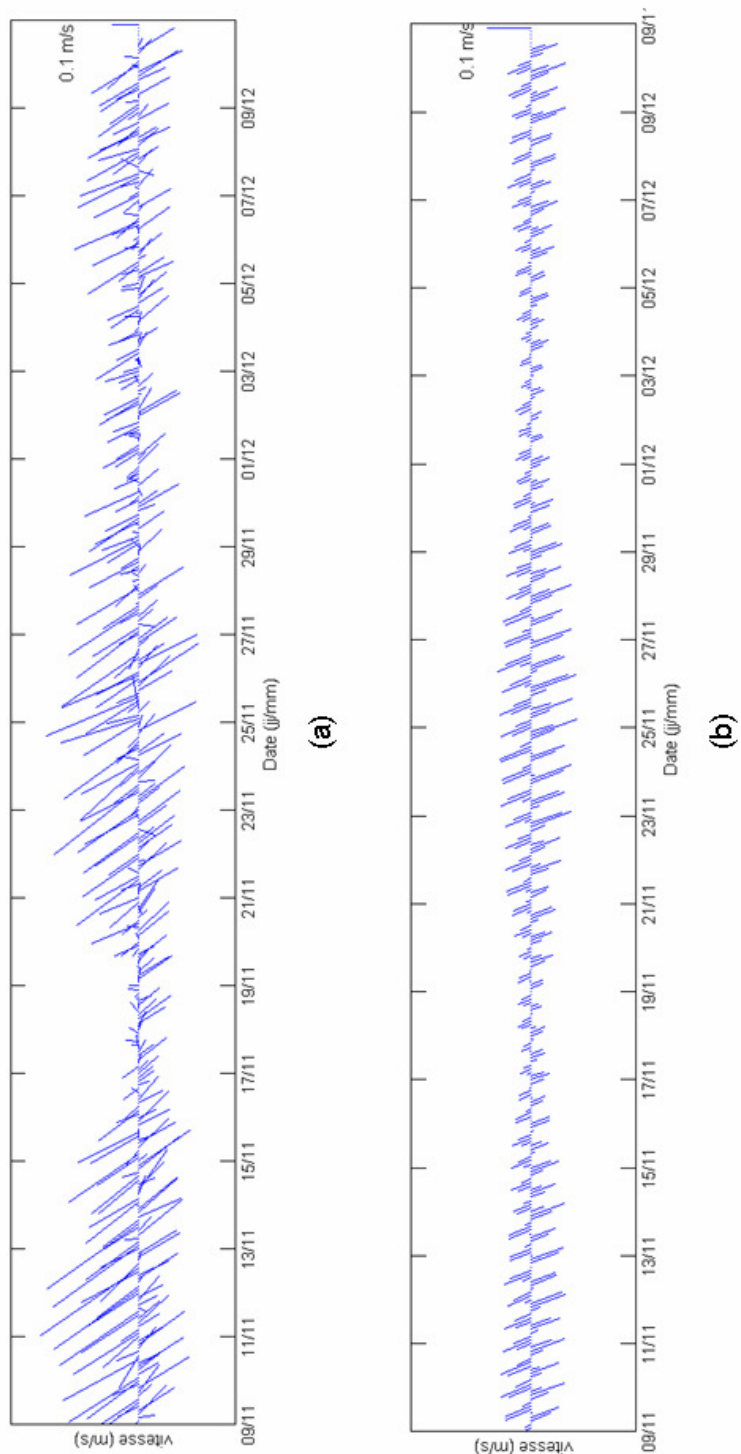


Illustration 60 - Vecteurs courant pour la période de mesure au capteur 9 : (a) mesures ; (b) modèle

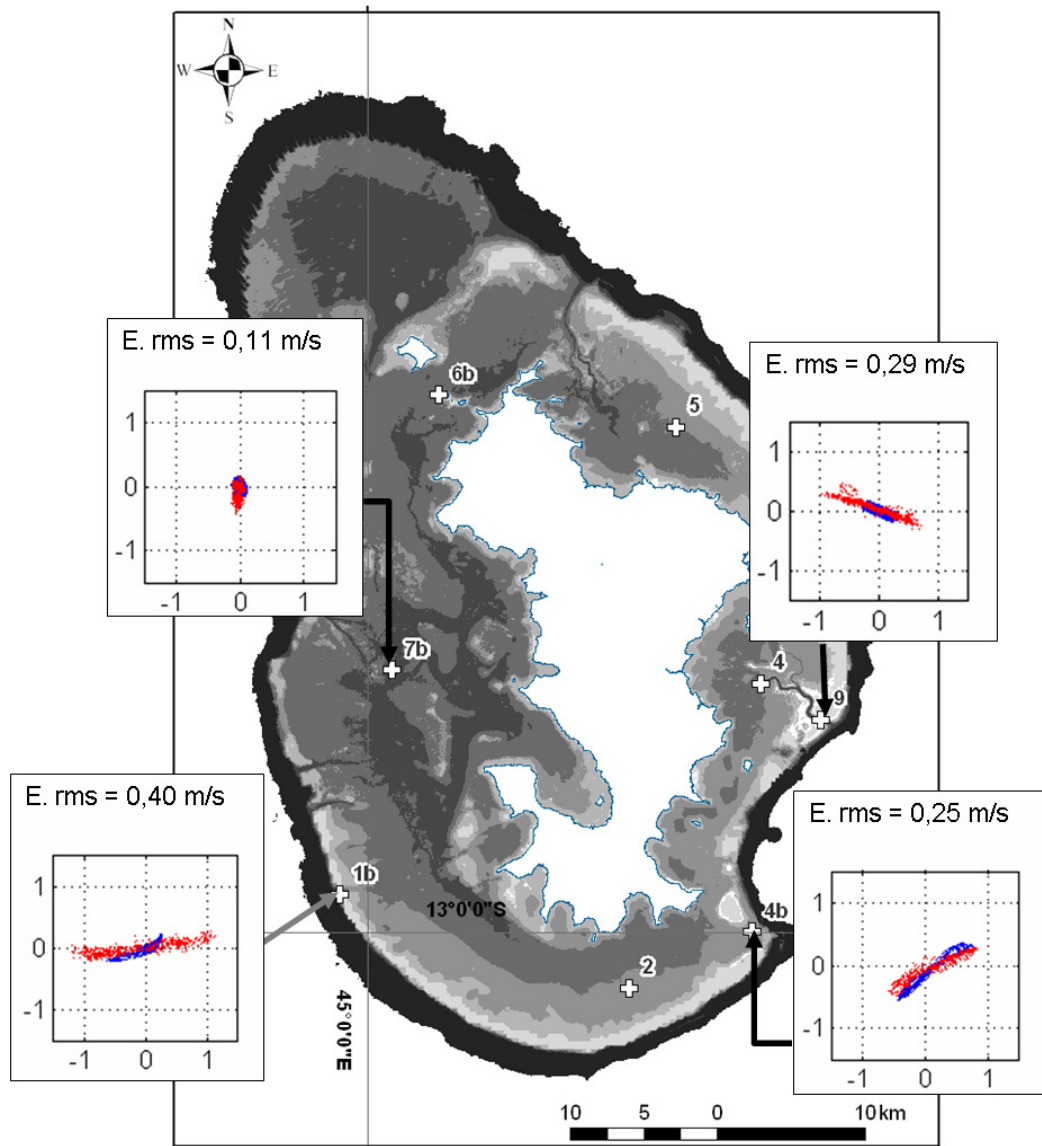


Illustration 61 - Comparaison des roses de courant mesurées (en rouge) et prédites par le modèle (en bleu) et erreurs RMS sur toute la période (du 9 novembre au 11 décembre)

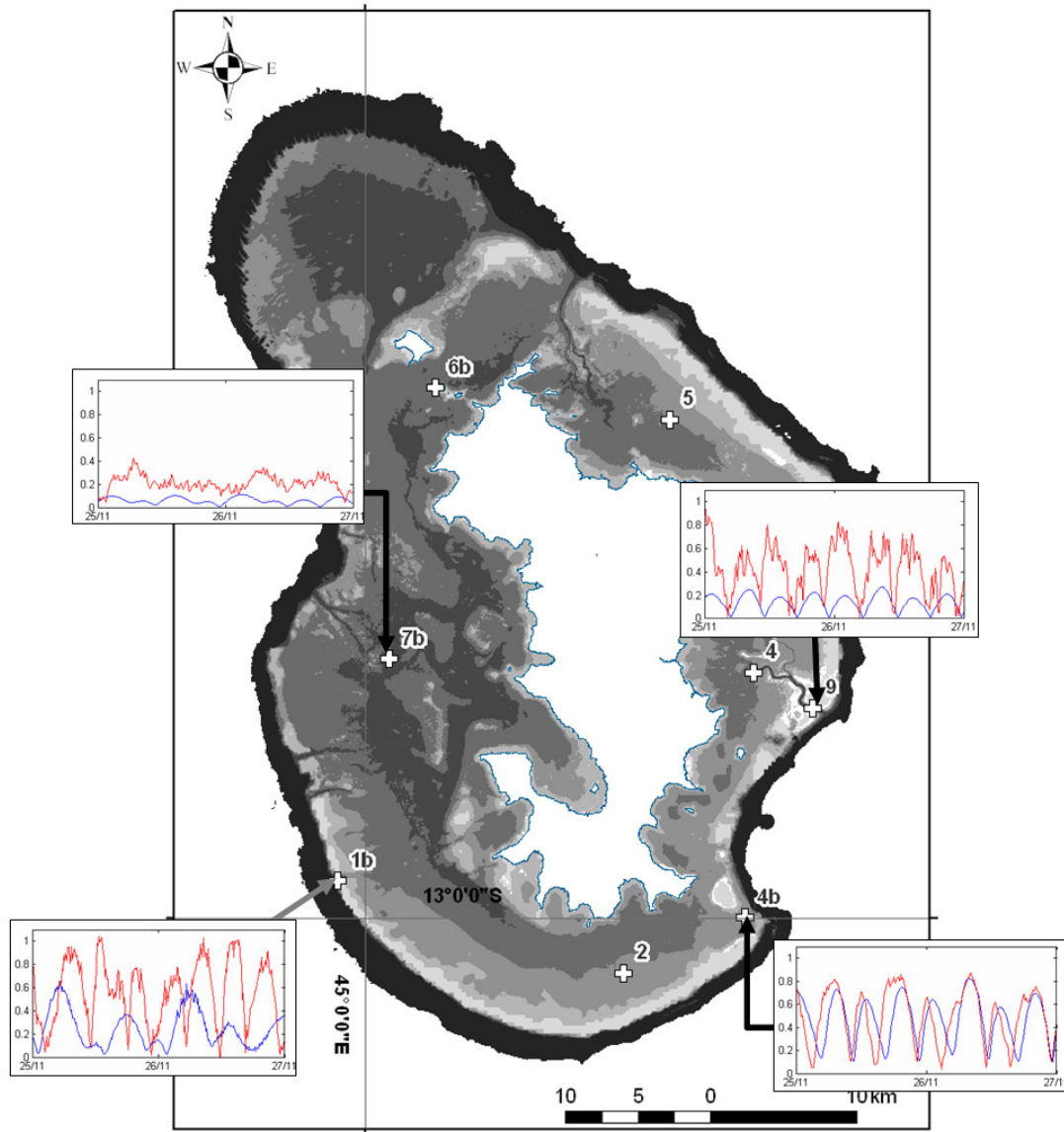


Illustration 62 - Comparaison des intensités des courants totaux entre modèle (en bleu) et mesures (en rouge) des 25 et 26 novembre pour tous les points d'observation autour du lagon

5.4. CONCLUSION SUR LA VALIDATION DU MODELE

5.4.1. Niveaux d'eau

Le modèle mis en place représente correctement les niveaux d'eau induits par la marée (§ 5.2). La validation quantitative précise des surcotes est plus difficile, par manque de données de référence (exemple : manquent les données observées au marégraphe de Dzaoudzi pendant la campagne de mesure). Malgré cela, le modèle met en évidence une période de surcote lors la campagne de mesure, ce qui semble en accord avec l'analyse statistique des observations marégraphiques lors des mois de novembre et décembre dans le lagon de Mayotte (§ 5.3).

Dans l'ensemble, la prédiction des niveaux d'eau dans le lagon a été validée et montre les bons résultats du modèle. Les cotes de surface libre sont prédites avec une erreur quadratique moyenne de l'ordre de 10 cm, ce qui est faible comparativement aux marnages observés en moyenne qui sont de l'ordre de 1,5 m (Illustration 63).

Capteur	Cote de surface libre (m)		
	Erreur RMS	Erreur max.	Marnage moyen mesuré
1b	0,11	0,30	1,54
4b	0,10	0,29	1,34
7b	0,09	0,22	1,48
9	0,09	0,24	1,40
2	0,08	0,23	1,42
4	0,09	0,26	1,38
5	0,08	0,26	1,38

Illustration 63 - Synthèse des erreurs du modèle pour la reproduction des hauteurs d'eau aux différents points d'observation

5.4.2. Courants

La comparaison des courants totaux observés et ceux calculés par le modèle fait apparaître des erreurs quantitatives relativement fortes (Illustration 64). Ainsi plusieurs réserves quant à la qualité du modèle doivent être clairement précisées :

- L'intensité des courants est parfois sous-estimée dans les passes
- La phase n'est pas toujours fidèlement reproduite par le modèle
- Certains phénomènes induits ni par la marée ni par l'effet direct du vent ne sont pas reproduits, alors qu'ils semblent importants dans certains cas (§ 5.3).

Cependant, les alternances entre flot et jusant sont correctement représentées, ainsi que la chenalisation des courants dans les passes. La comparaison qualitative avec des observations générales faites sur le lagon lors des études précédentes permettra

d'estimer si le modèle est un bon outil pour comprendre le fonctionnement général des circulations dans le lagon (Ch. 7).

	Intensité des courants (m/s)			
Capteur	Erreur RMS	Erreur max.	Moyenne des intensités mesurées	Moyenne des intensités modélisées
1b	0,40	1,16	0,45	0,17
4b	0,25	0,80	0,38	0,32
7b	0,11	0,44	0,11	0,04
9	0,30	1,06	0,32	0,09

Illustration 64 - Synthèse des erreurs du modèle pour la reproduction des intensités des courants aux différents points d'observation

6. Scenarios et résultats

6.1. DEFINITION DES SCENARIOS

Les scenarios sont définis pour les différentes conditions de marée et de vent. L'objectif de cette étude étant de représenter les différentes situations typiques du fonctionnement « habituel » des circulations dans le lagon, les cas exceptionnels liés au passage d'un cyclone (vents extrêmes) n'ont pas été pris en compte. En revanche, les vents forts, hors événements de type cyclone ou tempête tropicale, sont intégrés dans les simulations.

6.1.1. Conditions de marée

Les courants de marée connaissent des renverses entre flot et jusant et leur vitesse est d'autant plus forte que le coefficient de marée est élevé.

Il est donc prévu de réaliser les simulations sur l'ensemble d'un cycle de marée (flot et jusant) pour des marées de vives-eaux moyennes (coefficient de 95) et de mortes-eaux moyennes (coefficient de 45).

Plutôt que d'utiliser une marée fictive, les données du modèle mondial FES2004 ont servi à recomposer le signal de marée à partir des différentes composantes harmoniques locales¹³.

Des dates récentes correspondant à ces conditions sont proposées dans le tableau ci-dessous (Illustration 65).

Cycle de marée	Date début : PM*-6h (heure T.U)	Date fin : PM*+6h (heure T.U)
Mortes-eaux (coef. 45)	01/01/2008 à 00h58	01/01/2008 à 12h58
Vives-eaux (coef. 95)	23/01/2008 à 08h12	23/01/2008 à 20 h 12

*Illustration 65 – Dates des simulations en fonction des conditions de marée (*PM = Pleine Mer)*

6.1.2. Conditions de vent

Les 2 régimes de vent caractéristiques de Mayotte (cf. Ch. 2) correspondent à :

¹³ Le signal de la marée est la résultante de la conjonction de plusieurs oscillations dites « harmoniques ». Les interactions locales de ces composantes harmoniques sont responsables du type « semi-diurne à inégalités diurnes » de la marée à Mayotte.

- l'alizé en hiver austral (*Khusi*) de secteur S dominant ;
- la mousson en été austral (*Kashkasi*) de secteur NW dominant.

Les régimes d'intersaison (*Matoulai* de SE puis le *Miombeni* de N-NE) sont également présents mais ne font qu'assurer la transition entre les régimes principaux que sont l'alizé et la mousson.

Afin de représenter ces deux régimes dominants, les directions NW (saison des pluies) et S (saison humide) ont été retenues. Au cahier des charges, c'est la direction NE qui était originellement prévue. Toutefois, si ce vent est relativement important à Mayotte, c'est le vent de NW qui est le plus caractéristique de la mousson. Les simulations avec vent de NW remplacent donc celles prévues avec un vent de NE.

La station de Pamandzi est le seul poste de mesure météorologique disponible à Mayotte. L'analyse des vents maximum instantanés journaliers (données Météo-France) confirme la prédominance des vents de NW en janvier et des vents de S en juillet (Illustration 67).

Les roses des vents indiquent que c'est autour des 10m/s que les vents moyens maximums sont les plus fréquents, aussi bien pour l'alizé que pour la mousson.

Dans les termes de forçage du modèle (forçage appliqué en chaque nœud du modèle, pendant toute la durée de simulation), on impose donc un forçage stationnaire, à partir des données de vent suivantes :

Régime de vent	Direction dominante	Vitesse
Alizé (basé sur le mois de juillet)	S (180°)	10 m/s
Mousson (basé sur le mois de janvier)	NW (340°)	10 m/s

Illustration 66 – Conditions initiales de vents choisies

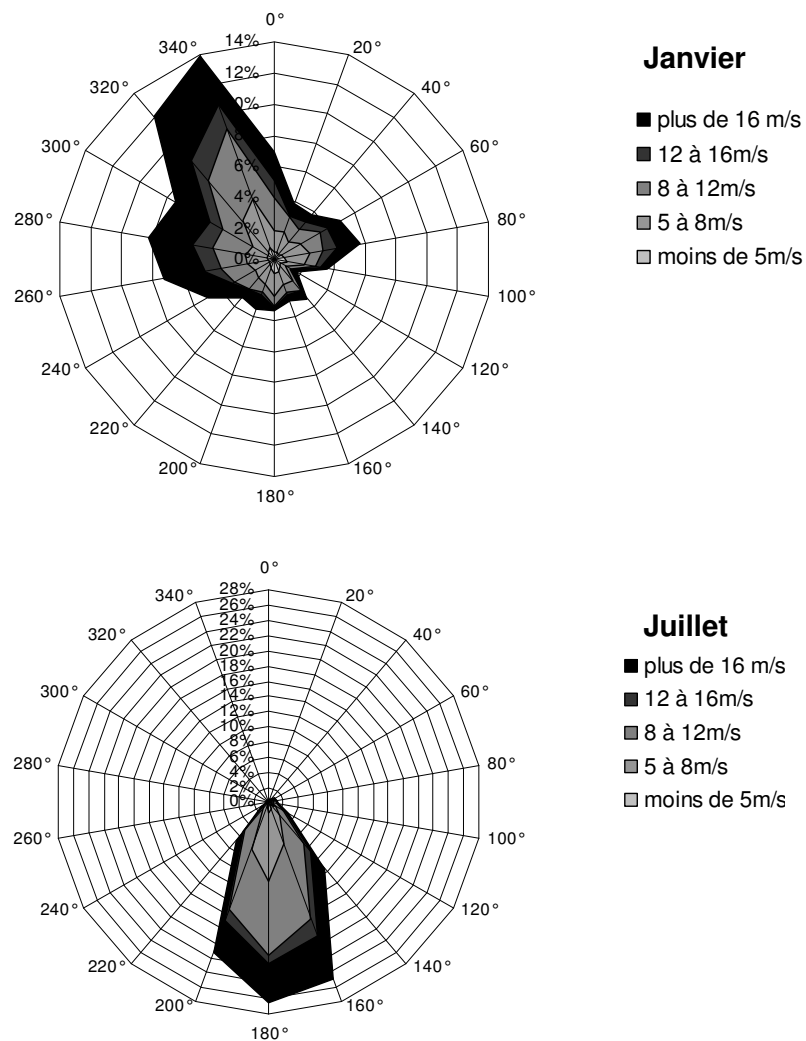


Illustration 67 – Roses des vents maximums instantanés journaliers à Pamandzi sur la période 1963 à 2007 pour le mois de janvier et de juillet (données Météo-France)

6.1.3. Scenarios simulés

Ainsi, sur la base des conditions caractéristiques de marées et de vents, les simulations sont réalisées selon les 6 scenarios suivants :

	Marées de mortes-eaux	Marées de vives-eaux
Pas de vent	Cas 1	Cas 2
Vent NW	Cas 3	Cas 4
Vent S	Cas 5	Cas 6

Illustration 68 – Synthèse des scenarios simulés

Les courants sont donc simulés pour les « petites » et « grandes » marées et pour 2 directions et 2 vitesses de vent (vent nul ou 10 m/s).

Ces 6 scénarios permettent de représenter l'ensemble des cas typiques des circulations dans le lagon (à l'exception de celles induites par les cas extrêmes de type cyclones et tempêtes tropicales) et de mesurer l'influence relative du vent et de la marée.

6.2. SCENARIOS SANS VENT

6.2.1. En marée de mortes-eaux moyennes (coefficient 45)

Pour ce scénario de morte-eau moyenne, les courants ont été simulés du 21/12/2007 au 02/01/2008, afin d'initialiser correctement le modèle. La période d'intérêt, e.g. la période où le coefficient de marée est de 45 est la période du 01/01/2008 00:58 au 01/01/2008 12:58 (cf. § 7.1.1 - Illustration 69).

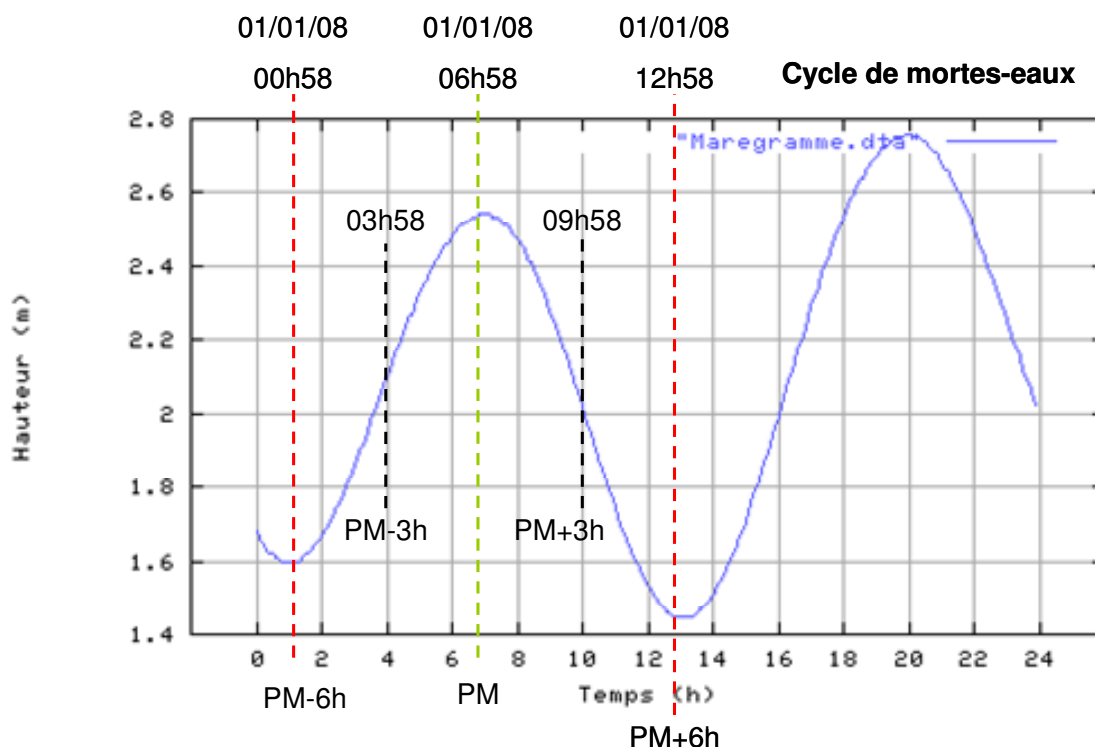


Illustration 69 – Marégramme du cycle de mortes-eaux du 01/01/2008 (données SHOM)

Les illustrations suivantes (Illustration 70 à Illustration 73) représentent, pour chaque heure du cycle de marée, les directions (sens des vecteurs) et vitesses (couleur et longueur des vecteurs) des courants de flot (de PM-6h à PM) et de jusant (de PM à PM+6h) en mortes-eaux sans vent.

A l'intérieur du lagon les courants présentent une renverse marquée avec des directions différentes suivant les zones du lagon et l'influence des passes :

- partie NW du lagon : NE au flot et SW au jusant (comme au large) ;
- partie W du lagon : S au flot et N au jusant ;
- partie S du lagon : E au flot et W au jusant ;
- partie SE du lagon : W-SW au flot et E-NE au jusant ;
- partie E du lagon : N au flot et S au jusant ;
- partie NE du lagon : SE au flot et NW au jusant.

Dans les passes et sur le récif barrière, le courant est sortant vers le large depuis la fin du flot jusqu'au début du jusant (de PM-2h à PM+3h) et entrant dans le lagon depuis la fin du jusant jusqu'au début du flot (de PM +4h à la PM-3h).

Concernant les vitesses de courants, elles restent de manière générale relativement faibles, voire quasi-nulles (environ 0.1 m/s), dans les zones profondes du lagon ou à la rencontre de deux courants opposés (dans la partie SW par exemple). Les plus fortes vitesses (0.6 m/s maximum) se manifestent à mi-marée (PM-3h/+3h) dans la partie NW du lagon (zone du récif effondré) et au niveau des passes du NW (Passes Mtsamboro et Choazil) et du SE (Passes Saziley).

Au flot (PM-4h à PM-2h), des courants de l'ordre de 0.3 m/s sont par ailleurs observés localement sur un haut-fond au large de Petite-Terre.

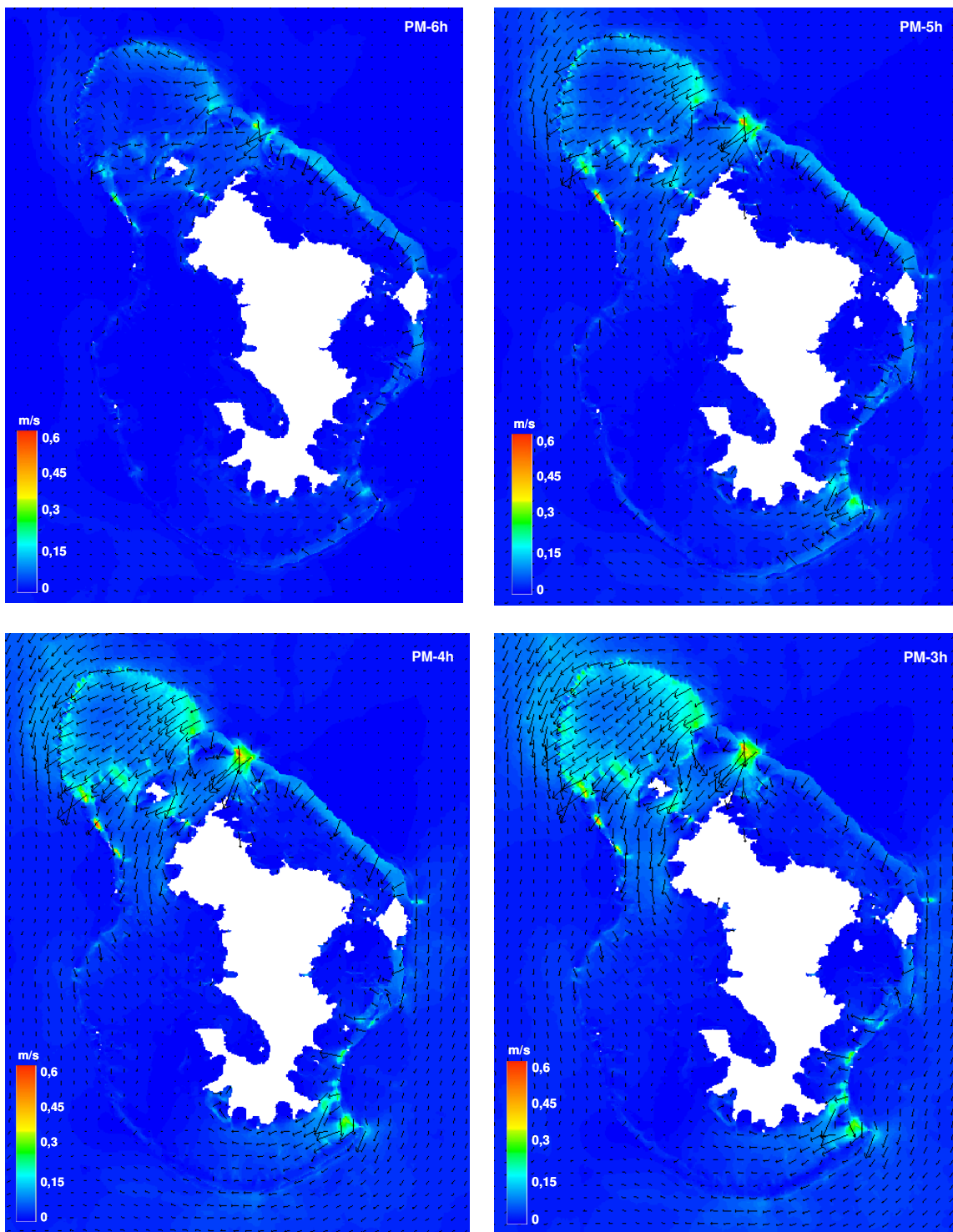
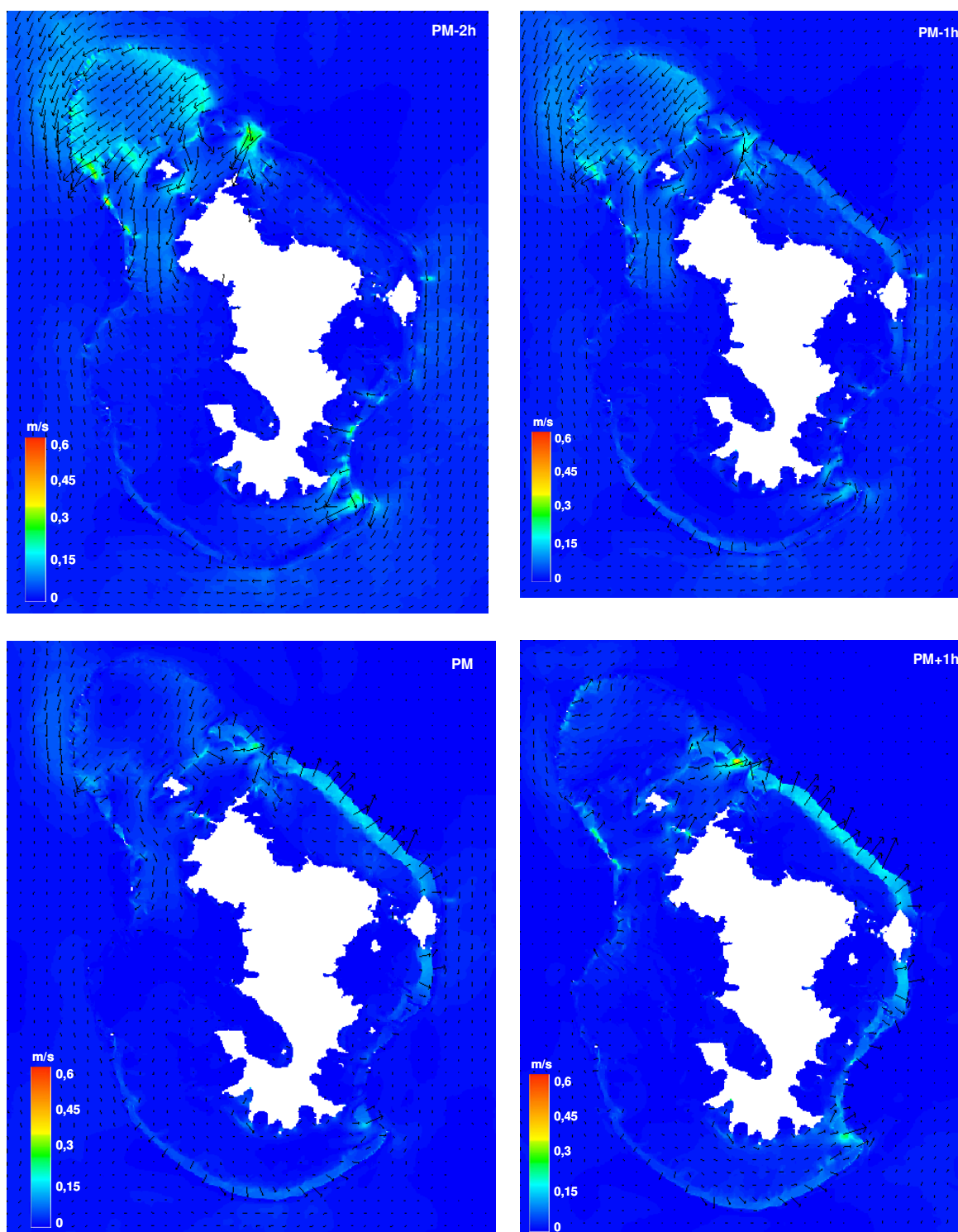
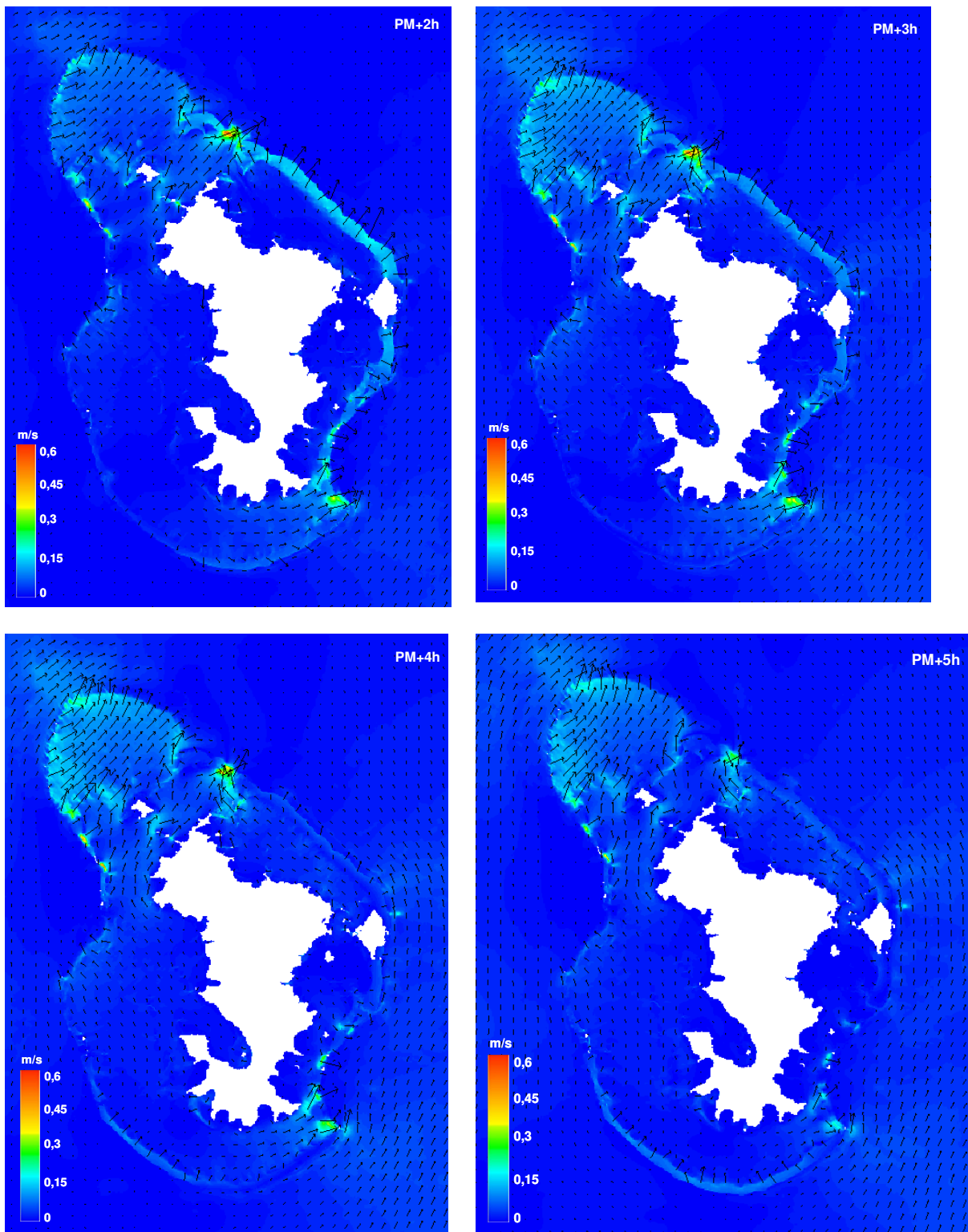


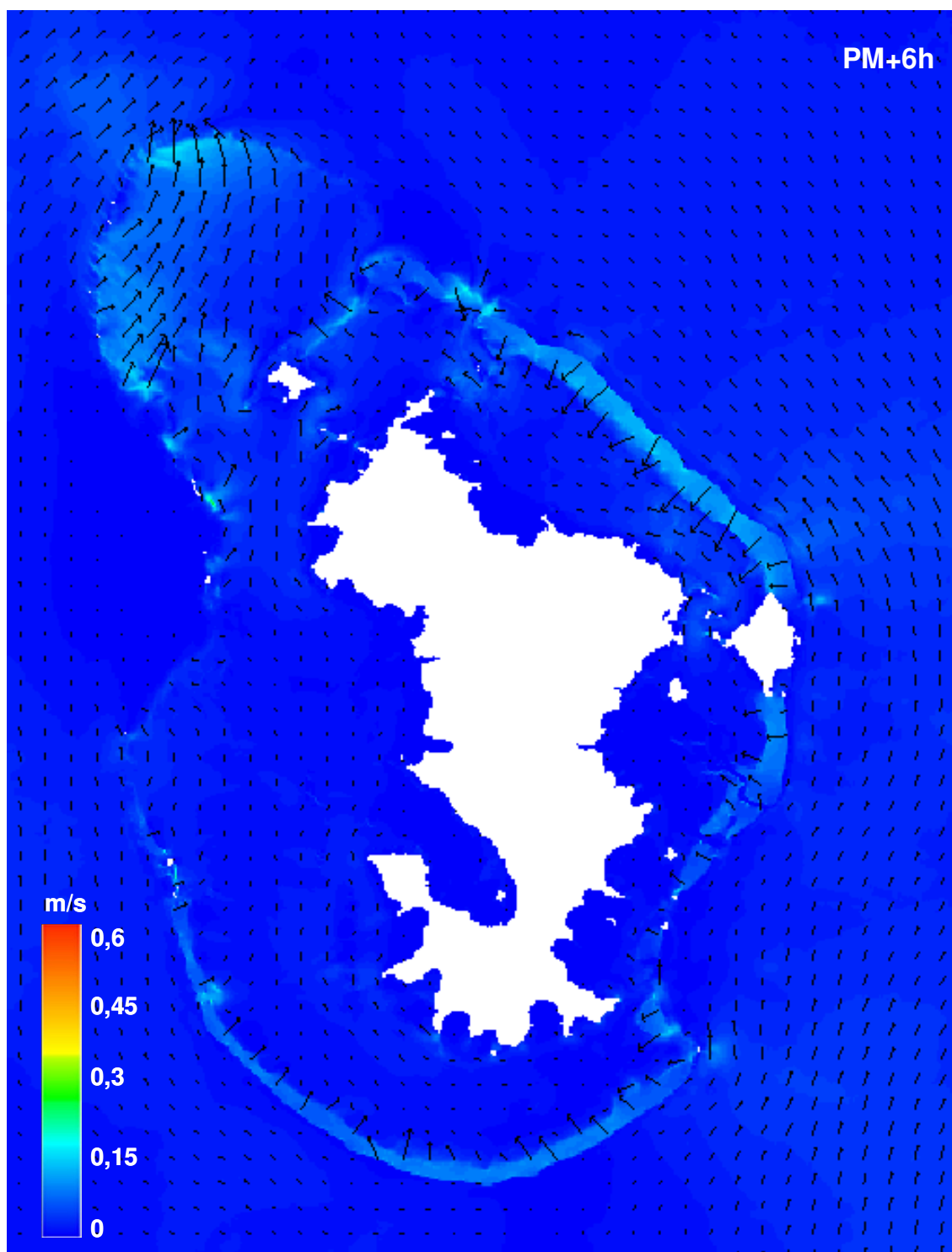
Illustration 70 - Vitesse et direction des courants de PM-6h à PM-3h en mortes-eaux sans vent



*Illustration 71 -Vitesse et direction des courants de PM-2h à PM+1h
en mortes-eaux sans vent*



*Illustration 72- Vitesse et direction des courants de PM+2h à PM+5h
en mortes-eaux sans vent*



*Illustration 73- Vitesse et direction des courants à PM+6h
en mortes-eaux sans vent*

6.2.2. En marée de vives-eaux moyennes (coefficient 95)

Pour ce scénario de morte-eau moyenne, les courants ont été simulés du 13/01/2008 au 24/01/2008, afin d'initialiser correctement le modèle. La période d'intérêt, e.g. la période où le coefficient de marée est de 95 est la période du 23/01/2008 08:12 au 23/01/2008 20:12 (Illustration 74).

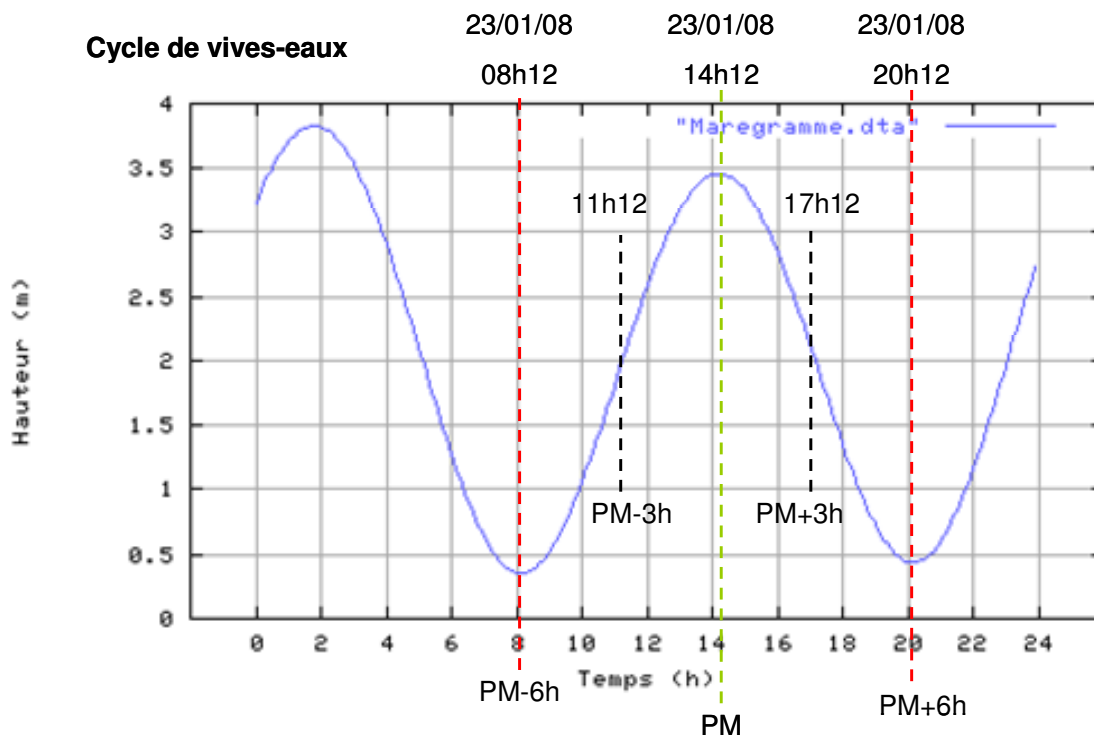
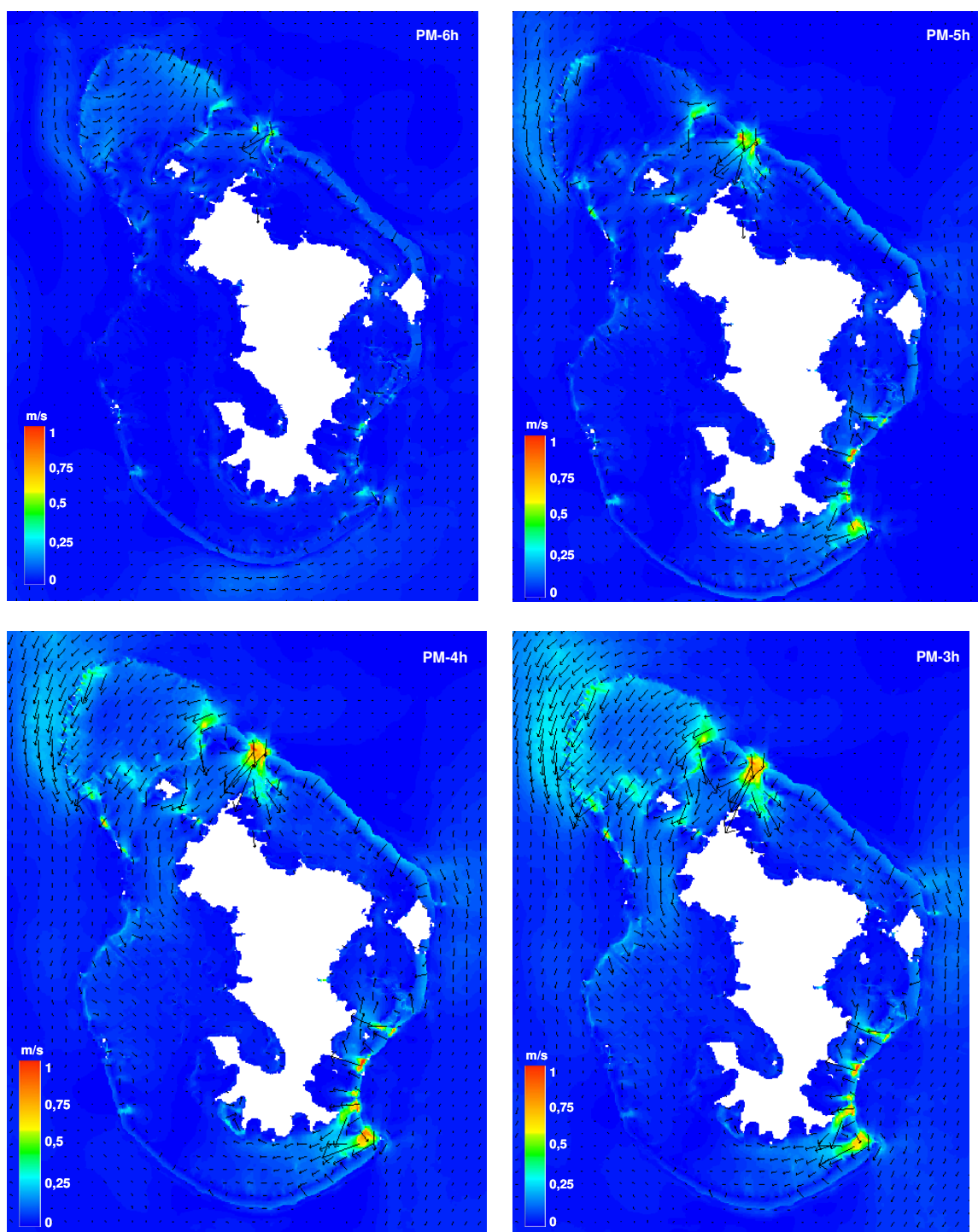


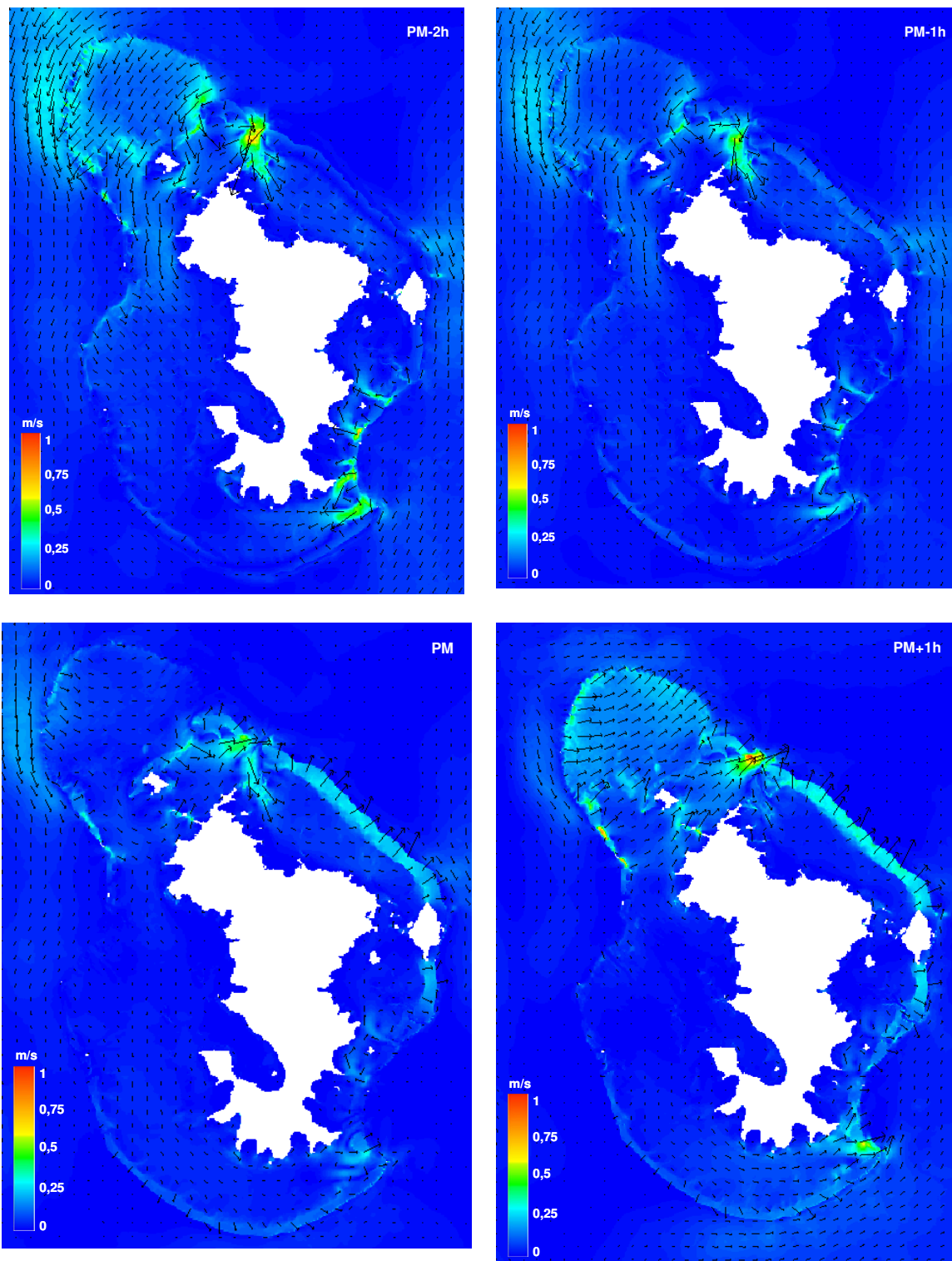
Illustration 74 – Marégramme du cycle de vives-eaux (coefficient 95) du 23/01/2008 (données SHOM) – heure TU

Les illustrations suivantes (Illustration 75 à Illustration 78) présentent les directions et vitesses des courants pour une marée de vives-eaux sans vent.

Nota Bene : les valeurs des bornes de l'échelle de couleurs sont différentes pour les vives-eaux et les mortes-eaux. Le choix a été fait de ne pas avoir recours à une échelle identique malgré les avantages évidents en terme de comparaison car cela revenait à masquer les nuances de valeurs soit des mortes-eaux soit des vives-eaux. Il est donc important de se reporter aux valeurs relatives de l'échelle ou à la longueur des vecteurs pour comparer les vives-eaux et les mortes-eaux et non uniquement aux couleurs.



*Illustration 75 - Vitesse et direction des courants de PM-6h à PM-3h
en vives-eaux sans vent*



*Illustration 76- Vitesse et direction des courants de PM-2h à PM+1h
en vives-eaux sans vent*

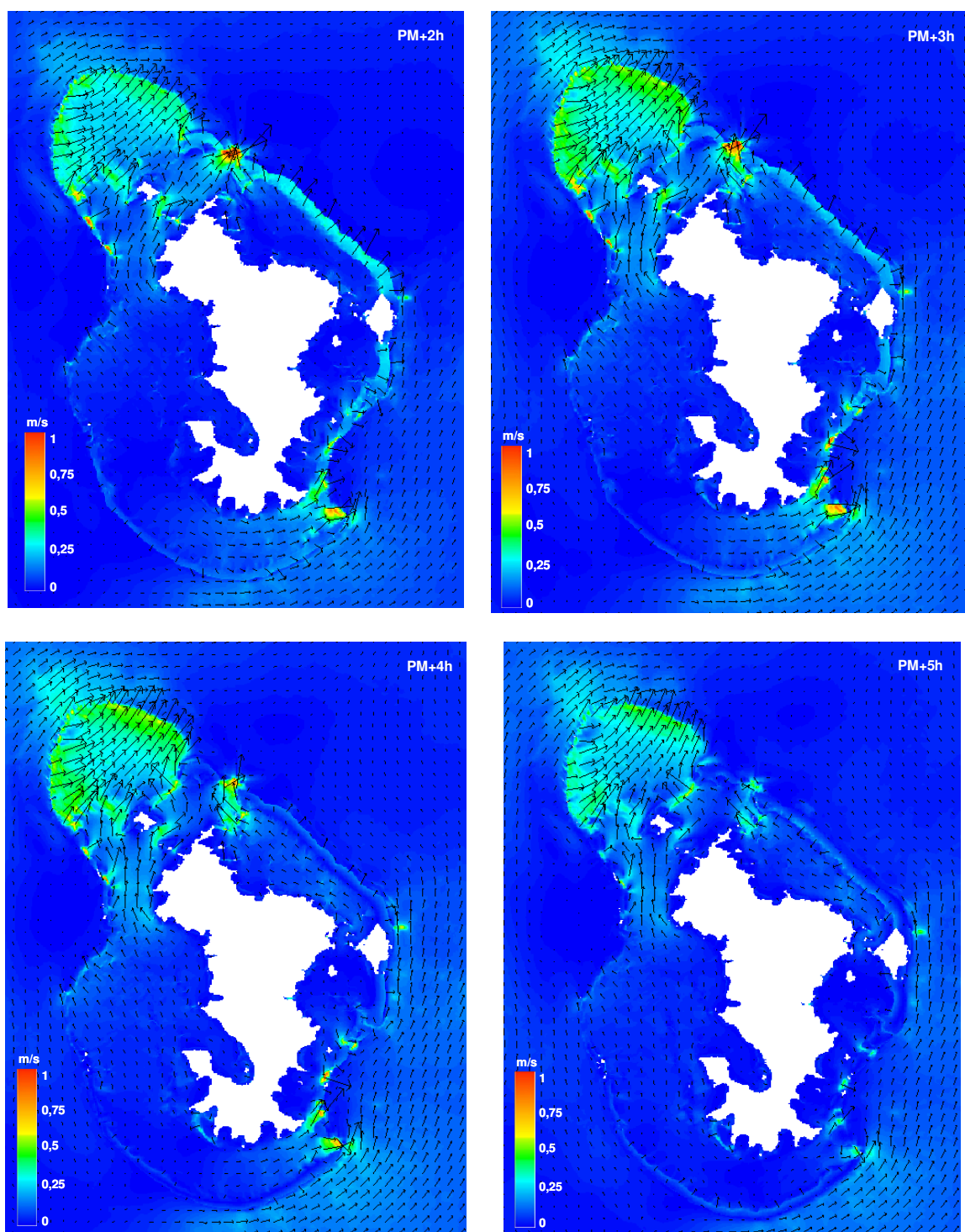
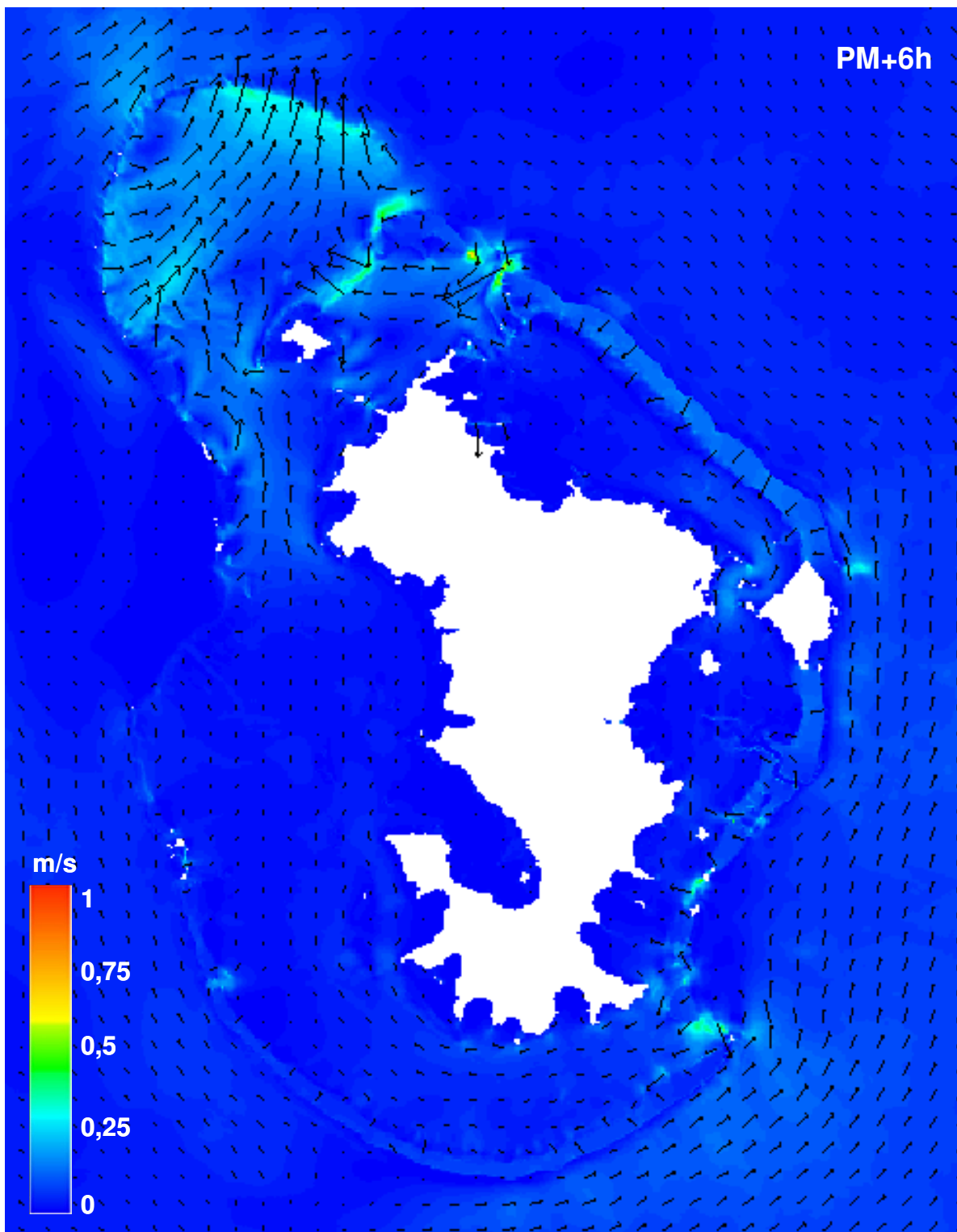


Illustration 77 - Vitesse et direction des courants de PM+2h à PM+5h en vives-eaux sans vent



*Illustration 78 - Vitesse et direction des courants à PM+6h
en vives-eaux sans vent*

En vives-eaux, les directions de courant respectent les tendances observées en mortes-eaux avec une renverse marquée selon le flot et le jusant.

Les vitesses sont globalement plus fortes même si le secteur SW conserve des courants quasiment nuls du fait de la confrontation de deux courants opposés (influence des passes du SW). La plateforme effondrée du NW et les passes NW (passes Mtsamboro et Choazil) et SE (Passe en S et Saziley) conservent les vitesses maximales (jusqu'à 1 m/s à mi-marée). Le courant sur le haut-fond au large de Petite-Terre se trouve renforcé également et avoisine les 0.5 m/s au jusant (de PM+2h à PM+5h).

6.3. SCENARIOS AVEC VENTS

6.3.1. En marée de mortes-eaux

Les scénarios avec vents (10 m/s) et marées de mortes-eaux mettent nettement en évidence l'influence du vent sur les courants avec localement des cas notables de non renverse des courants de marée (Illustration 79 et Illustration 80).

En effet, la présence d'un vent de NW ou de S contre ou accompagne fortement, suivant les secteurs, les courants de marée et induit des modifications notables en termes de directions et de vitesses des courants par rapport aux scénarios sans vent (Illustration 79 et Illustration 80).

Dans la zone du récif effondré où se vidange le N du lagon, pour un vent de NW, c'est l'W de la plate-forme qui subit le plus de changements : au jusant, les vitesses sont accélérées (0,6 m/s max. au lieu de 0,2 m/s max. sans vent) tandis qu'au flot la renverse n'a pas lieu, le courant restant entrant alors que le courant sans vent est sortant. Pour un vent du S, les courants sont renforcés au flot (notamment à l'W de la plate-forme : 0,6 m/s max. au lieu de 0,2 m/s max. sans vent) comme au jusant (notamment au S de la plate-forme : 0,4 m/s max. au lieu de 0,2 m/s max. sans vent).

Dans le goulet d'étranglement au sud de l'îlot Mtsamboro, les courants S-N du jusant sont contrés par le vent de NW et au flot le courant N-S est nettement renforcé (0,3 m/s au lieu de 0,1 m/s sans vent). Lorsqu'un vent de S souffle, la situation inverse se produit avec un courant de flot contré et un courant de jusant accéléré (0,3 m/s au lieu de 0,1 m/s sans vent).

Pour la partie N-E du lagon, les vents de NW et de S ont exactement le même rôle mais à l'inverse : le courant de marée est renforcé lorsqu'il est dans le sens du vent ou est renversé lorsqu'il s'écoule à son encontre. De même, dans le S du lagon ainsi que pour les passes de Saziley.

Dans le détroit de Mamoudzou, le vent prend complètement le dessus sur la marée avec des courants accélérés dans le sens du vent aussi bien au flot qu'au jusant.

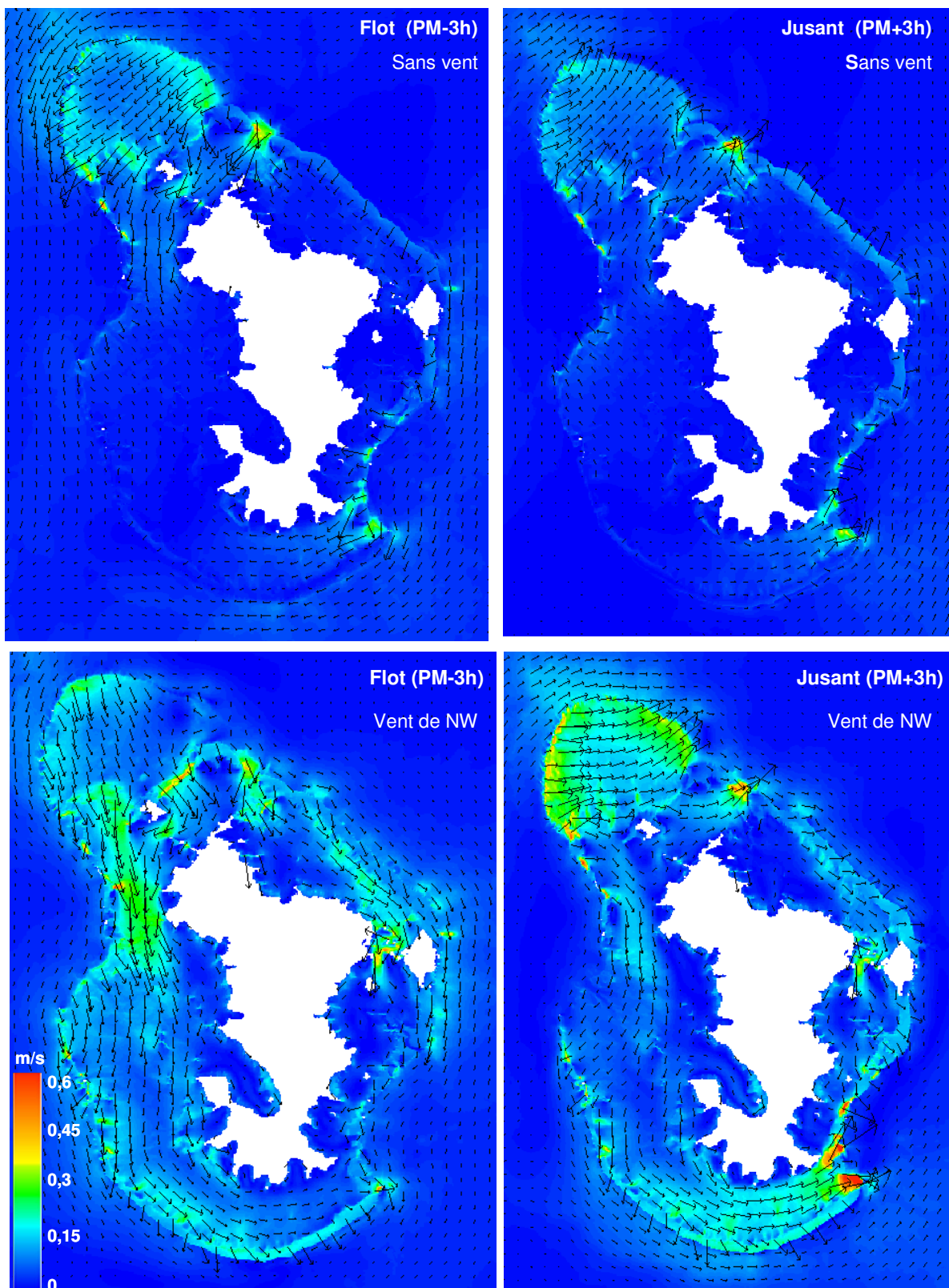


Illustration 79 - Comparaison des vitesses et directions des courants de jusant et de flot en mortes-eaux sans vent et avec vent de NW

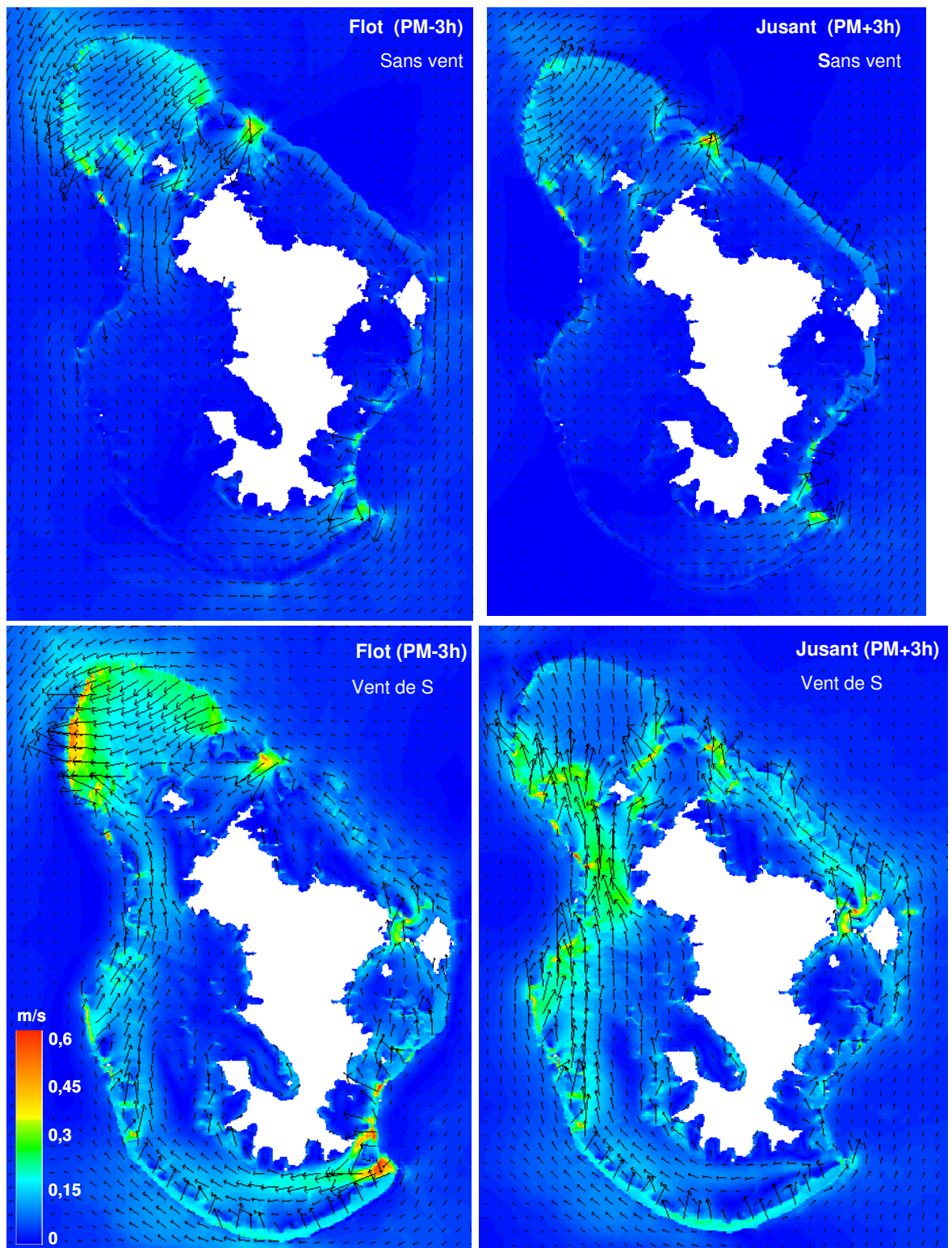


Illustration 80 – Comparaison des vitesses et directions des courants de jusant et de flot en mortes-eaux sans vent et avec vent de S

De manière générale, l'influence du vent est d'autant plus notable que la bathymétrie est contraignante (faibles profondeurs, récifs, détroits, passes).

6.3.2. En marée de vives-eaux

Par marée de vives-eaux, les vents n'ont plus qu'une influence limitée, la circulation générale du lagon étant de manière générale liée à la marée (Illustration 81 et Illustration 82).

En effet, la direction des courants change peu par rapport aux scénarios sans vent (uniquement quelques légères inflexions locales), seule la vitesse des courants étant par endroits accentuée ou diminuée suivant le sens du courant de marée.

Les parties les plus étroites du lagon affichent des modifications notables :

- le goulet d'étranglement à l'W présente des courants plus importants (0,8 m/s max.) pendant le jusant quelque soit le vent (courant de S) ;
- les courants dans le détroit de Mamoudzou sont également plus forts (jusqu'à 0,6 m/s) dès lors que le vent et le courant de marée sont dans la même direction.

Dans le S du lagon et les passes de Saziley, si la direction des courants semble globalement la même, les simulations font également apparaître un rôle différencié des directions du vent sur les vitesses de courant (+/- 0,1 à 0,2 m/s) :

- par vent de NW, les courants se trouvent renforcés au jusant et freinés au flot ;
- par vent de S, les courants se trouvent à l'inverse freinés au jusant et accélérés au flot.

6.4. CONCLUSION

De manière générales, les simulations font apparaître que la marée joue un rôle prépondérant sur la circulation des courants dans le lagon, les vents ne pouvant véritablement générer des courants du même ordre de grandeur que lorsque la marée est faible et les vents sont forts (scénarios de mortes-eaux avec vents).

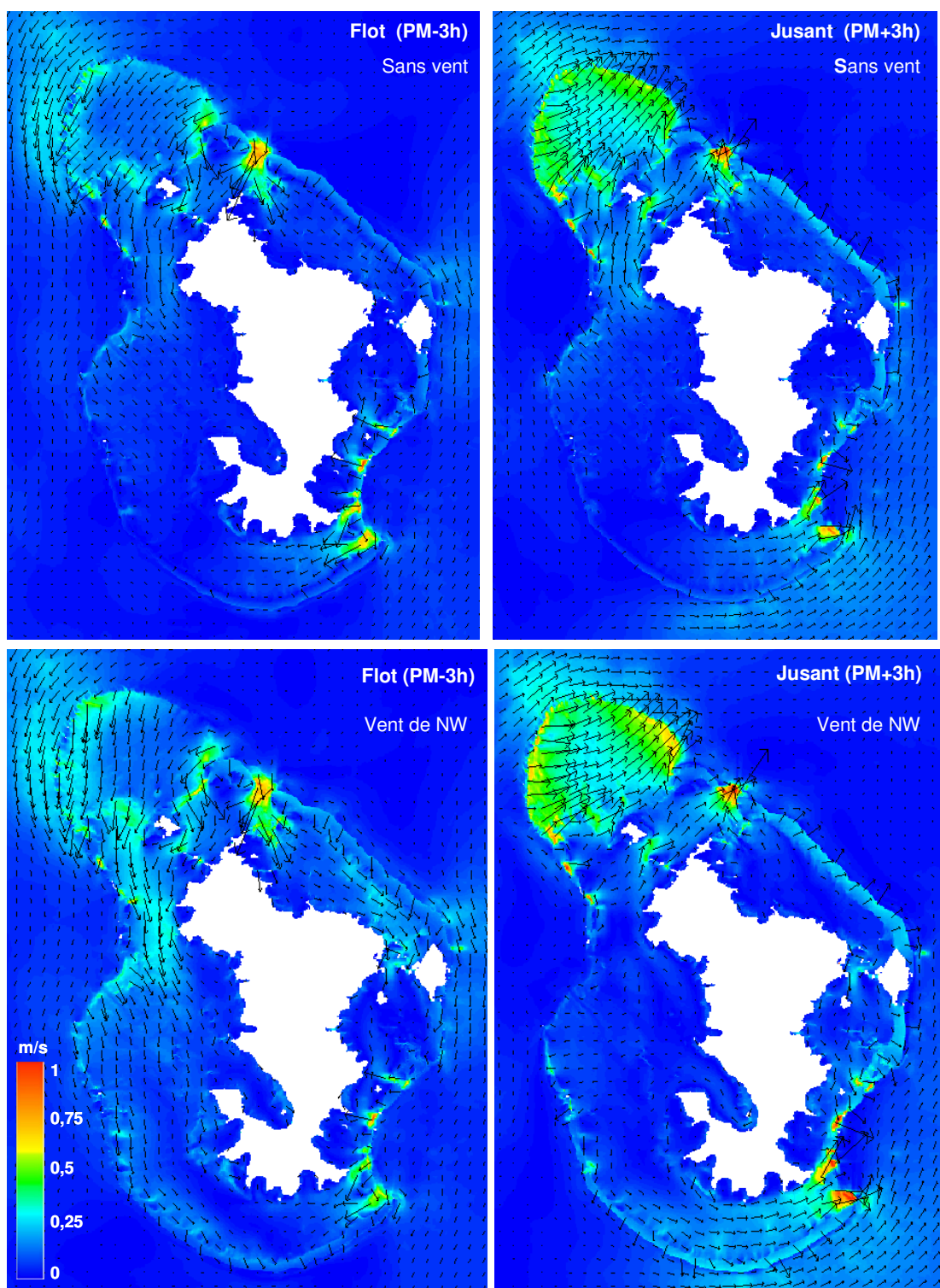


Illustration 81 – Comparaison des vitesses et directions des courants de jusant et de flot en vives-eaux sans vent et avec vent de NW

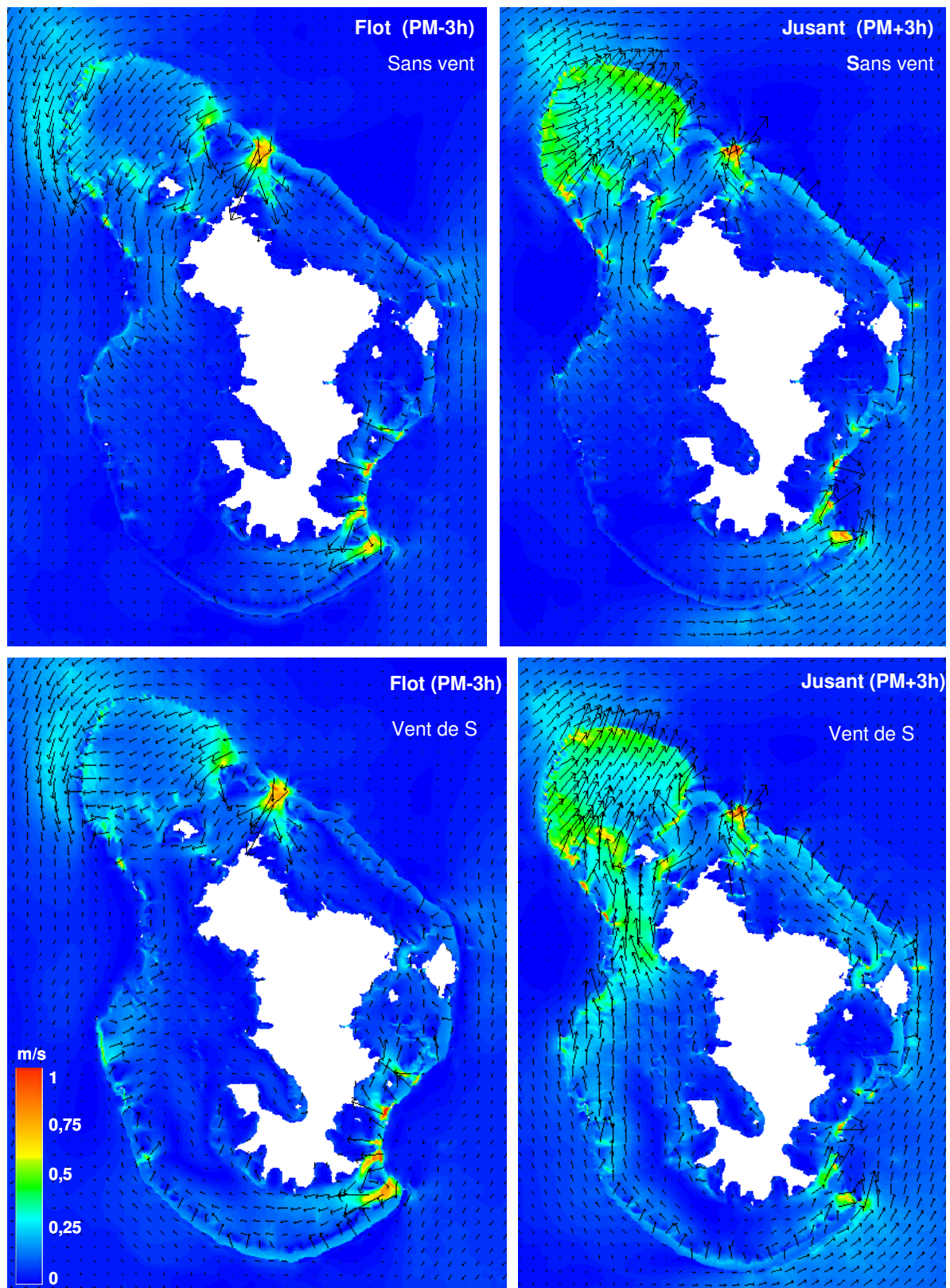


Illustration 82 – Comparaison des vitesses et directions des courants de jusant et de flot en vives-eaux sans vent et avec vent de S

7. Analyse des résultats

7.1. LES CIRCULATIONS CARACTERISTIQUES

Comme cela a été mis en évidence dans le chapitre précédent, la marée joue un rôle prépondérant sur la circulation des courants dans le lagon, les vents ne pouvant véritablement générer des courants du même ordre de grandeur que lorsque la marée est faible et les vents sont forts (scenarios de mortes-eaux avec vents). Ici, nous caractérisons plus avant ces circulations, sur la base des résultats des différents scenarios du chapitre précédent et des résultats de simulation pour la période nov-déc 2007.

7.1.1. Les circulations principales liées à la marée

L'illustration 83 présente les directions des courants de flot et jusant, en vive-eau :

- au large les courants se dirigent globalement vers le SW au flot vers le NE au jusant, comme en témoigne la zone « ouverte » au large de la plate-forme récifale au NW du lagon ;
- ils sont rentrants dans les passes et sur les récifs au flot et sortants au jusant ;

L'analyse des résultats pour les scenarios sans vent montre par ailleurs qu'il existerait un déphasage de l'ordre de 2h entre les courants de flot au SW du lagon (le récif et ses passes) et ceux du reste du lagon, les courants de flot ayant lieu 2h plus tôt au SW du lagon. Ceci est observé pour les simulations en vive-eau moyenne. Cependant, les mesures montrent, ainsi que le modèle, que ce déphasage n'est pas constant dans le temps. Nous pouvons donc uniquement conclure que le comportement au SW du lagon est potentiellement déphasé du reste du lagon, tout en sachant que dans cette zone (sauf dans les passes et sur les récifs), les courants restent faibles. Pour approfondir la connaissance dans cette zone particulière il faudrait vraisemblablement, entre autres, avoir une meilleure connaissance de la hauteur réelle du récif.

Dans le lagon, deux zones principales semblent influencer la circulation :

- d'une part la large ouverture de la plate-forme effondrée du NW influence tout l'W du lagon, le NW et le NE jusqu'au détroit Mamoudzou avec des courants globalement de S ou de N en fonction du flot ou du jusant ;
- d'autre part, les passes du SE influencent le S et l'E du lagon jusqu'au détroit de Mamoudzou avec des courants rentrants vers le N à l'E du lagon et l'W au S du lagon pour le flot et inversement pour le jusant.

7.1.2. Les circulations induites par le vent

En période de mortes-eaux, les vents peuvent modifier la circulation « normale » liée aux courants de marées (Illustration 84) :

- par vent de NW (mousson), le courant est inversé au flot dans les parties E et S du lagon tandis qu'au jusant il est inversé dans les parties W et N ;
- par vent de S (alizé), c'est la situation contraire avec un courant inversé au flot à l'W et au N et au jusant à l'E et au S du lagon.

En période de vives-eaux, les vents de mousson (NW) ou d'alizé (S) d'une vitesse de 10 m/s ont un effet réduit et les circulations générales (direction et vitesse des courants) sont semblables aux circulations « normales » sans vent.

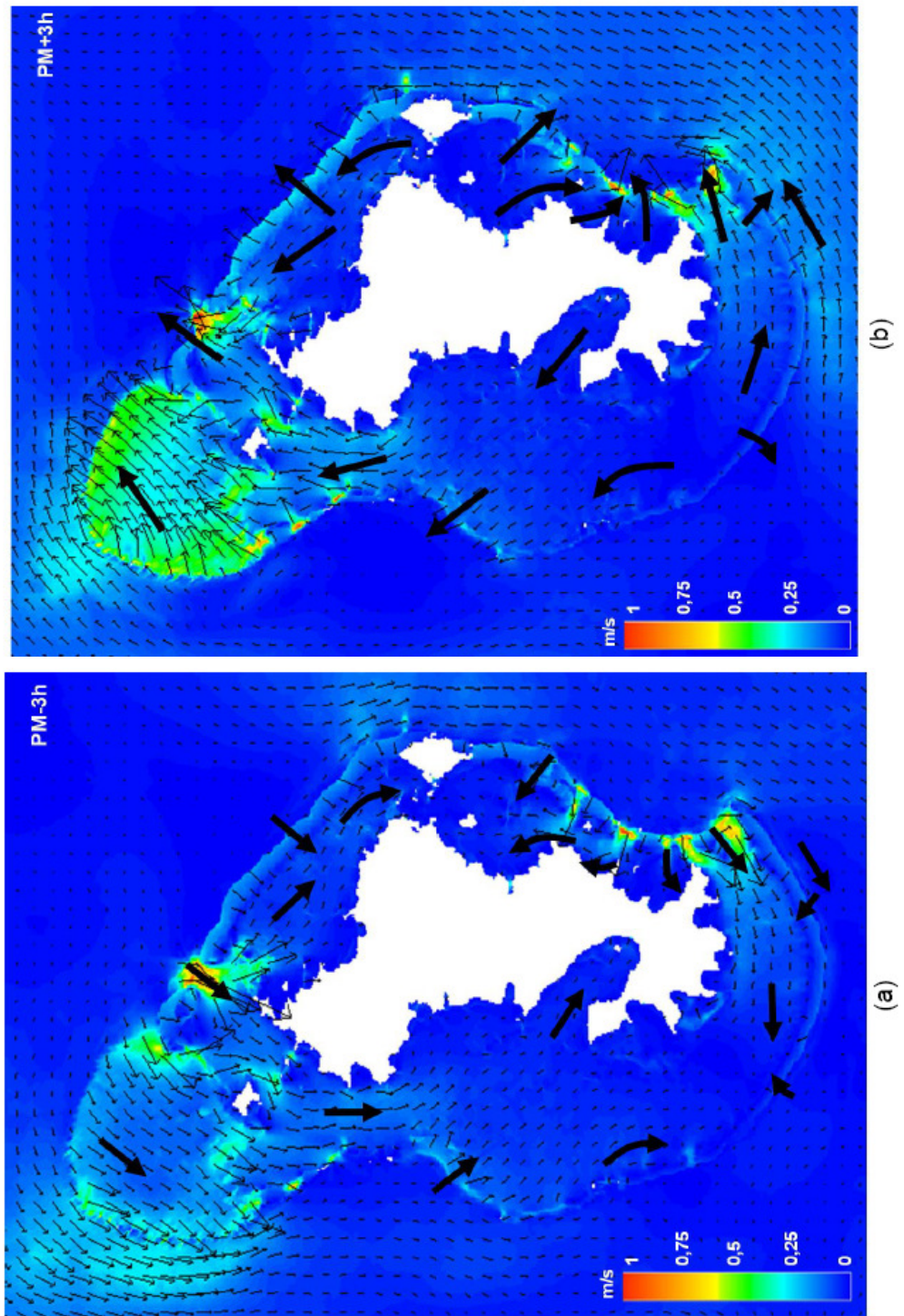


Illustration 83 – Courants de marée (vives-eaux moyenne), (a) au flot (PM-3h) et (b) au jusant (PM+3h).

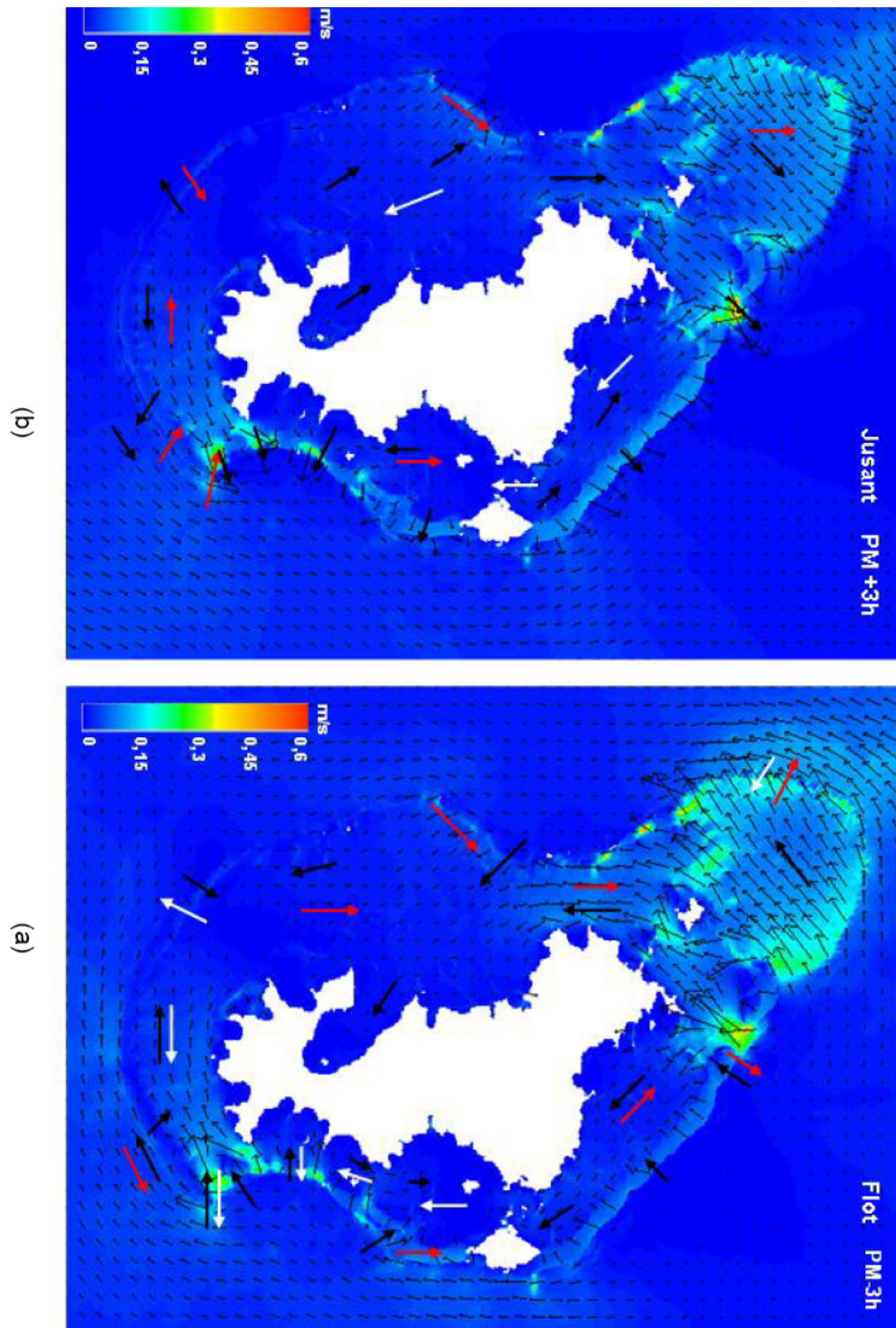
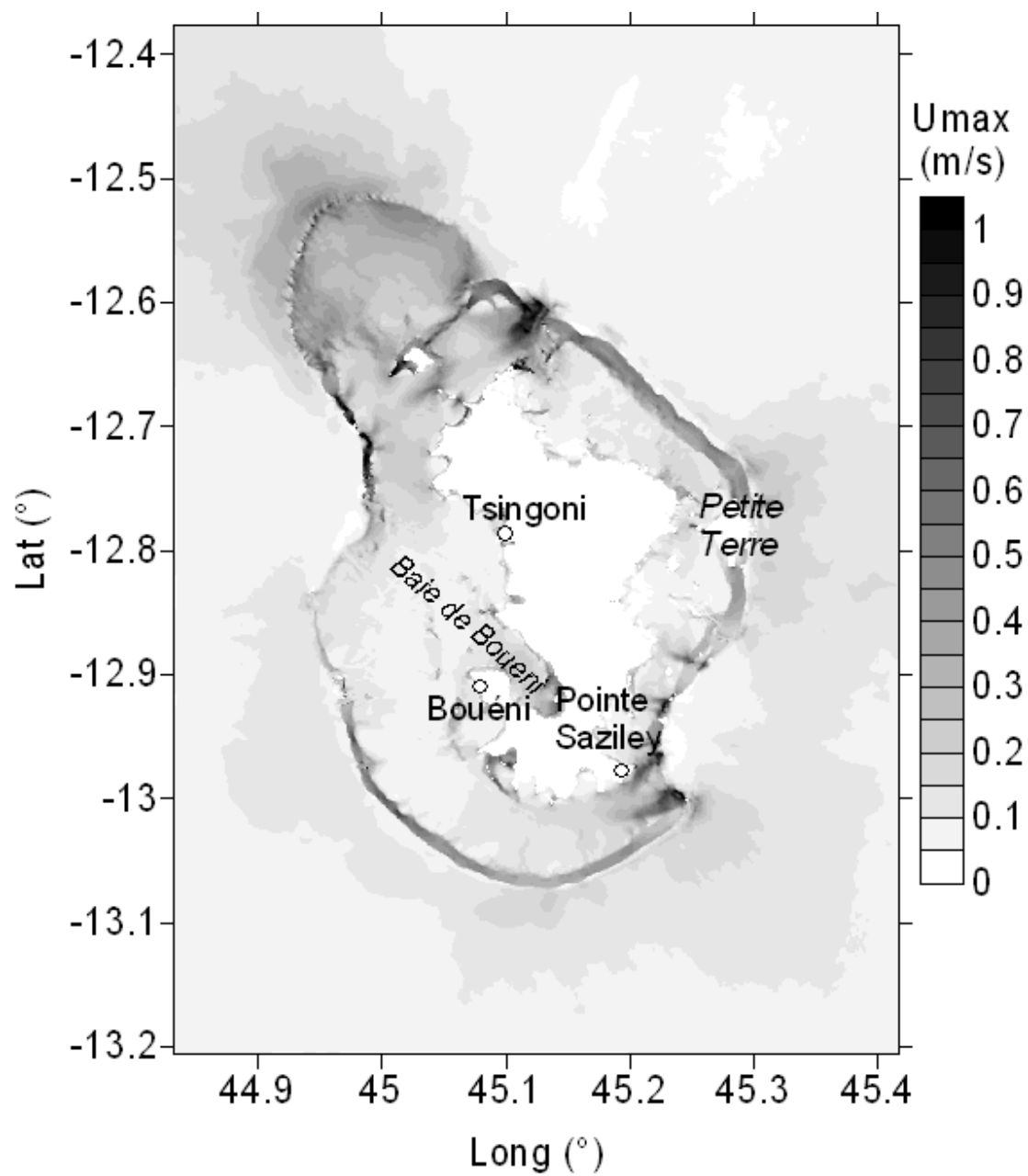


Illustration 84 - Influence du vent au flot (a) et au jusant (b) : courants de marées de mortes-eaux seuls (flèches noires), courant avec vent de 10m/s de Sud (flèches rouges) et de NW (flèches blanches).



*Illustration 85 – Courants de marée maximaux (période : 09/11/07 au 11/12/07).
Résultats du modèle.*

7.1.3. Les vitesses maximales des courants de marées

Les courants de marée maximaux calculés par le modèle (scénario sans vent) sur la période de mesure (09/11/07 au 11/12/07) permettent d'observer différentes zones homogènes en termes d'intensité des courants (Illustration 85) :

- des zones à faible hydrodynamisme ($U_{max} < 0,2 \text{ m/s}$) située dans la zone W et SW du lagon (large de Tsingoni et Bouéni), ainsi qu'au SW de Petite Terre ;
- des zones à hydrodynamisme moyen ($0,2 \text{ m/s} < U_{max} < 0,8 \text{ m/s}$) situées au S et au NW et NE, dans les passes, ainsi qu'au large de la pointe de Saziley ;
- des zones à fort hydrodynamisme ($0,8 \text{ m/s} < U_{max}$) situées uniquement dans les passes et sur certains récifs en particulier le récif situé au Nord).

7.2. COMPARAISONS AVEC LES DONNEES ANTERIEURES

Outre la comparaison des résultats aux mesures effectuées en nov-déc 2007, il est important de comparer les courants obtenus avec les données/modèles antérieures. Le jeu de données de validation nov-déc 2007 permet d'avoir une image de la validité du modèle dans différentes zones, mais pas sur tout le lagon, mais il est important de s'assurer que le modèle représente correctement le fonctionnement général de l'hydrodynamique du lagon caractérisée par des études antérieures (qualitatives ou quantitatives).

7.2.1. Circulations générales tidales

Tout d'abord, nous effectuons une comparaison des courants de marée avec les connaissances empiriques sur le lagon (Illustration 86). On retrouve les mêmes circulations, la plus-value du modèle étant d'apporter une quantification sur les variables niveaux d'eau et vitesse, en tous les points du lagon et instant de marée.

7.2.2. Courants totaux

Sur la base des scénarios utilisés (Ch. 6), nous pouvons balayer les gammes de vitesse possibles dans le lagon, hors période de cyclone ou forte tempête (vent $> 10 \text{ m/s}$). Ainsi, dans ce qui suit, nous utilisons à chaque fois les valeurs maximales obtenues avec le modèle en quelques lieux pour les trois scénarios :

- Coefficient de marée 45 sans vent
- Coefficient de marée 95 sans vent
- Le maximum entre un coefficient de marée 95 et vent de 10 m/s de S ; et un coefficient de marée 95 et vent de 10 m/s de NW.

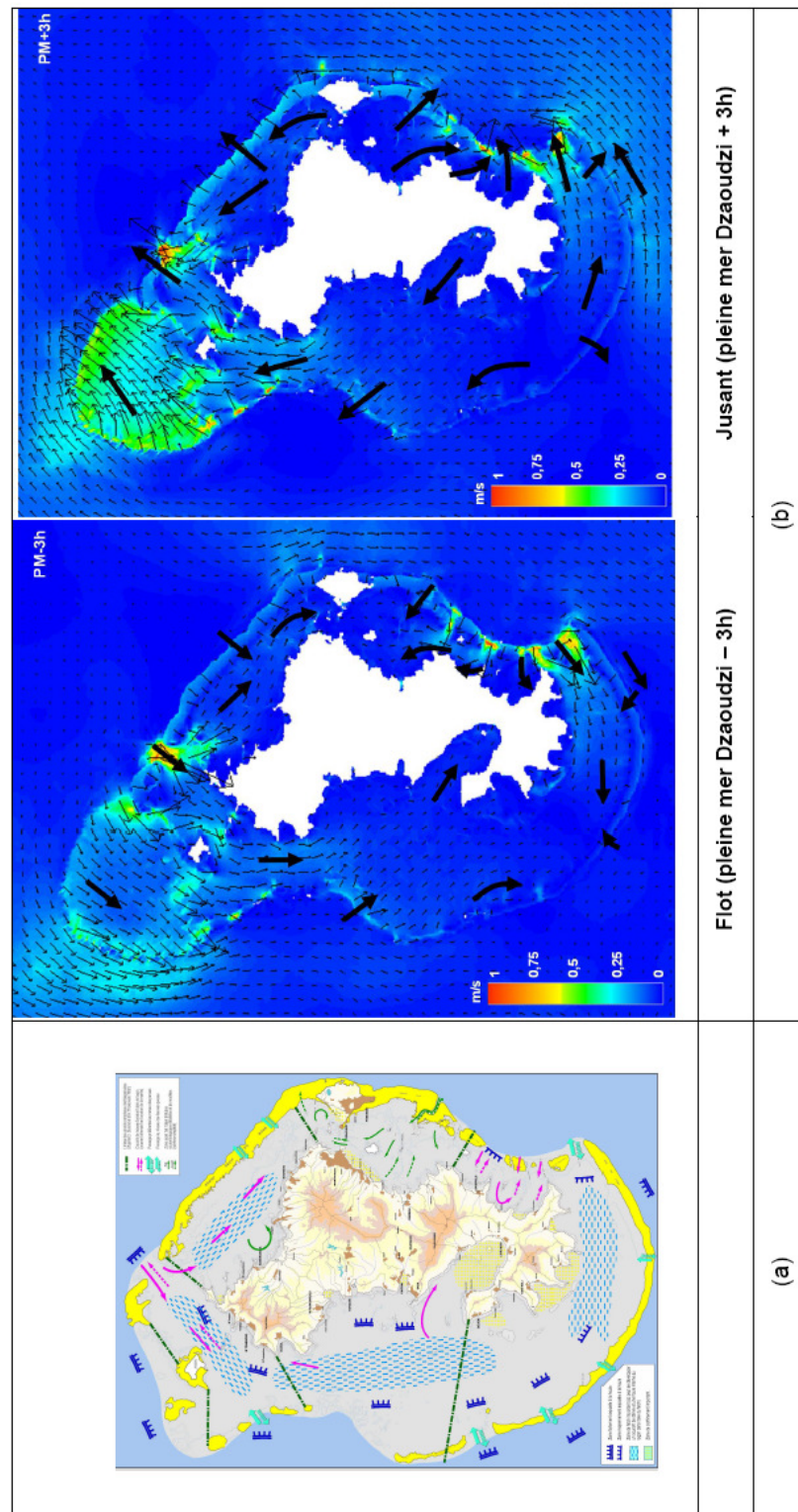


Illustration 86- Représentation qualitative des courants principaux du lagon : (a) d'après les observations qualitatives (Porcher et al., 2002) ; (b) d'après les résultats du modèle au flot et au jusant

a) Modèle vs observations antérieures

La comparaison (Illustration 87) des résultats du modèle avec les observations antérieures (Illustration 6) montre que les résultats du modèle sont cohérents avec les observations antérieures pour la zone de Saziley, Mamoudzou-Dzaoudzi, et dans une moindre mesure, M'Zamboro, Badamier lagon et Pamandzi captage. Dans la zone de Badamier océan on peut noter que le capteur était positionné très près de la barrière de corail. Or la hauteur de la barrière est uniforme dans la modèle. Il est donc possible que la résolution spatiale de 133 m d'une part et l'hypothèse faite sur la hauteur de la barrière de corail dans le modèle implique cette sous-estimation des courants.

		Courants (m/s)	
		Observation antérieures	Modèle 2DH BRGM
Badamiers océan	SIEAM	0,59 (près du fond)	0,04 0,06 0,11
Badamiers lagon	SIEAM	0,35 (près du fond)	0,02 0,05 0,11
Pamandzi captage	SIEAM	0,34 (près du fond)	0,03 0,1 0,11
Pamandzi rejet	SIEAM	0,66 (près du fond)	0,03 0,09 0,13
M'Zamboro	ORSTOM	0,92	0,2 0,4 0,5
Saziley	ORSTOM	1,02	0,3 0,8 1,1
Mamoudzou - Dzaoudzi	GIS-LAGMAY	0,20-0,35	0,06 0,2 0,3

Illustration 87 – Comparaison des vitesses maximales 2DH du modèle (coef45/coef95/coef95+vent 10m/s NW et S) avec des courants observés dans des études antérieures (Illustration 6).

Afin de compléter la comparaison avec les données antérieures, nous utilisons la même approche (utilisation des trois scénarios) pour comparer le modèle aux observations de Guilcher *et al.* (1965). On constate un très bon accord des gammes de vitesses de courant fournies par le modèle avec les observations réalisées par Guilcher *et al.* (1965), d'autant plus que les résultats du modèle sont uniquement ceux des trois scénarios (coef45, 95 et 95 + vent) et que nous n'avons pas refait de simulations pour les périodes pendant lesquelles ces mesures ont été effectuées. On peut noter que, sur les 9 points de comparaisons, seuls deux (24-Mamoudzou-Dzadouzi et 26- passe en S) sont en désaccord, avec une sous-estimation des vitesses par le modèle. La sous-estimation au niveau du capteur 24 (Dzaoudzi) peut s'expliquer par le fait que les observations réalisées pendant cette période montrent que, à la différence des autres profils, ce profil vertical de vitesse n'est pas logarithmique et que les courants sont plus forts au fond qu'en surface. Or, le modèle que nous utilisons ne permet de reproduire que des courants 2DH. Pour la passe en S, cette sous-estimation a déjà été constatée lors de la comparaison du modèle et des mesures réalisées en nov-déc 2007. Elle s'explique par le fait que la passe en S est trop étroite pour que le modèle à l'échelle du lagon (taille de maille : 133 m) puisse reproduire correctement les vitesses à l'échelle de la passe.

b) Modèle vs modélisations antérieures

La seule étude de modélisation sur laquelle des informations détaillées ont pu être obtenues est celle qui a été conduite par le SIEAM où la courantologie avait été étudiée sur certaines zones restreintes du lagon (Safege, 2005).

La comparaison des résultats du modèle de la présente étude avec les résultats des travaux de modélisation de Safege (2005) montre des courants totaux (marée et résiduel) cohérents. Par exemple, par un vent du Sud, dans le passage entre Mamoudzou et Dzaoudzi (Illustration 89 et Illustration 90), les deux études font apparaître qualitativement des courants très similaires en termes de directions et intensité, et ce, à basse mer (courants de flot maximum) et une heure avant la pleine mer à Dzaoudzi.

7.2.3. Conclusion

Outre la phase de validation par rapport aux mesures réalisées en oct-nov 2007 dans certaines zones, la comparaison avec les données antérieures, réalisées dans des zones non couvertes par nos mesures, montre que le modèle reproduit qualitativement bien les circulations, ainsi que les ordres de grandeurs des courants. La présente étude permet ainsi de compléter la connaissance existante, avec une vision à l'échelle du lagon.

7.3. NOUVELLE CARTOGRAPHIE INTERPRETATIVE

Afin de compléter la cartographie interprétative de l'hydrodynamique du lagon réalisée par Porcher *et al.* (2002), nous avons reporté les directions de flot, de jusant et les vitesses maximales de courants de marée (Illustration 91). Les valeurs données sont celles pour les mortes-eaux et vives-eaux moyennes. Les valeurs reportées sont issues principalement des résultats du modèle. Dans les zones où la qualité du modèle est moindre, les valeurs sont issues des mesures (signalé par un astérisque) réalisées en nov-déc 2007. Cette cartographie met en évidence le bon accord entre nos résultats et la cartographie de Porcher *et al.* (2002), tout en la complétant au niveau des valeurs et des directions de courants de flots et jusant dans les passes entre autres.

En cas de vents (ici, scénarios de vent de 10 m/s de NW et S), ce schéma de circulation dans le lagon peut être complètement différent, particulièrement si les vents soufflent en période de morte-eau.

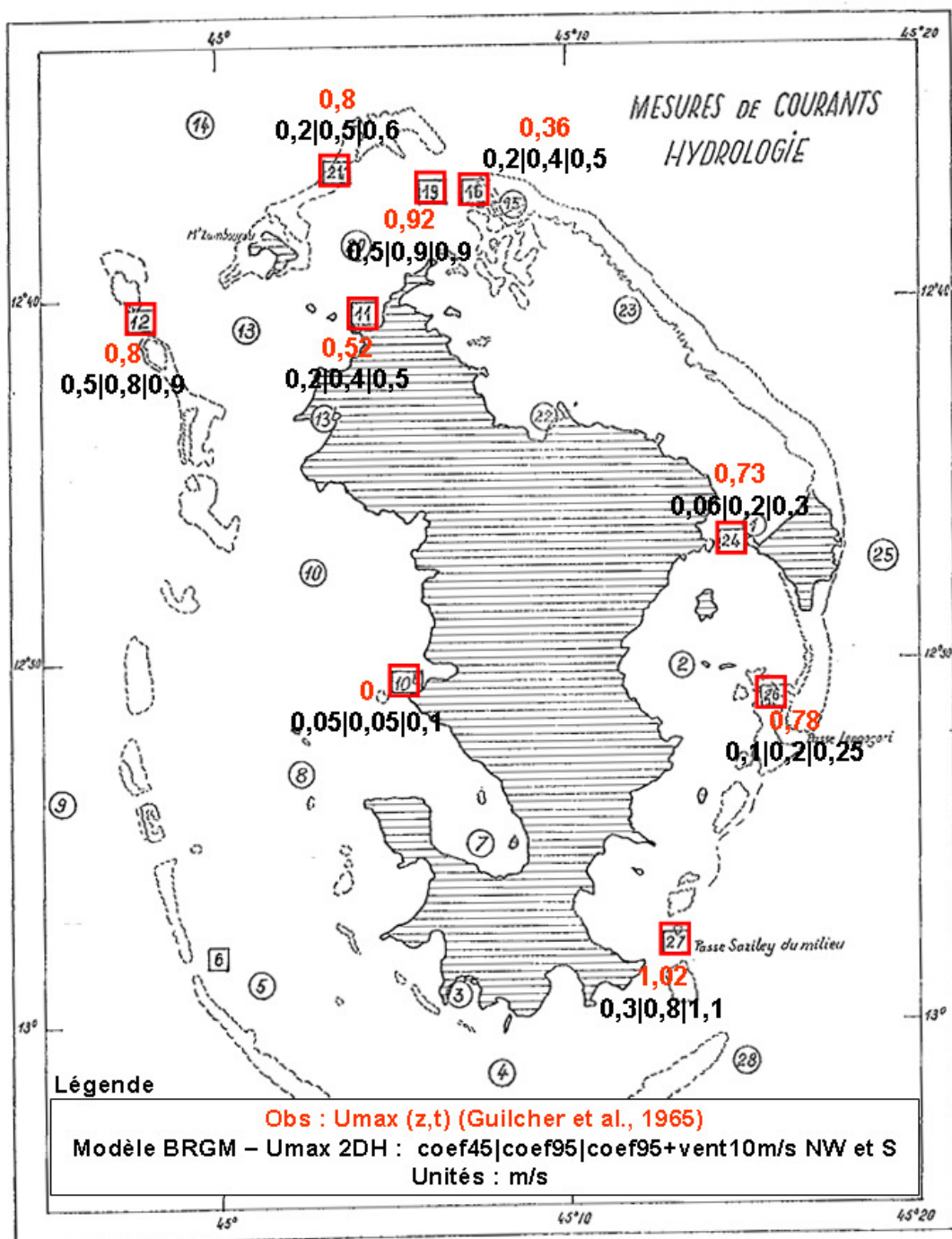


Illustration 88 – Comparaison des résultats du modèle aux observations de courants maximaux de Guilcher et al. (1965).

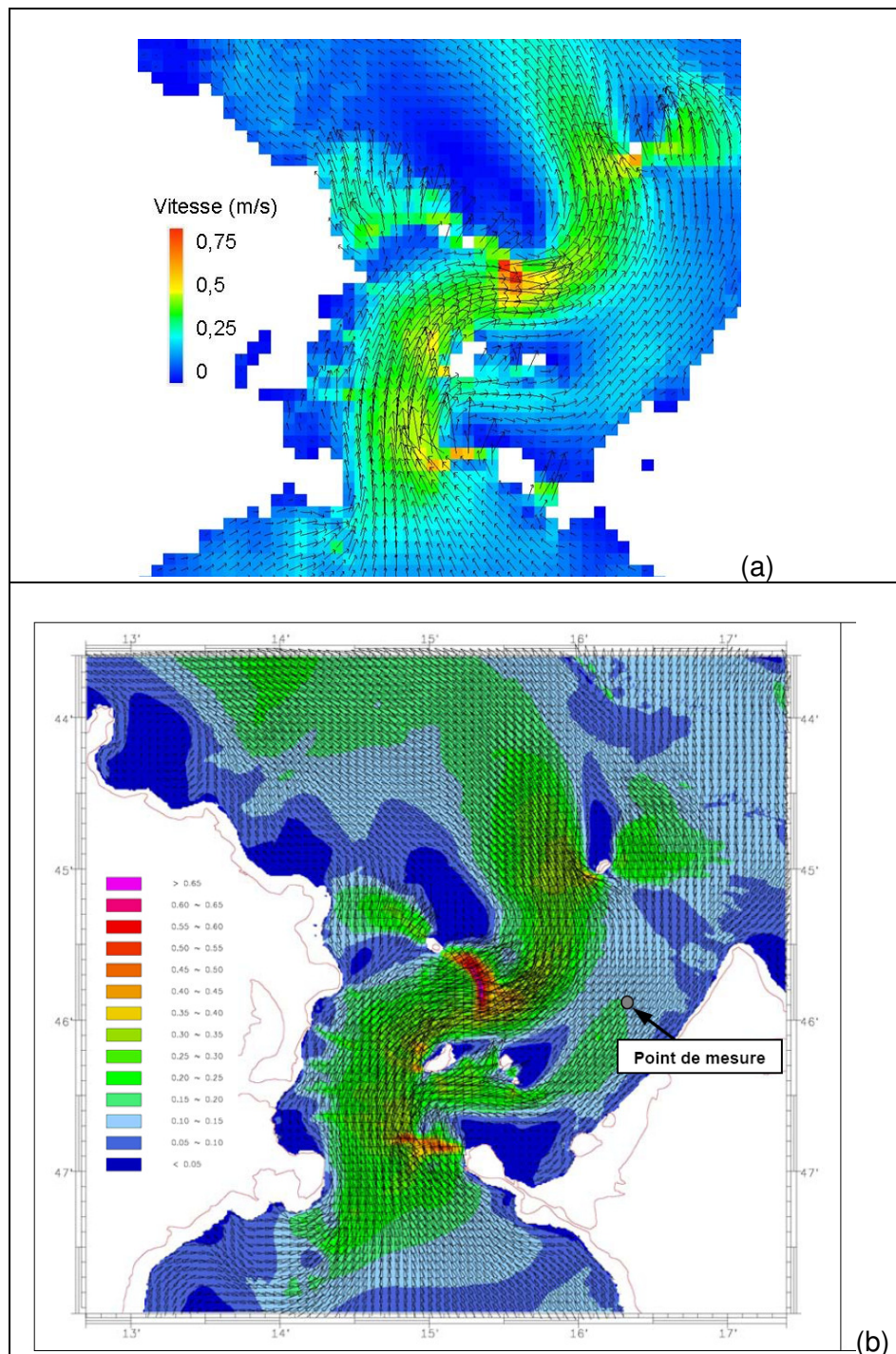


Illustration 89 - Comparaison des planches de courant obtenues, pour une basse-mer à Dzaouzi, par (a) le modèle mis en place (configuration : marée de coefficient 45 et vent de Sud de 10 m/s) et (b) celles issues de l'étude du SIEAM en 2005 (Safege, 2005) (configuration : marée d'amplitude modérée et vent de Sud entre 4 et 9 m/s).

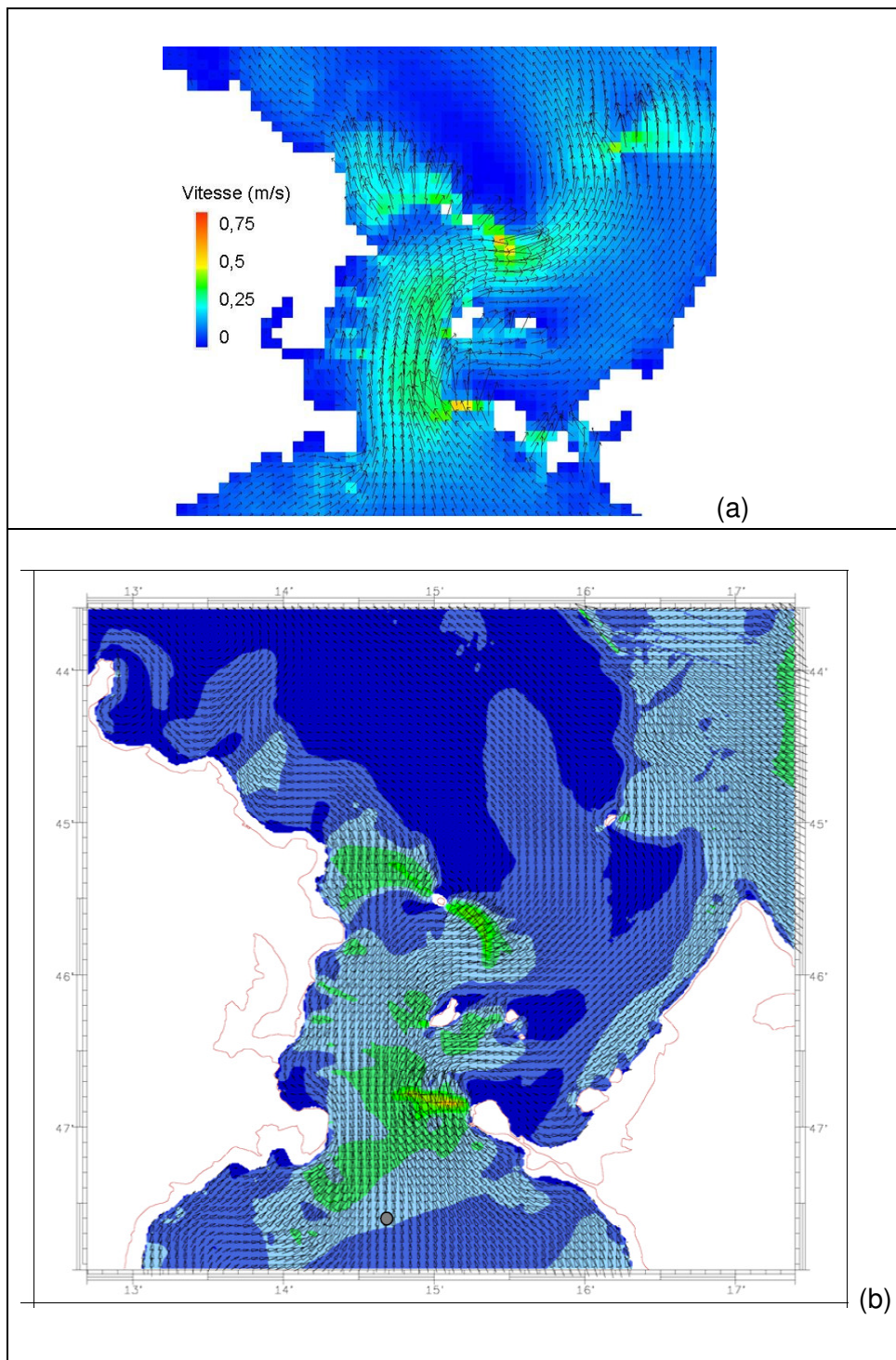


Illustration 90 - Comparaison des planches de courant obtenues, une heure avant la pleine mer à Dzaoudzi, par (a) le modèle mis en place (configuration : marée de coefficient 45 et vent de Sud de 10 m/s) et (b) celles issues de l'étude du SIEAM en 2005 (Safege, 2005) (configuration : marée d'amplitude modérée et vent de Sud entre 4 et 9 m/s).

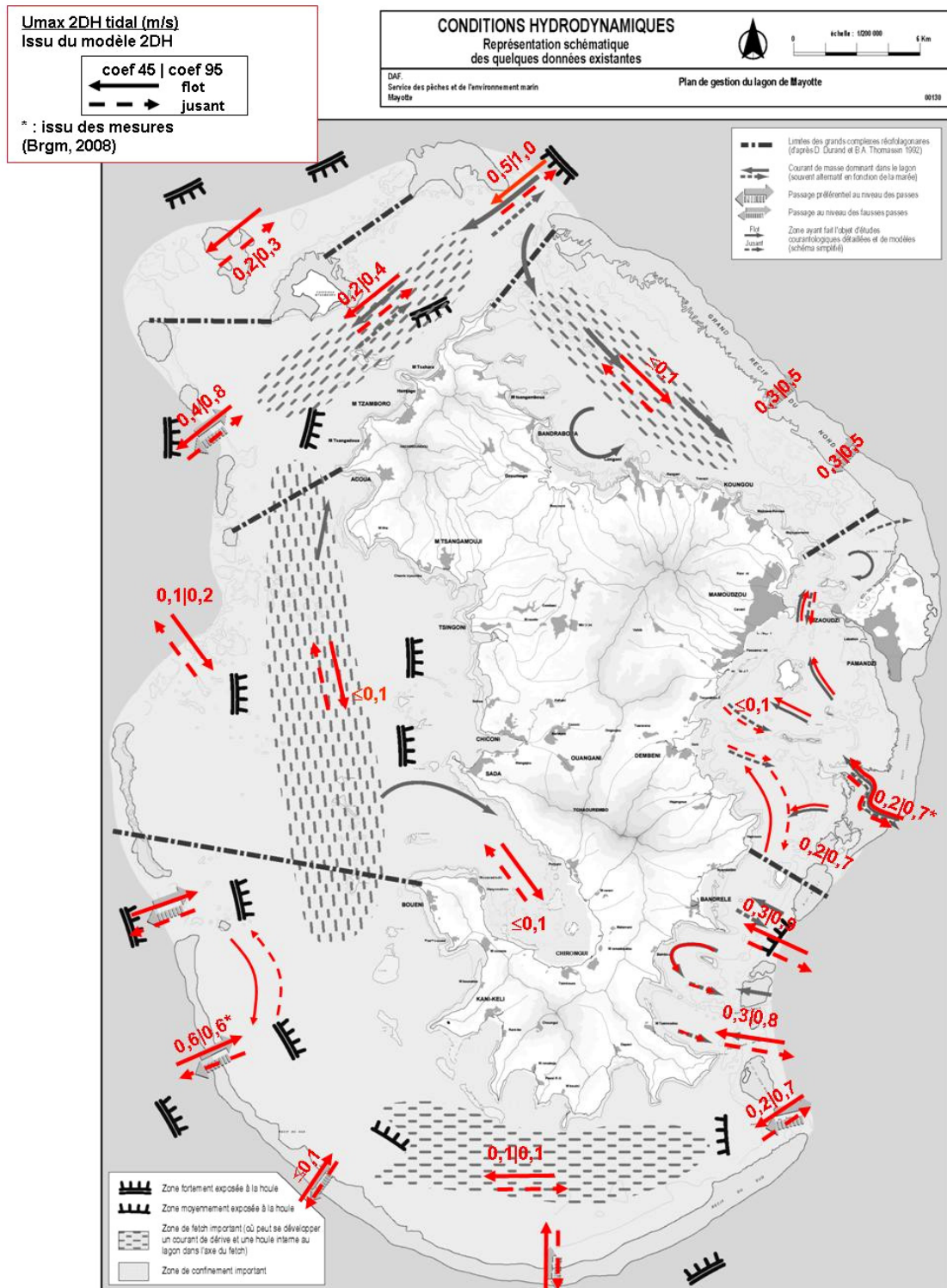


Illustration 91 – Cartographie interprétative de l'hydrodynamique tidale du lagon basée sur les résultats du modèle, complétée des mesures (fond en niveau de gris : Porcher et al., 2002).

8. Conclusion

Mis en place et validé à partir d'une importante campagne de mesure réalisée en novembre et décembre 2007, le modèle permet de représenter l'hydrodynamique générale du lagon, avec une bonne prédiction des cotes de surface libre (niveau d'eau) et des circulations dans le lagon.

Six scénarios typiques ont été simulés afin de représenter le rôle de la marée (en mortes et vives eaux) et du vent de mousson (Nord-ouest) et d'alizé (Sud) sur la circulation des eaux lagonaires.

Les résultats de ces simulations mettent en évidence le rôle majeur de la marée, le vent de Nord-Ouest ou de Sud ne parvenant à contrer le courant tidal que lorsqu'il est relativement fort et la marée relativement faible (conditions de vent de 10 m/s et de marée de mortes-eaux).

Ainsi la circulation tidale à l'échelle du lagon est telle que :

- au large, les courants se dirigent globalement vers le SW au flot et vers le NE au jusant ;
- dans les passes et sur les récifs, ils sont entrants au flot et sortants au jusant ;

Cette circulation tidale est contrainte par deux zones principales d'échange avec le large :

- d'une part la large ouverture de la plate-forme effondrée du Nord-Ouest influence tout l'Ouest du lagon, le Nord-Ouest et le Nord-Est jusqu'au détroit Mamoudzou avec des courants globalement de Sud (jusant) ou de Nord (flot) ;
- d'autre part, les passes du Sud-Est influencent le Sud et l'Est du lagon jusqu'au détroit de Mamoudzou avec des courants rentrants vers le Nord à l'Est du lagon et vers l'Ouest au Sud du lagon pour le flot, et inversement pour le jusant.

Les vitesses maximales modélisées (scénarios sans vent) sont de l'ordre de 1 m/s et ne concernent que les passes et les récifs barrières. Des vitesses intermédiaires (entre 0.2 et 0.8 m/s) se retrouvent notamment dans le lagon dans les zones d'étranglement (détroit de Mamoudzou et goulet au sud de l'îlot de Mstamboro). Les zones à faible hydrodynamisme (< 0.2 m/s) se trouvent à l'Ouest au Sud-Ouest et à l'Est du lagon. Il est toutefois à noter que dans certains cas le modèle sous-estime légèrement les vitesses par rapport aux mesures effectuées.

En cas de vents (ici, scénarios de vent de 10 m/s de NW et S), les circulations dans le lagon peuvent être complètement différentes, particulièrement si les vents soufflent en période de morte-eau.

La présente étude a permis ainsi de compléter la connaissance existante, avec une vision à l'échelle du lagon. La cartographie interprétative de l'hydrodynamique du lagon réalisée par Porcher *et al.* (2002) a été complétée en y reportant les directions de flot, de jusant et les vitesses maximales de courants de vive-eau moyenne.

Ainsi, ces informations qui affichent une bonne cohérence avec les modèles locaux, constituent une référence utile aux décideurs pour la gestion globale du lagon.

9. Bibliographie

CHOW V.T. (1959) - Open channel hydraulics, McGraw-Hill, New York.

DE LA TORRE Y. et IDIER D. (2006) - Etude préliminaire à un programme BATHYLAG, inventaire des données existantes, des secteurs à lever et des moyens à la mer. BRGM/RP54560-FR, 43 p.

DOUILLET P. (1998) - Tidal dynamics of south-west lagoon of New Caledonia: observations and 2D numerical modelling. *Oceanologica Acta* 21(1), 66-79.

GOURBESVILLE Ph., et THOMASSIN B.A. (2000), Coastal environment assessment procedure for sustainable wastewater management in tropical islands: the Mayotte example. *Ocean and Coastal Management*, 43, 997-1014.

GUILCHER A., BERTHOIS L., LE CALVEZ Y., BATTISTINI R. et CROSNIER A., (1965) - Les récifs coralliens et le lagon de l'île de Mayotte (Archipel des Comores, océan Indien) : géomorphologie, sédimentologie, hydrologie, foraminifères. *Mém. O.R.S.T.O.M.*, Paris, 11 : 1-210.

IDIER D. (2007) - Previmer. Opérationnalisation de modèles hydrodynamiques régionaux – Délivrables D1 : réalisation et mise en œuvre opérationnelle des modèles hydrodynamiques régionaux Arcachon, Bretagne Nord et Normandie. Rapport BRGM/RP-55861-FR.

IDIER D., PEDREROS R., OLIVEROS C., SOTTOLICHIO A., CHOPPIN L. AND BERTIN X. (2006) Contributions respectives des courants et de la houle dans la mobilité sédimentaire d'une plate-forme interne estuarienne. Exemple : le seuil interinsulaire, au large du puits d'Antioche, France. *C. R. Geoscience* 338

LECACHEUX S., BALOUIN Y. et DE LA TORRE Y. (2007) – Modélisation des vagues d'origine cyclonique à Mayotte. BRGM/RP-55981-FR, 100 p., 62 fig.

LYARD F., F. LEFEVRE, T. LETELLIER and O. FRANCIS, (2006), *Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004*, Ocean Dynamics, DOI 10.1007/s10236-006-0086-x.

PERENNE N. (2005) - MARS, a model for application at regional scale, Documentation scientifique 1.0, HOCER S.A.

PORCHER P., SCHRIMM M., OBERLINKELS M., MORANCY R., NICOT S., GABRIE C., CHEMINE A., QUOD J.P., BIGOT L., ESBELIN C., THOMASSIN B.A., BLASCO F., FROMARD F. (2002) - Volet 2 : Etat des lieux des milieux côtiers et récifo-lagonaires de Mayotte. Programme de protection et de mise en Valeur d'espaces Naturels d'intérêt écologique à Mayotte.

RAUNET M. (1992) – Les facteurs de l'érosion des terres et de l'envasement du lagon. Ile de Mayotte (Archipel des Comores, Océan Indien), Rapport Cirad, Départ. Cultures annuelles et Univ. La Réunion Lab Géol. : 68 p.+ 1 carte.

ROMIEU, E., IDIER, D. (2007) - Previmer : délivrable M1M2 : sorties et lecture des résultats à tous les n pas de temps de calcul et optimisation ondes de tempête – onde de marée. Rapport BRGM/RP-55862-FR

THOMASSIN B.A. (1986) - Mayotte : un lagon, pourquoi?, pour en faire quoi? Rapport de mission à Mayotte (Collectivité territoriale française), 12-23 Octobre 1986. Rapp. Centre Océanol. Marseille & Assemblée Nationale : 42 pp. multigr. + 13 pp. multigr., Bibliographie des travaux concernant le milieu marin de l'île de Mayotte, des bancs coralliens et des fonds marins adjacents.

THOMASSIN B.A., GOURBESVILLE Ph. (1998) - Station d'épuration des eaux usées de Mamoudzou-Kavani : Construction dans la mangrove de Kavani et rejet de l'effluent dans le lagon "Agangoua-Bandélé" (secteur septentrional, chenal de l'îlot Bouzi). Synthèse des données sur le milieu marin ; étude d'impact sur le lagon. Rapp. G.I.S. "Lag-May", Dir. Equipement Mayotte, déc. 1998 : 65 pp. multigr. +annexes.

SAFEGE (2005) - Etudes préalables à la modification de la prise d'eau du dessalement et à la création d'un système d'assainissement à Petite Terre – Volume des Annexes Modélisation Maritime (SIEAM).

SEO, K.H., SCHEMM, J.K.E., JONES, C., MOORTHI S. (2005) - Forecast skill of the tropical interseasonal oscillation in the NCEP GFS dynamical extended range forecasts, *Climate Dynamics* 25.

SCHOTT, F., MCCREARY, J.P. (2001) - The monsoon circulation in the Indian Ocean, *Progress in Oceanography* 51, 1-123.

SCHOUTEN M., DE RUIJTERA W., JAN VAN LEEUWENA P., RIDDERINKHOF H. (2003) - Eddies and variability in the Mozambique Channel, *Deep-Sea Research II* 50, 1987–2003

SYMONDS, G., BLACK, K.P., YOUNG, I.R. (1995) - Wave-driven flow over shallow reefs. *Journal of Geophysical research*, 77, 2207-2211.

VAN RIJN L.C;. (1993) - Principles of Sediment Transport in Rivers, Estuaries and Coastal Seas. Aqua Publications, Amsterdam.

VERDIER-BONNET C., GIRAUD S., ANGOT Ph., FRAUNIE Ph., DEKEYSER I. et MARCER R. (1993) – Modélisation numériques des écoulements marins côtiers tridimensionnels à surface libre. Colloque « Méthodes informatiques de la Conception industrielle », IMT, Marseille, Juin 1993 : 8 pp. multigr.

Annexe 1

Description des capteurs déployés



Ocean Sensor Systems, Inc.

Wave Gauge, OSSI-010-003B

A Self Logging/Self Powered Pressure Sensor

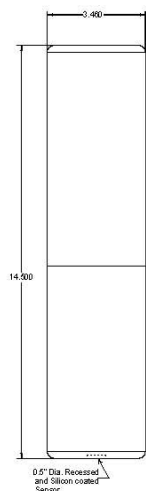
General Description

The OSSI-010-003B Wave Gauge combines a highly stable Pressure Sensor, a Compact Flash Card Data Logger, a rugged waterproof package and 12 C size Alkaline Batteries. A Low Power Microprocessor records up to 512 Mega Bytes of data on a Compact Flash Card in an ASCII or Binary format with time and date. Then the Card is easily removed and can be read on any PC with a standard Compact Flash Card Reader. The Logger will collect months of continuous data or years of burst data. A serial port is provided as a user interface to configure and monitor the Wave Gauge. Standard pressure ranges are 0 to 1 Bar, 0 to 3 Bars and 0 to 10 Bars.

Features

- **Standard Compact Flash Card Data Storage**
- **Data storage up to 512 Mega Bytes**
- **Standard Card Reader Compatible**
- **Power with 12 C Size Alkaline Batteries**
- **Acetal Plastic Housing Rated to 100 Meters**
- **Months of Continuous Operation**
- **Years of Burst Operation**
- **Rugged Sealed Waterproof Design**
- **Fully Programmable via RS232**
- **PC Interface Software**
- **Binary or ASCII Data Format**
- **Sample Rate From 2 Hz to 30Hz**
- **Burst or Continuous Sampling**
- **Accuracy $\pm 0.05\%$ FS, 10 to 40 °C**
- **Resolution 0.0033%FS**
- **Long Term Stability $\pm 0.05\%$ FS**
- **Optional Water Temperature Logging**

Dimensions and Ordering Information



Basic Pressure Range	Part Number
0 to 1 Bar	OSSI-010-003B-01
0 to 3 Bars (Standard)	OSSI-010-003B-03
0 to 10 Bars	OSSI-010-003B-10

Ocean Sensor Systems Inc., Coral Springs FL, Tel. 954-796-6583 www.oceansensorsystems.com 1

Teledyne RD Instruments
Acoustic Doppler Products
**WORKHORSE
SENTINEL
ADCP**

Workhorse Sentinel

MARINE MEASUREMENTS
NAVIGATION
WATER RESOURCES

SELF-CONTAINED 1200, 600, or 300 kHz ADCP

The global leader in high-accuracy data collection

The self-contained **Sentinel** is Teledyne RD Instruments' most popular and versatile Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) configuration, boasting thousands of units in operation in over 50 countries around the world.

By providing profiling ranges from 1 to 165m, the high-frequency Sentinel ADCP is ideally suited for a wide variety of applications. Thanks to Teledyne RDI's patented BroadBand signal processing, the Sentinel also offers unbeatable precision, with unmatched low power consumption, allowing you to collect more data over an extended period.

The lightweight and adaptable Sentinel is easily deployed on buoys, boats, or mounted on the seafloor. Real-time data can be transmitted to shore via a cable link or acoustic modem, or data can be stored internally for short or long-term deployments. The Sentinel is easily upgraded to include pressure, bottom tracking, and/or directional wave measurement—for the ultimate data collection solution.

The Workhorse Sentinel offers:

- **Versatility:** Direct reading or self-contained, moored or moving, the Sentinel provides precision current profiling data when and where you need it most.
- **A solid upgrade path:** The Sentinel has been designed to grow with your needs. Easy upgrades include pressure, bottom tracking, and directional wave measurement.
- **Precision data:** Teledyne RDI's patented BroadBand signal processing delivers very low-noise data, resulting in unparalleled data resolution and minimal power consumption.
- **A four-beam solution:** Teledyne RDI's patented 4-beam design improves data reliability by providing a redundant data source in the case of a blocked or damaged beam; improves data quality by delivering an independent measure, known as error velocity; and improves data accuracy by reducing variance in your data.

**TELEDYNE
RD INSTRUMENTS**
A Teledyne Technologies Company

MEASURING WATER IN MOTION AND MOTION IN WATER

Workhorse Sentinel

SELF-CONTAINED 1200, 600, OR 300 kHz ADCP



Technical Specifications

Water Profiling						
Depth	Typical Range ² 12m		Typical Range ² 50m		Typical Range ² 110m	
Cell Size ¹	1200kHz		600kHz		300kHz	
Vertical Resolution	Range ³	Std. Dev. ⁴	Range ³	Std. Dev. ⁴	Range ³	Std. Dev. ⁴
0.25m	11–14m	12.9cm/s				
0.5m	13–16m	6.1cm/s	39m	12.9cm/s	see note ¹	
1m	14–18m	3.0cm/s	43m	6.1cm/s	92–71m	12.8cm/s
2m	15–20m ²	2.0cm/s	47m	3.0cm/s	102–78m	6.1cm/s
4m	see note ¹		52m ²	2.0cm/s	113–86m	3.0cm/s
8m					126–95m ²	2.0cm/s

¹User's choice of depth cell size is not limited to the typical values specified; ²Longer ranges available; ³Profiling range based on temperature values at 5°C and 20°C, salinity = 35ppt; ⁴BroadBand mode single-ping standard deviation (Std. Dev.).

Long Range Mode

	Range (m)	Depth Cell Size (m)	Std. Dev. (cm/s)
1200kHz	24	2	3.8
600kHz	70	4	4.2
300kHz	165	8	4.2

Profile Parameters

Velocity accuracy:

- 1200, 600: 0.3% of the water velocity relative to the ADCP $\pm 0.3\text{cm/s}$
- 300: 0.5% of the water velocity relative to the ADCP $\pm 0.5\text{cm/s}$

Velocity resolution: 0.1cm/s

Velocity range: $\pm 5\text{m/s}$ (default)
 $\pm 20\text{m/s}$ (maximum)

Number of depth cells: 1–128

Ping rate: 2Hz (typical)

Echo Intensity Profile

Vertical resolution: Depth cell size

Dynamic range: 80dB

Precision: $\pm 1.5\text{dB}$

Transducer and Hardware

Beam angle: 20°

Configuration: 4-beam, convex

Internal memory: Two PCMCIA card slots; one memory card included

Communications: Serial port selectable by switch for RS-232 or RS-422. ASCII or binary output at 1200–115,400 baud.

Standard Sensors

Temperature (mounted on transducer):

Range: -5° to 45°C

Precision: $\pm 0.4^\circ\text{C}$

Resolution: 0.01°

Tilt:

Range: $\pm 15^\circ$

Accuracy: $\pm 0.5^\circ$

Precision: $\pm 0.5^\circ$

Resolution: 0.01°

Compass (fluxgate type, includes built-in field calibration feature):

Accuracy: $\pm 2^\circ$ ⁵

Precision: $\pm 0.5^\circ$ ⁵

Resolution: 0.01°

Maximum tilt: $\pm 15^\circ$

⁵ $\leq \pm 1.0^\circ$ is commonly achieved after calibration

Power

External DC input: 20–50VDC

Internal battery voltage: 42VDC new;

28VDC depleted

Battery capacity: @ 0°C: 450 watt hours

Environmental

Standard depth rating:

200m; optional to 6000m

Operating temperature: -5° to 45°C

Storage temperature*: -30° to 60°C

Weight in air: 13.0kg

Weight in water: 4.5kg

* Without batteries

Software

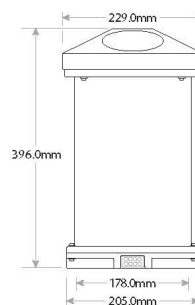
Teledyne RDI's Windows™-based software included:

- WinSC—Data Acquisition
- WinADCP—Data Display and Export

Upgrades Available

- Memory: 2 PCMCIA slots, total 2GB
- Pressure sensor
- External battery case
- High-resolution water-profiling modes
- Bottom tracking
- AC/DC power converter, 48VDC output
- Pressure cases for depths up to 6000m
- Directional Wave Array

Dimensions



TELEDYNE
RD INSTRUMENTS
A Teledyne Technologies Company
www.rdinstruments.com

Teledyne RD Instruments

9855 Businesspark Avenue, San Diego, CA 92131 USA

Tel. +1-858-693-1178 • Fax +1-858-695-1459 • E-mail: sales@rdinstruments.com

Les Nertieres 5 Avenue Hector Pintus 06610 La Gaude France

Tel. +33-49-211-0930 • Fax +33-49-211-0931 • E-mail: rdi@rdieurope.com



Specifications subject to change without notice. Rev. 0905

Aquadopp®

Open water 3D Current Meter

Imagine an ocean current meter without need for recalibration, without moving parts, with the ability to withstand fouling and with the sampling volume moved away from the mounting structure. These are among the factors making the Aquadopp® family the most versatile ocean current meters available. Leading oceanographers and engineers all over the world use the Aquadopp®. Typical applications are:

- ✓ Self-contained deployments
- ✓ Permanent monitoring stations
- ✓ Real time data collection on buoys, ROVs, off-shore platforms, etc.

The Aquadopp® is usually configured from a PC, but it can be operated from any third-party controller using the RS232/RS422 interface (binary or ASCII) or analog outputs.

Software

The Aquadopp® comes standard with Windows® software both for real time data collection and for controlling autonomous deployments. Different views and menus guide you through the process from configuration to data conversion. The software has an extensive on-line help section and requires no special skills.

New firmware versions from Nortek can be loaded into the Aquadopp® using the standard software, removing the need for opening the canister and replacing components.

The effect of magnetic deployment frames can be eliminated in the on-line compass calibration procedure.

In the final analyses, the Aquadopp® offers great value through the combined use of advanced Doppler technology and a flexible system design.



The Aquadopp® has several significant advantages when compared to other open water current meters:

- ✓ All plastic and titanium parts stops corrosion
- ✓ Small and light weight (less than 3kg!)
- ✓ No moving parts that can be blocked or sensitive parts that are easily damaged
- ✓ Low power consumption for long deployments
- ✓ A variety of sensor heads and the ability to move the sampling volume away from the mounting structure assure undisturbed measurements in all situations.

Wave directional spectra

The Aquadopp® can be configured to collect wave directional data at the same time as it measures the mean current. Nortek provides postprocessing software that allows you to calculate the wave spectra from the raw data.

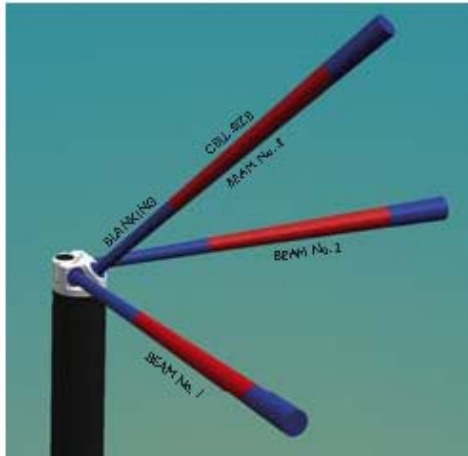
Diagnostic mode

The diagnostic mode is unique for Aquadopp®. It allows the user to intersperse the average data with periods of rapid sampling (1Hz). Diagnostic data are typically used to analyze mooring motion or to gather information about surface waves or internal waves.



www.nortek-as.com

Aquadopp Head Configurations – collecti



A variety of sensor heads are available for the Aquadopp®. Each head is optimized for certain applications to ensure that you can collect data which you really want to.

The Aquadopp® measures the Doppler shift occurring when transmitting and receiving sound along two or more narrow acoustic beams. The Doppler shift is proportional to the velocity component along the beam. The data can be combined, using the exact geometry, to generate 2D (minimum 2 beams) or 3D velocity (minimum 3 beams).

Sampling Area, Blanking and Cell Size

The sampling area is determined by the blanking, cell size, and beam geometry, as shown in the above Fig. The parameters blanking and cell size are user selectable in software, whereas the geometry is determined by the orientation of the acoustic beams. The tilt and the compass sensor in the Aquadopp® work equally well whether it points up or down. Consequently, any head may be used up-looking just as well as down-looking.

Custom Sensor Design

The Aquadopp® sensor head is made from a tough epoxy and polyurethane plastic materials suitable for molding. This allows us to design and construct new sensor heads with a lead time of four weeks or less. Contact Nortek or your local representative today if you have applications that may require a new sensor head design!

Other Sensors

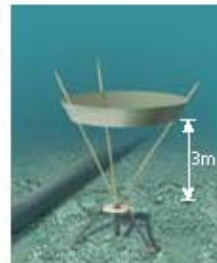
All heads have tilt and temperature sensors built in. Pressure sensor is standard for all heads except for the 2D side-looking head.

A typical application for the 2D side-looking sensor head is to measure 2D flow away from walls or boundaries. Shown here is an example of channel flow monitoring where the Aquadopp® is mounted on the channel wall, protected from floating debris, and the measurements are made in the free flow away from the wall.



A European military contractor has developed a system for mine hunting based on a powerful ROV. The ROV runs ahead of the ship at a distance of a few hundred meters, tracking targets as it goes. To measure the speed and direction, the vehicle is fitted with an Aquadopp® with right angle sensor head to get accurate readings at 1-sec intervals.

An Aquadopp® with a symmetric sensor head can be used to measure at a fixed distance above the bottom.



AquaFin Deployment Fixture

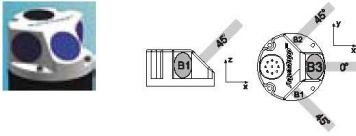
The AquaFin is designed for mooring an Aquadopp® Current Meter or a Current Profiler. It shackles into the mooring line and allows the Aquadopp® to swirl freely so that its beams always look into undisturbed flow. Choose non-magnetic stainless steel or titanium for mooring loads of 450 000, and 1350 kg, respectively. Dimensions are: 414 mm x 684 mm (w x h). Fin alone is 306 mm wide.



ing data undisturbed by flow interference

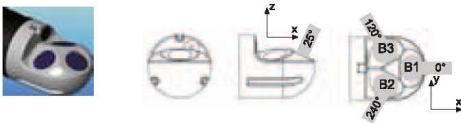
Head Configurations

Standard sensor head



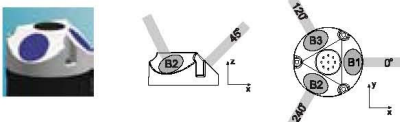
The **Standard sensor head** is designed for mooring applications. The transducer orientation is optimized to give the best possible precision for the horizontal velocity. All three transducers are mounted on one side and the instrument should be mounted to assure that the beams are pointing into the undisturbed flow. In the case of a mooring line, this can be achieved by attaching a balancing fin to the Aquadopp® or by using the Aquafin.

Right angle sensor head



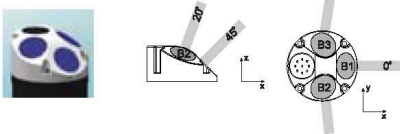
The **Right-angle sensor head** is used when it is important to give the instrument a low profile to minimize drag. Typical examples are bottom frames, ROVs, and applications where the Aquadopp® will be towed.

Symmetric sensor head



Symmetric sensor heads are designed to measure above or below the Aquadopp®. The most common application is Aquadopp® units mounted on bottom frames. In addition to measuring above the frame at a programmable distance, the vertical extent of the sampling volume is more precisely defined with the symmetric design than with the standard head, which is designed for mooring applications.

Asymmetric sensor head



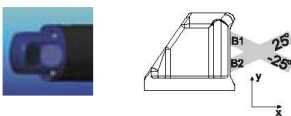
The **Asymmetric sensor head** is used in situations where the sample area is best located above (or below) the instrument and out to the side. A good example is buoy mounted Aquadopp® units, where the measurement area should be positioned both below the hull and away from the anchor chain.

Hockey-puck-looking sensor head



The **Hockey-puck-looking sensor head** has all three beams in the horizontal plane. The sensor head can only measure 2D velocity, but has the advantage that one of the beams can be eliminated in the calculation of the horizontal velocity. This head can be used when making measurements close to the surface or bottom.

2D side-looking sensor head



The **2D side-looking sensor head** is used to measure 2D flow away from walls or boundaries. Typical applications include channel flow monitoring where the Aquadopp® is mounted on the channel wall – protected from floating debris – and the measurements are made in the free flow away from the wall.

Sensor head nomenclature. The acoustic beams are defined by their unity vectors B_i in the reference coordinate system XYZ. The reference system remains constant, regardless of the sensor orientation. The conversion from beam velocity to XYZ velocity is given by the inverse matrix generated from the B_i vectors.

Should none of these configurations fit your application, note that other head configurations are available on request.

Specifications

Water Velocity Measurement

Range	±5 m/s (inquire for higher ranges)
Accuracy	1% of measured value ±0.5 cm/s
Maximum sampling rate (output)	1 Hz, 2 or 4 Hz on request
Internal sampling rate	23 Hz

Measurement area

Measurement cell size	0.75 m
Measurement cell position (user selectable)	0.35–5.0 m
Default position (along beam)	0.35–1.8 m

Doppler uncertainty (noise)

Typical uncertainty for default configurations	0.5–1.0 cm/s
Uncertainty in U/V at 1 Hz sampling rate	1.5 cm/s

Echo Intensity

Acoustic frequency	2 MHz
Resolution	0.45 dB
Dynamic range	90 dB

Sensors

Temperature	Thermistor embedded in head
Range	–4°C to 40°C
Accuracy/Resolution	0.1°C/0.01°C
Time response	10 min
Compass	Flux-gate with liquid tilt
Maximum tilt	30°
Accuracy/Resolution	2°/0.1° for tilt < 20°
Tilt	Liquid level
Accuracy/Resolution	0.2°/0.1° for tilt < 20°
Up or down	Automatic detect
Pressure	Piezoresistive
Range	0–200 m (standard)
Accuracy/Resolution	0.5% / Better than 0.005% of full scale per sample

Analog inputs

Number of channels	2
Voltage supply	12V. Hardware can be modified to provide 5V or battery voltage.
Voltage input	16 bit A/D

Data Communication

I/O	RS232, RS422, or analog outputs Software supports most commercially available USB–RS232 converters.
Baud rate	300–115 200
User control	Handled via WIN32® software, ActiveX function calls, or direct commands with binary or ASCII data output.

Software (“Aquadopp”)

Operating system	Windows® 2000 & XP Functions: Deployment planning, start with alarm, data retrieval, ASCII conversion. Online data collection and graphical display. Test modes.
------------------	---

Data Recording

Capacity (standard)	9 MB, expandable to 33, 89, or 161 MB
Data record	40 bytes
Diagnostic record	40 bytes

Power

DC input	9–16 VDC
----------	----------

Peak current	2 A at 12 VDC (user adjustable)
Max. consumption, 1 Hz	0.2–1.0 W
Avg. consumption	0.1 W (0.02 Hz), 0.01 W (0.002 Hz)
Sleep consumption	0.0013 W
Battery capacity	50 Wh. Extended 6000 m version has 2 battery packs (i.e. double capacity)
New battery voltage	13.5 VDC
Data collection (alkaline)	6 months at 10-min, ±1.5 cm/s noise
Data collection (lithium)	18 months at 10-min, ±1.5 cm/s noise

Connectors

Bulkhead (Impulse)	LPMBH-5-FS (bronze – titanium optional)
Cable	LPML-5-MP on 5 m neoprene cable
From the year 2005 inline connectors type MCBH-8-FS will be used. This will cause the endbell to be somewhat longer than today.	

Materials

Standard model	Delrin® and polyurethane plastics with titanium screws
----------------	--

Environmental

Operating temperature	–5°C to 45°C
Storage temperature	–15°C to 60°C
Shock and vibration	IEC 721-3-2
Pressure rating	300 m for housing Pressure sensor OK to 1.5×range

Antifouling paint

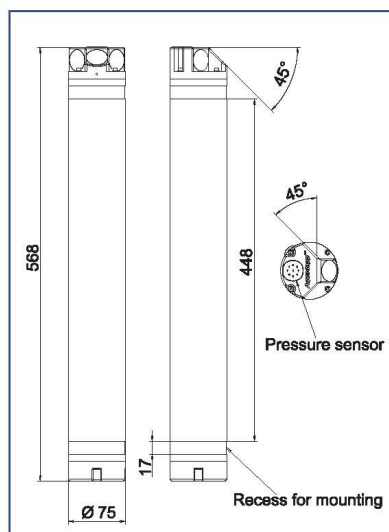
May be applied to all surfaces

Dimensions

Cylinder	See drawing below
Weight in air	3.5 kg
Weight in water	Neutral

Options

Acoustic beams	Several different sensor heads available
Battery	Lithium or rechargeable Li-Ion batteries available
External battery	4 battery packs in 75 mm diameter, 500 mm length. External canister
Connectors	LPMBH-8-FS with PLPML-8-MP on 10 m polyurethane cable for optional RS422 or RS232 with analog input



www.nortek-as.com

NORTEK AS
Vangkroken 2
NO-1351 Rud
Norway
Tel: +47 6717 4500
Fax: +47 6713 6770
E-mail: inquiry@nortek.no

青岛诺泰克测量设备有限公司

中国·青岛山东路 29 号顺河大厦
电话: 0664-532-5017579 5017376
传真: 0664-532-5017578
E-mail: inquiry@nortek.com.cn
www.nortek.com.cn

NortekUK
Mildmay House, High St.
Hartley Wintney
Hants. RG27 8NY
Tel: +44- 1428 751 953
Fax: +44- 1428 751 533
E-mail: inquiry@nortekuk.co.uk

NORTEK USA
222 Severn Avenue
Suite 17, Building 7
Annapolis, MD 21403
Tel: +1 (410) 295-3733
Fax: +1 (410) 295-2918
E-mail: inquiry@nortekusa.com
www.nortekusa.com

Annexe 2

Données brutes et traités de la campagne de mesure pour tous les capteurs

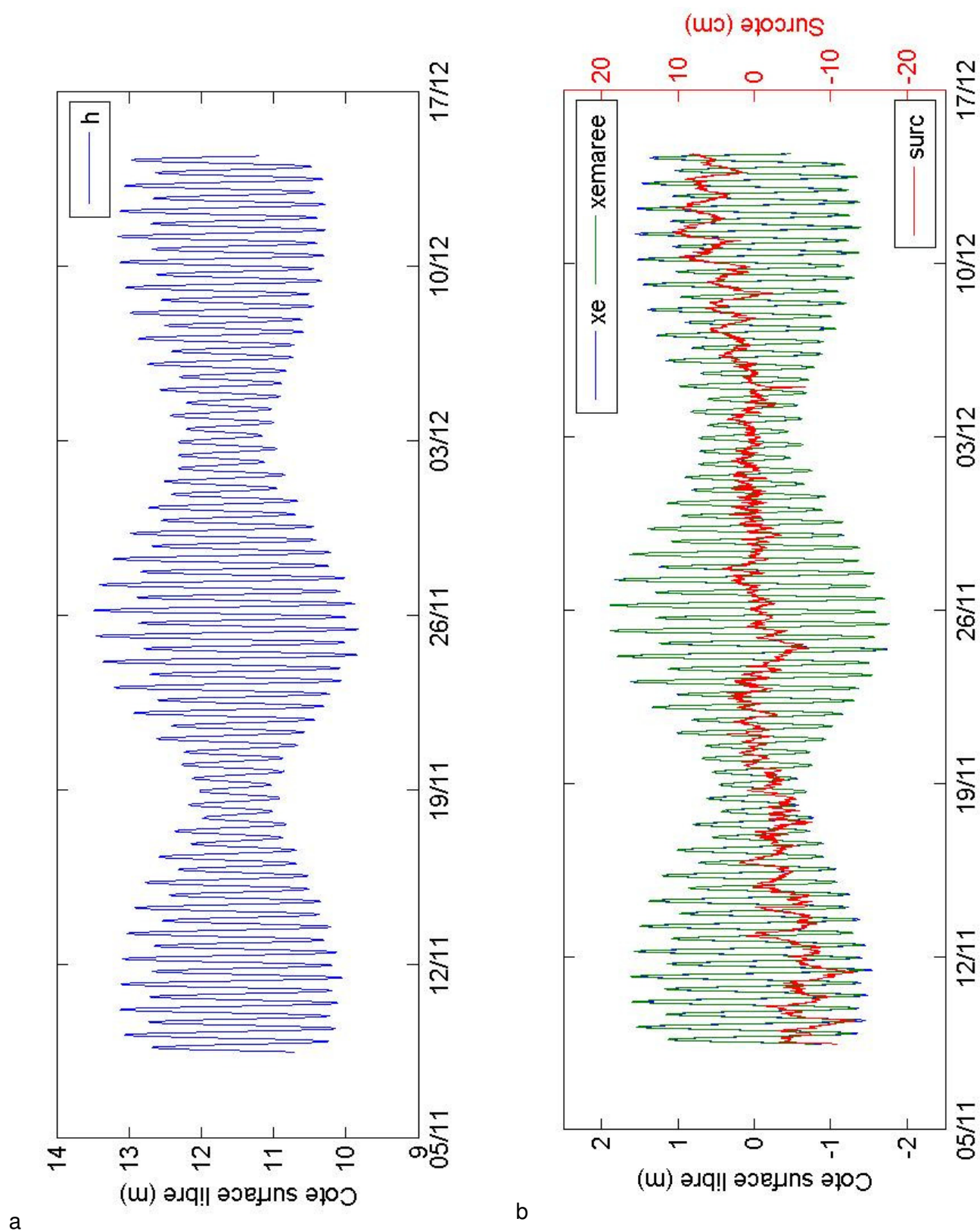


Illustration 92 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre ($xemaree$) et surcote ($surc$), capteur ossi 2 du 05/11 au 17/12/2007.

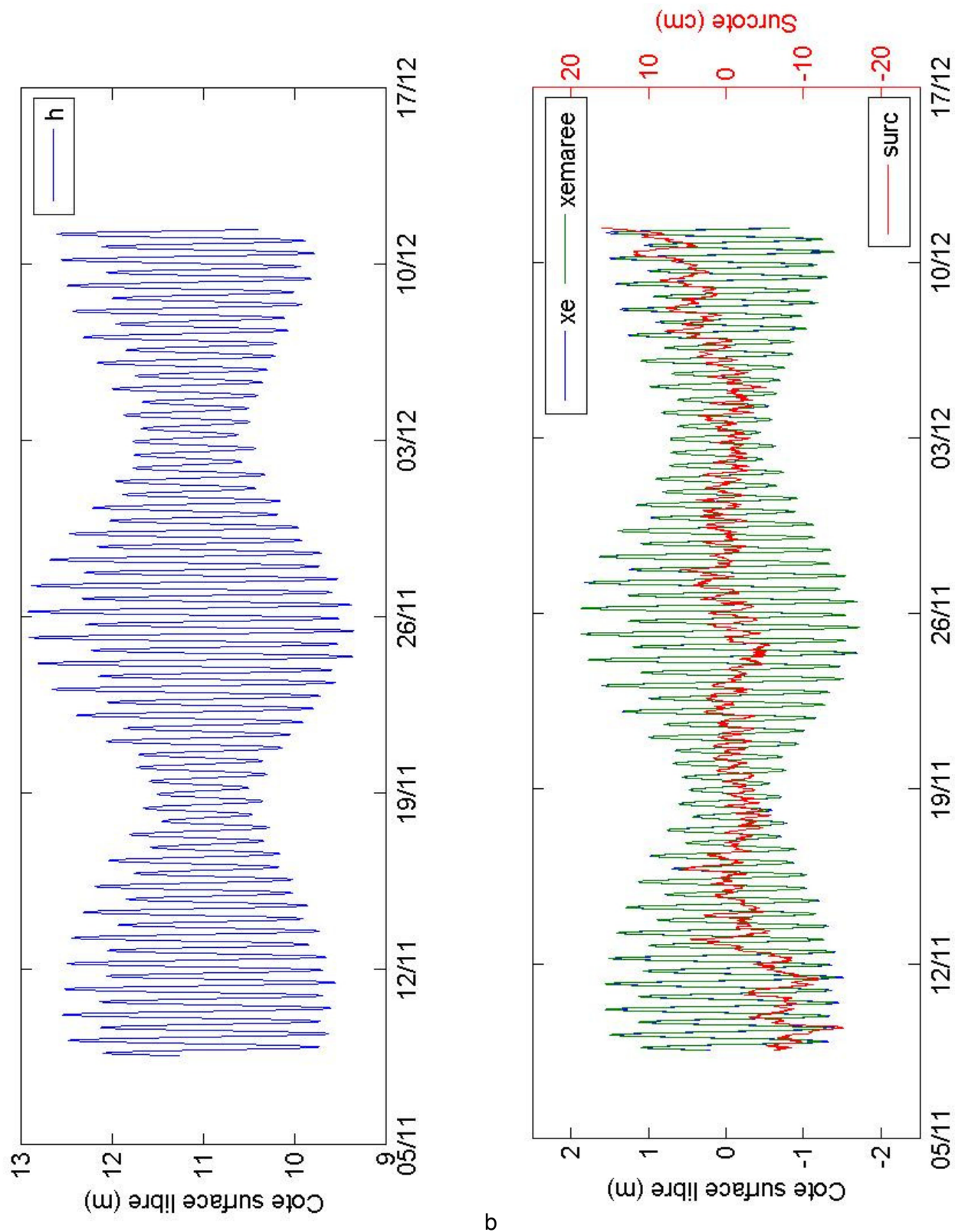


Illustration 93 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur ossi 4 du 05/11 au 17/12/2007

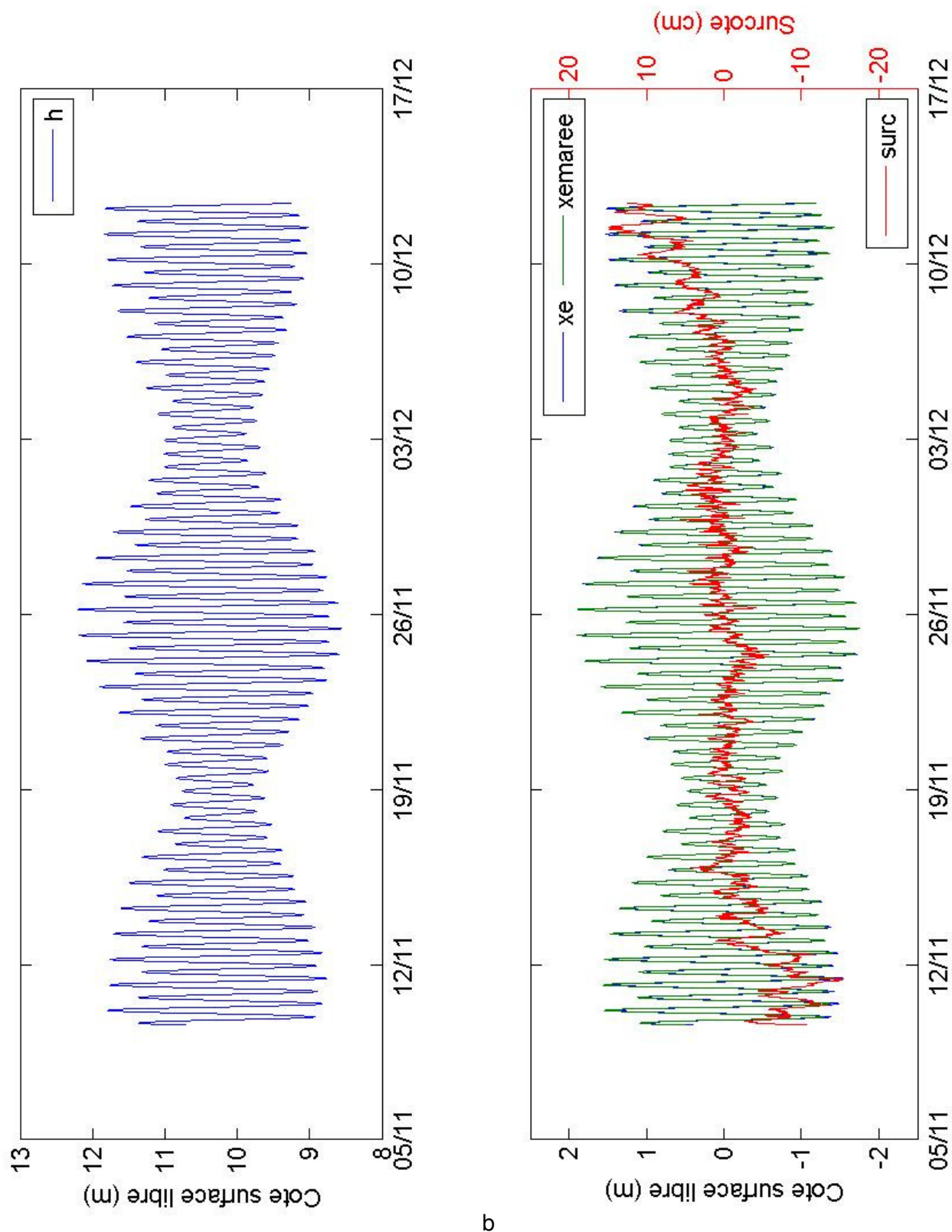


Illustration 94 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre ($xemaree$) et $surcote$ ($surc$), capteur ossi 5 du 05/11 au 17/12/2007.

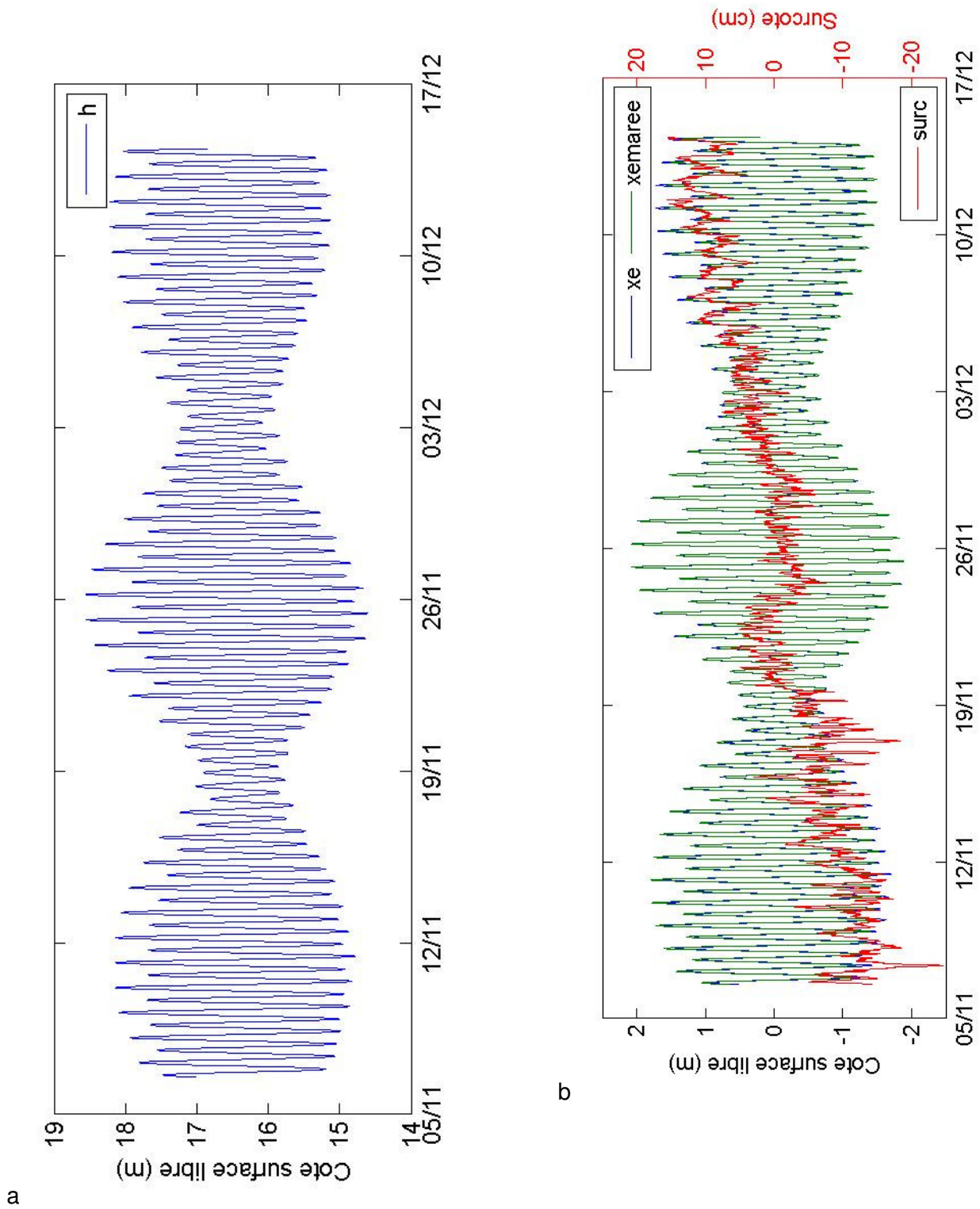


Illustration 95 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre ($xemaree$) et surcote ($surc$), capteur aquadopp 1b du 05/11 au 17/12/2007

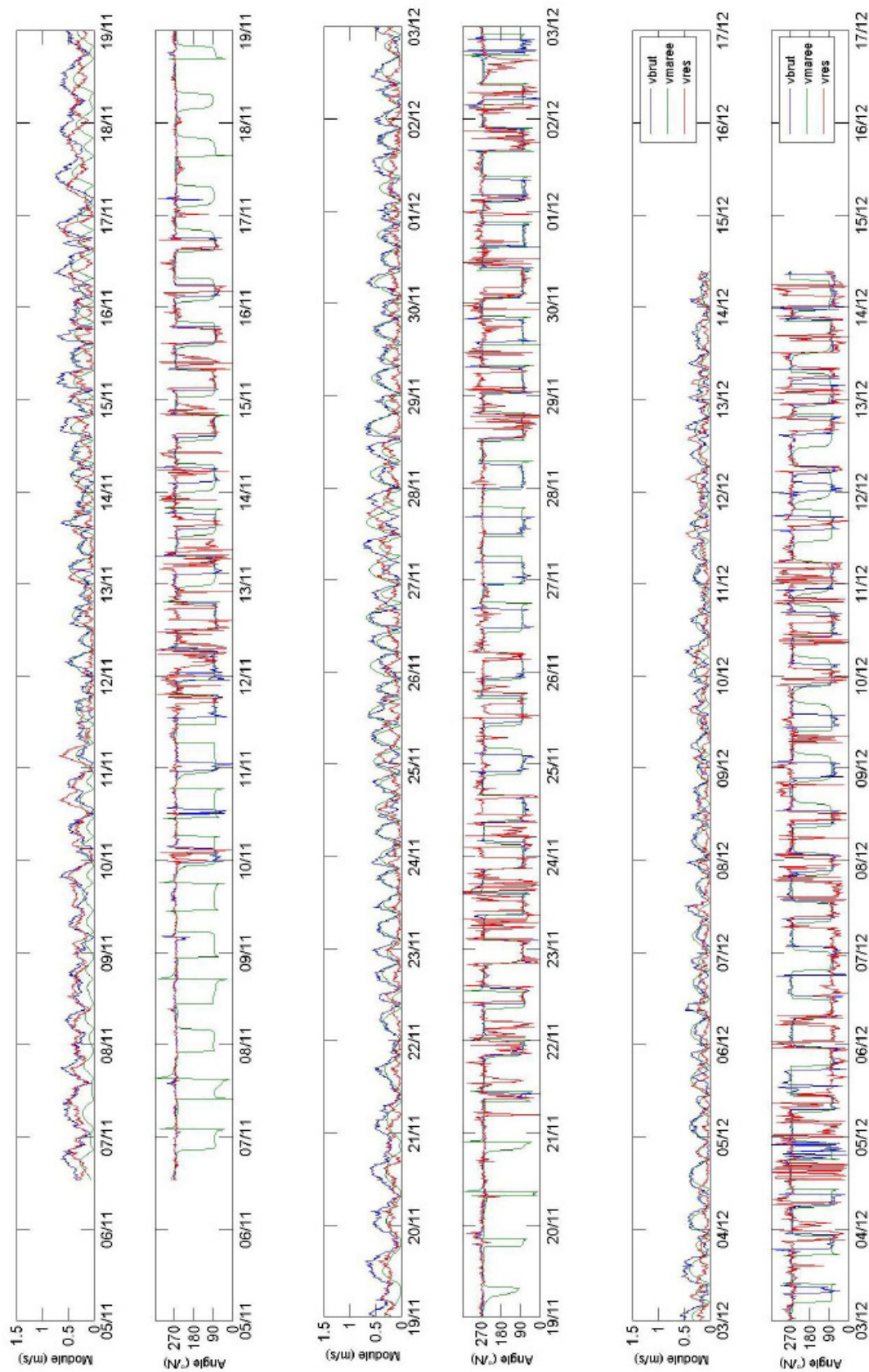


Illustration 96 – Vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vbrute), composante de marée de la vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vmaree) et vitesse de courant résiduelle ($v_{res}=v_{brut}-v_{maree}$), capteur aquadopp 1b du 5/11 au 17/12/2007

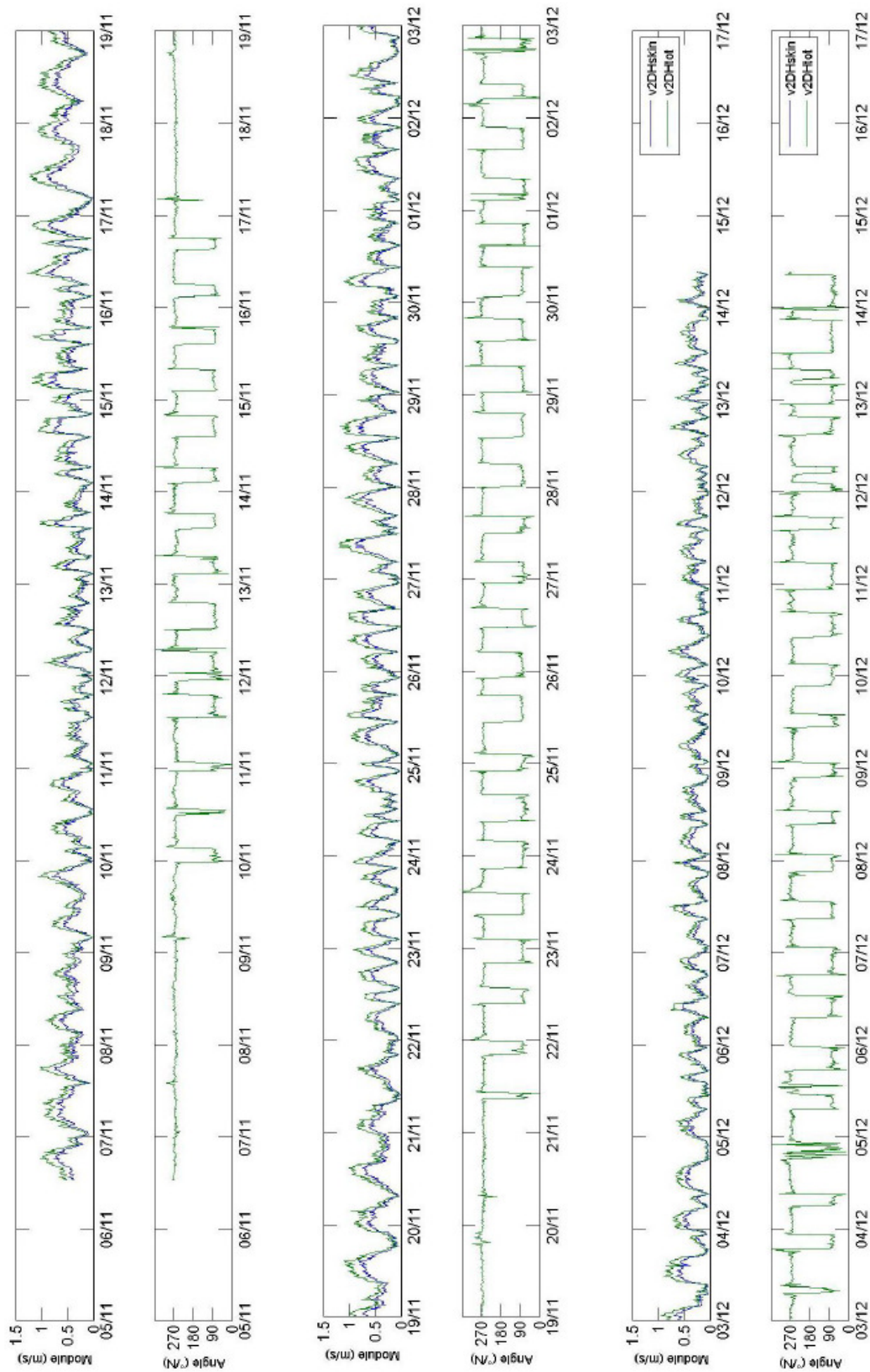


Illustration 97 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 1b du 5/11 au 17/12/2007. v2DHskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHtot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale)

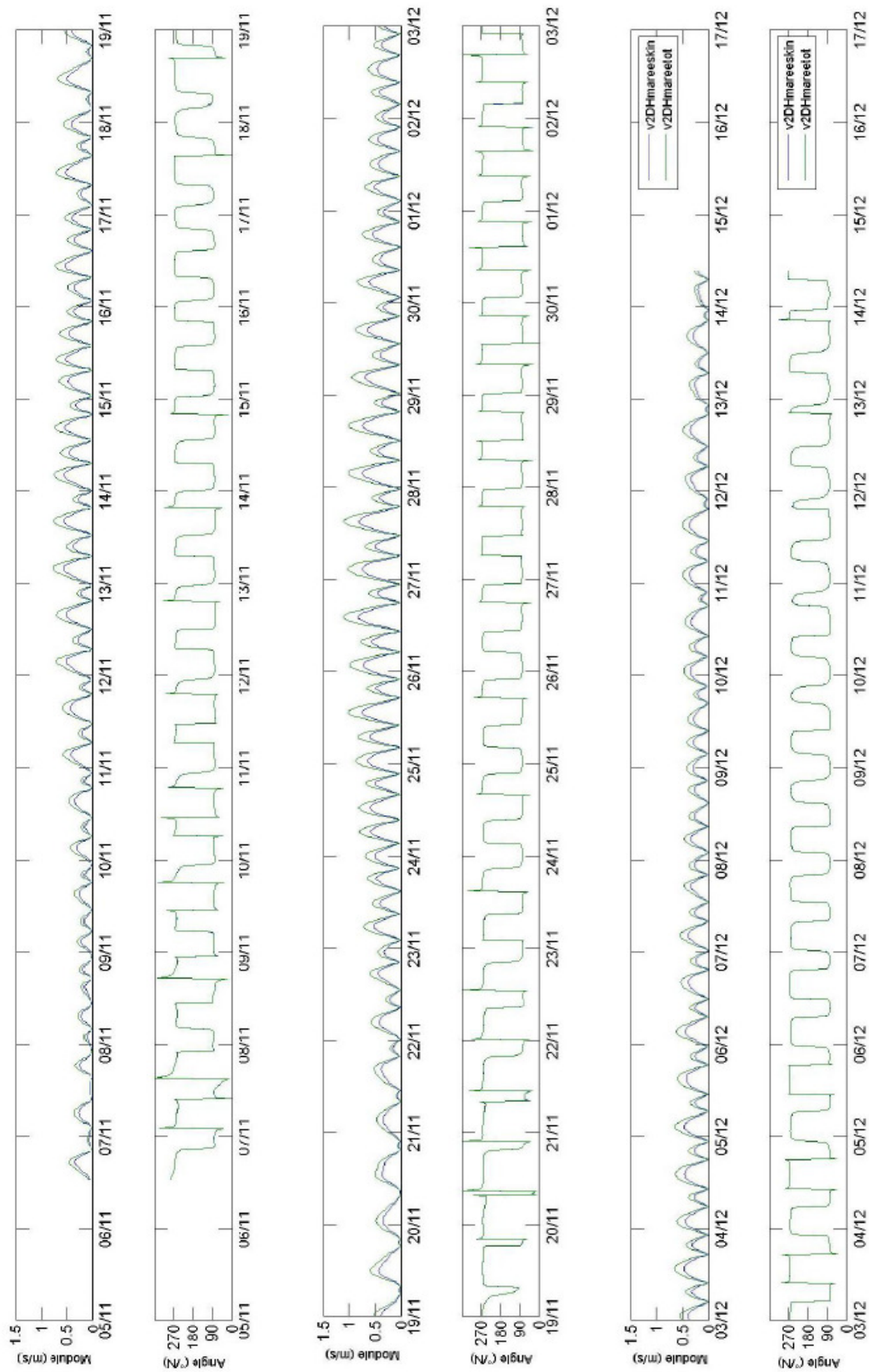


Illustration 98 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 1b du 5/11 au 17/12/2007. v2DHmareeskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHmareetot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).

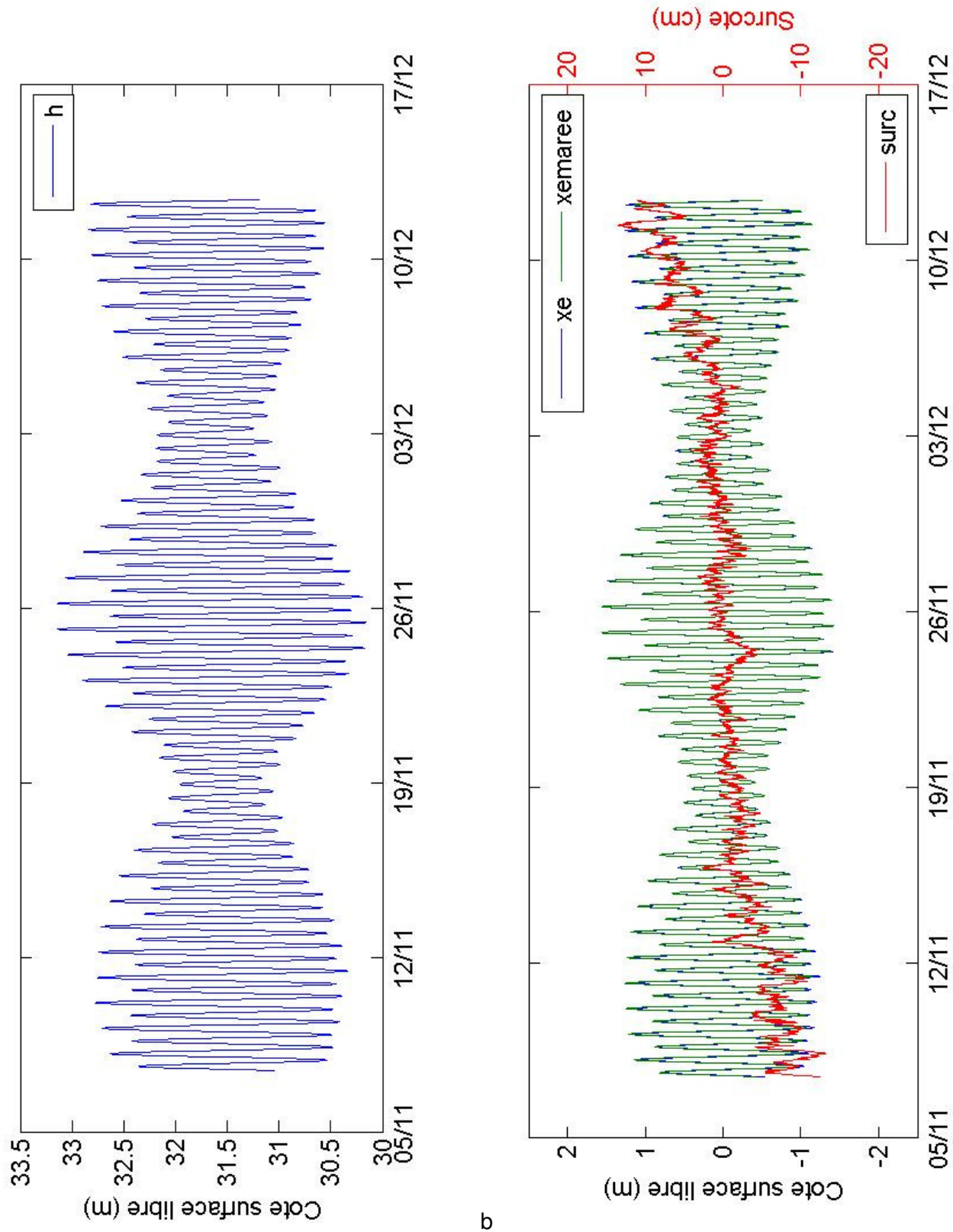


Illustration 99 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur aquadopp 6b du 05/11 au 17/12/200

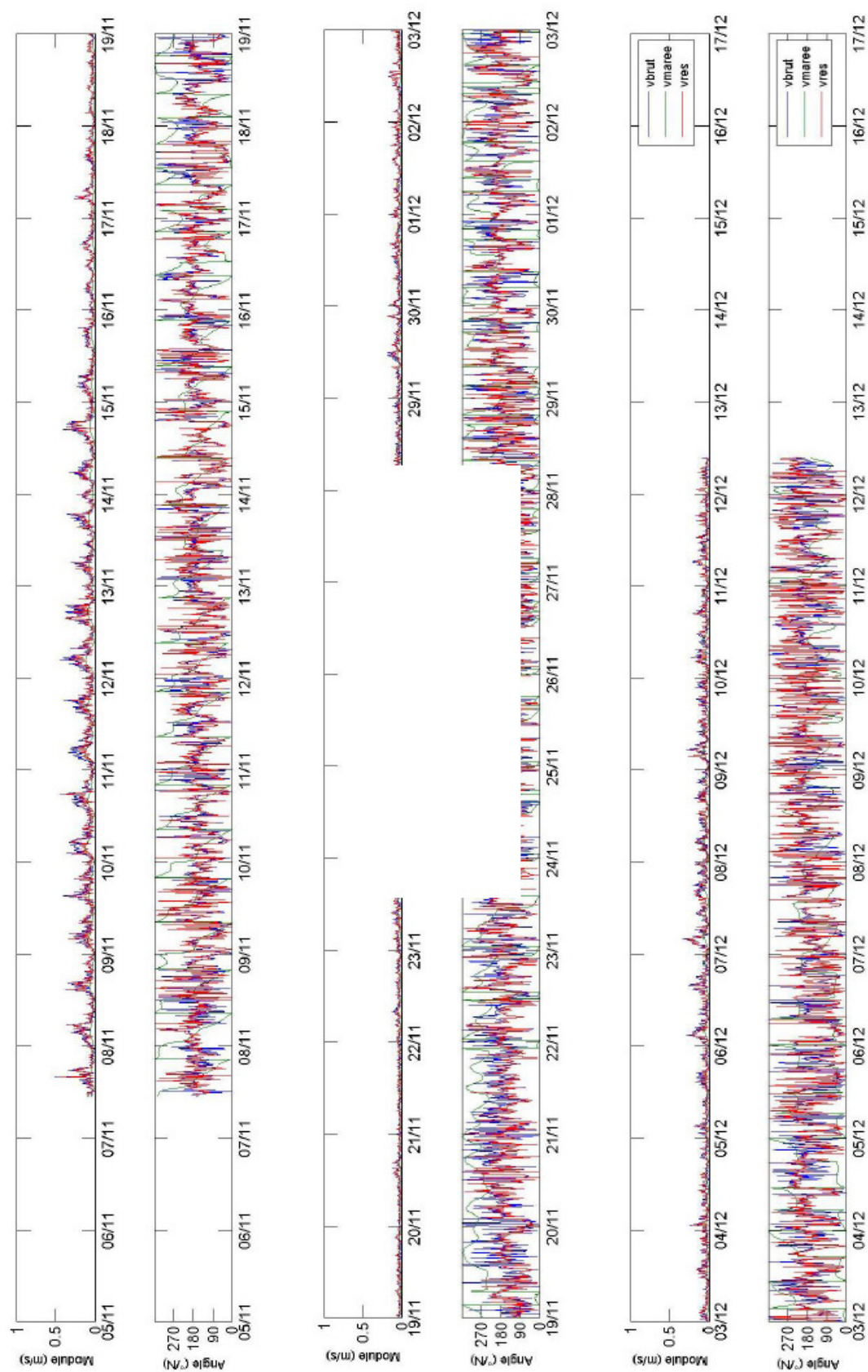


Illustration 100 – Vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vbrute), composante de marée de la vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vmaree) et vitesse de courant résiduelle ($v_{res} = v_{brut} - v_{maree}$), capteur aquadopp 6b du 5/11 au 17/12/2007.

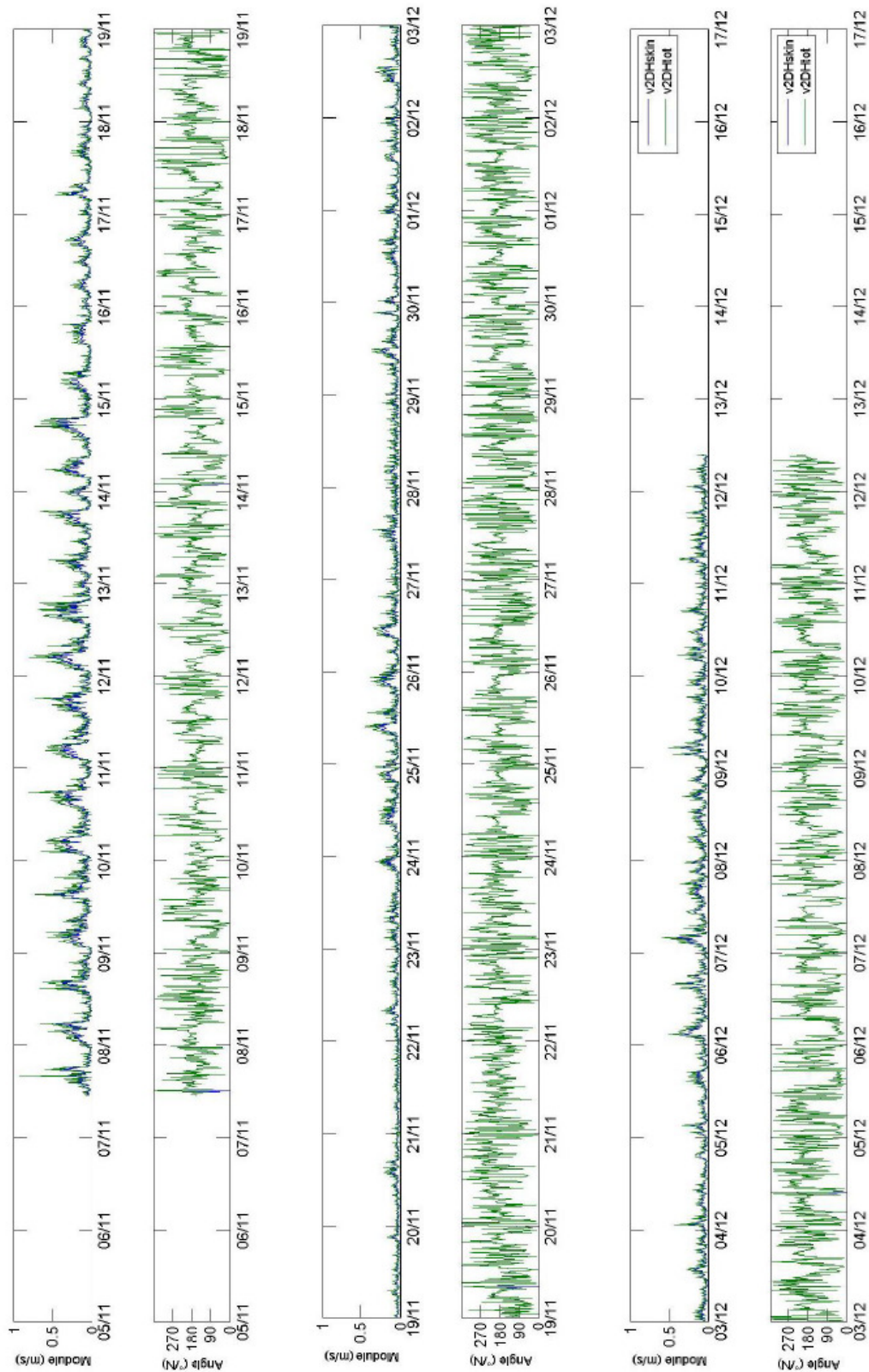


Illustration 101 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 6b du 5/11 au 17/12/2007. v2DHskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHtot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).

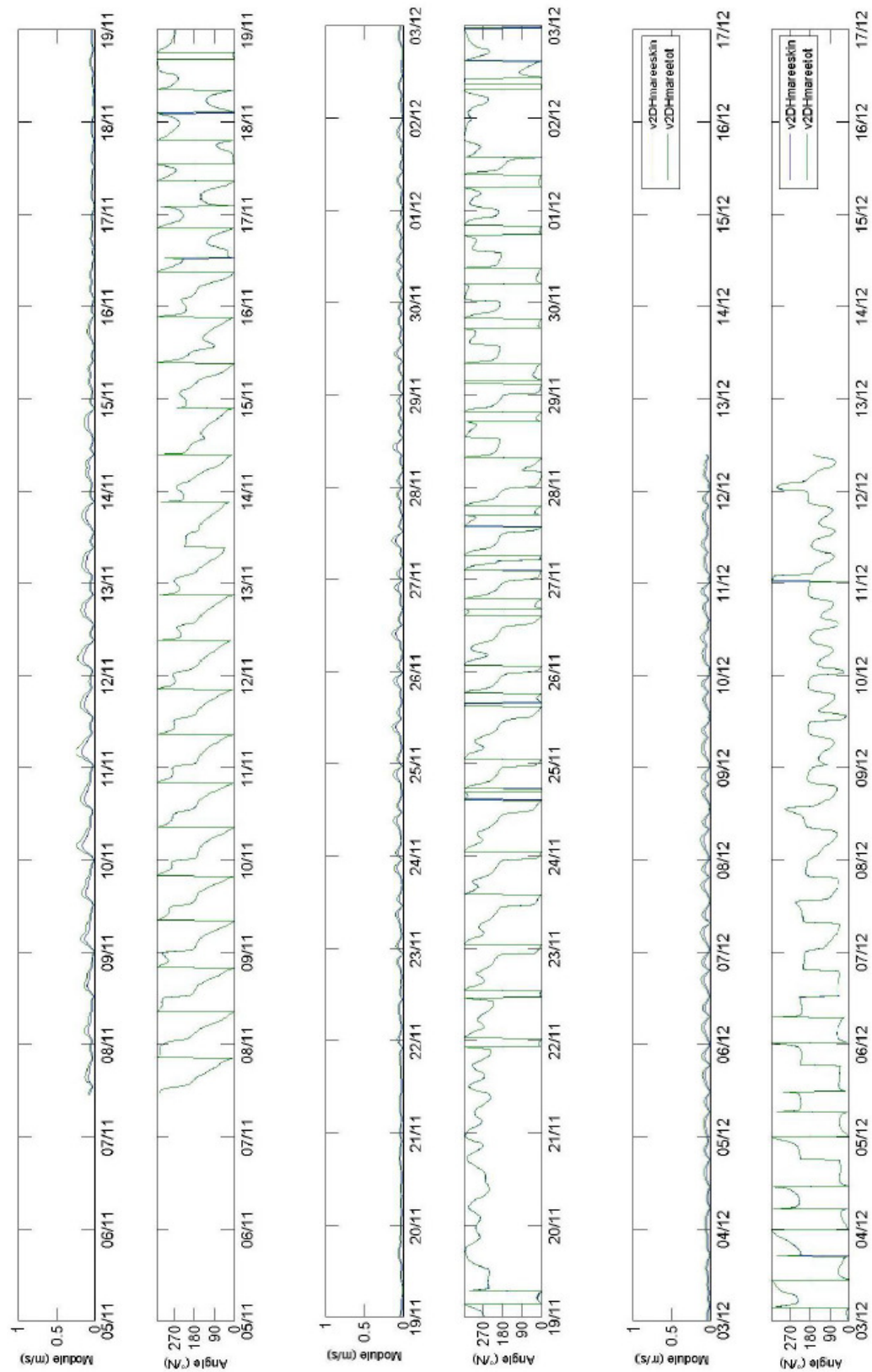


Illustration 102 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 6b du 5/11 au 17/12/2007. v2DHmareeskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHmareetot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).

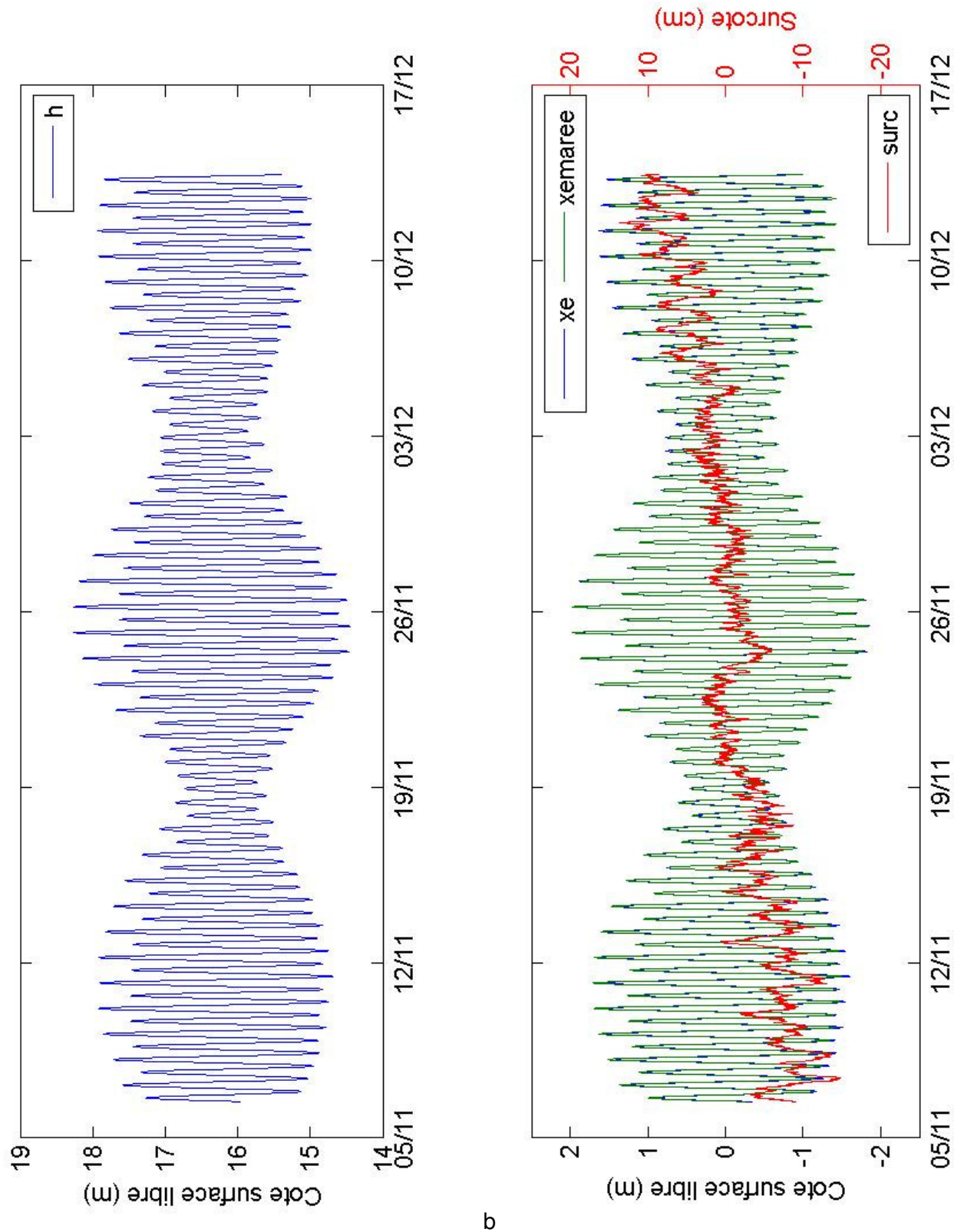


Illustration 103 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre (xemaree) et surcote (surc), capteur aquadopp 7b du 05/11 au 17/12/2007

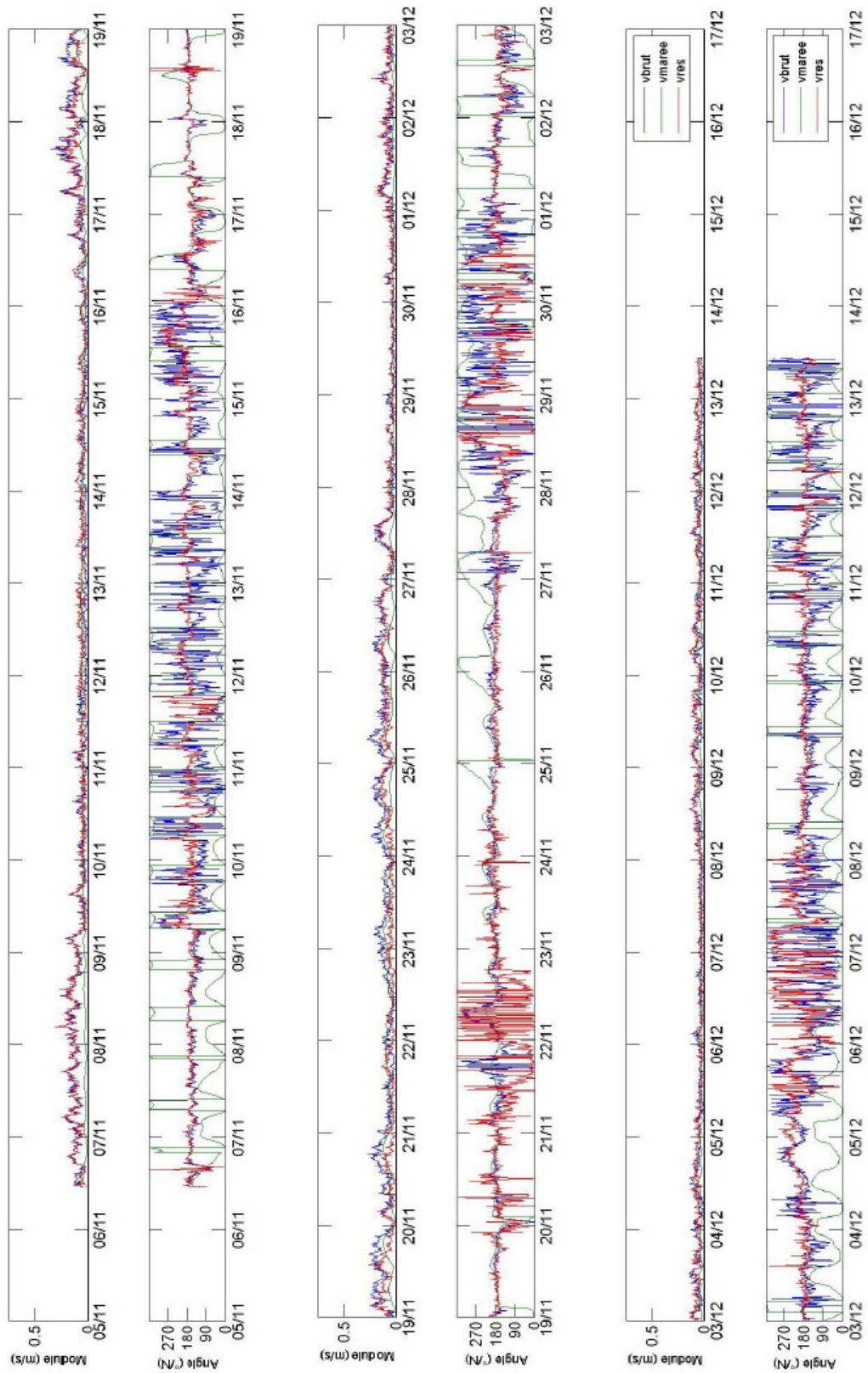


Illustration 104 – Vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vbrute), composante de marée de la vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vmaree) et vitesse de courant résiduelle ($v_{res}=v_{brut}-v_{maree}$), capteur aquadopp 7b du 5/11 au 17/12/2007.

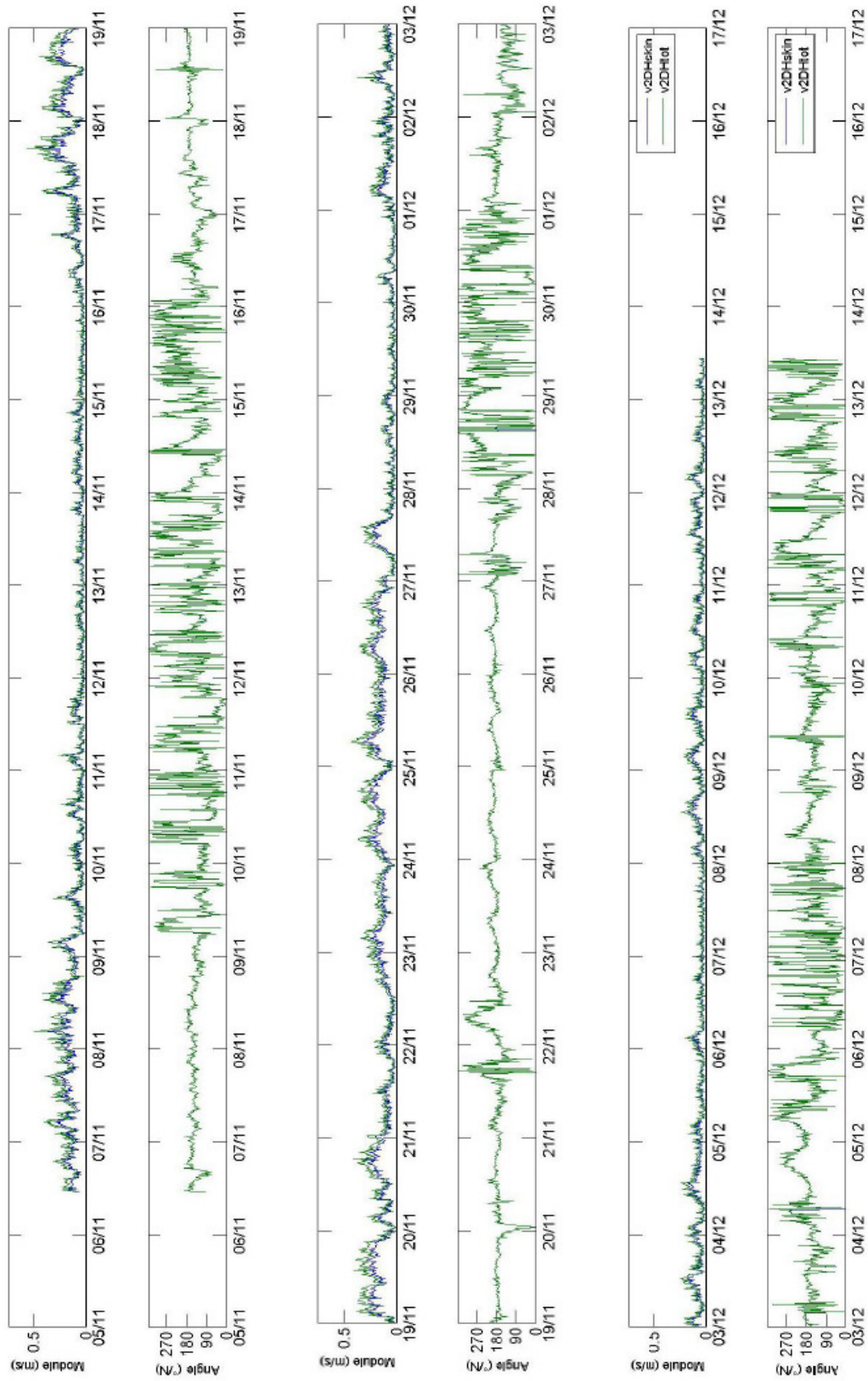


Illustration 105 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 7b du 5/11 au 17/12/2007. v2DHskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $ks = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHtot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $ks = 1.25$ m (rugosité totale).

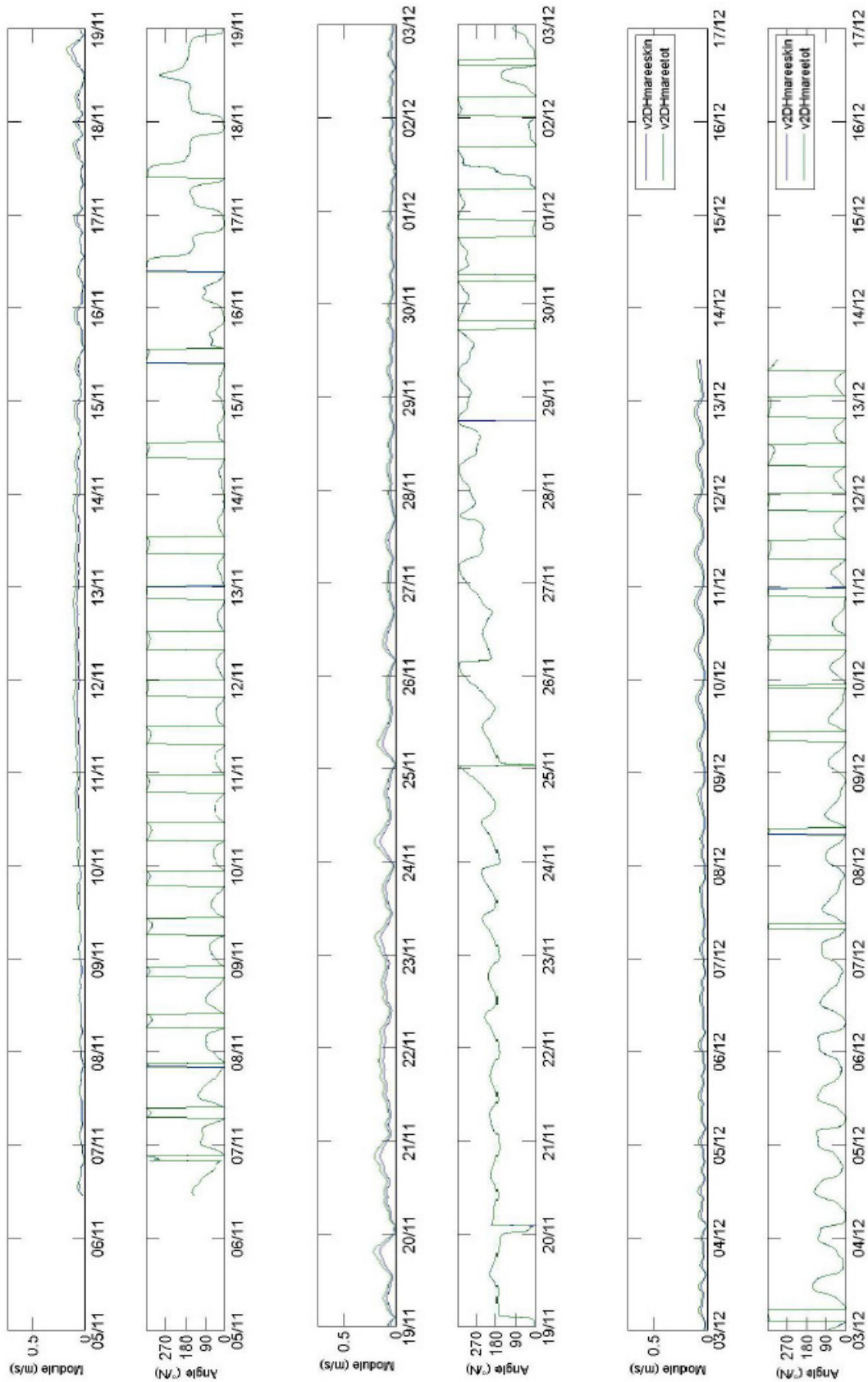


Illustration 106 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 7b du 5/11 au 17/12/2007. v2DHmareeskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHmareetot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).

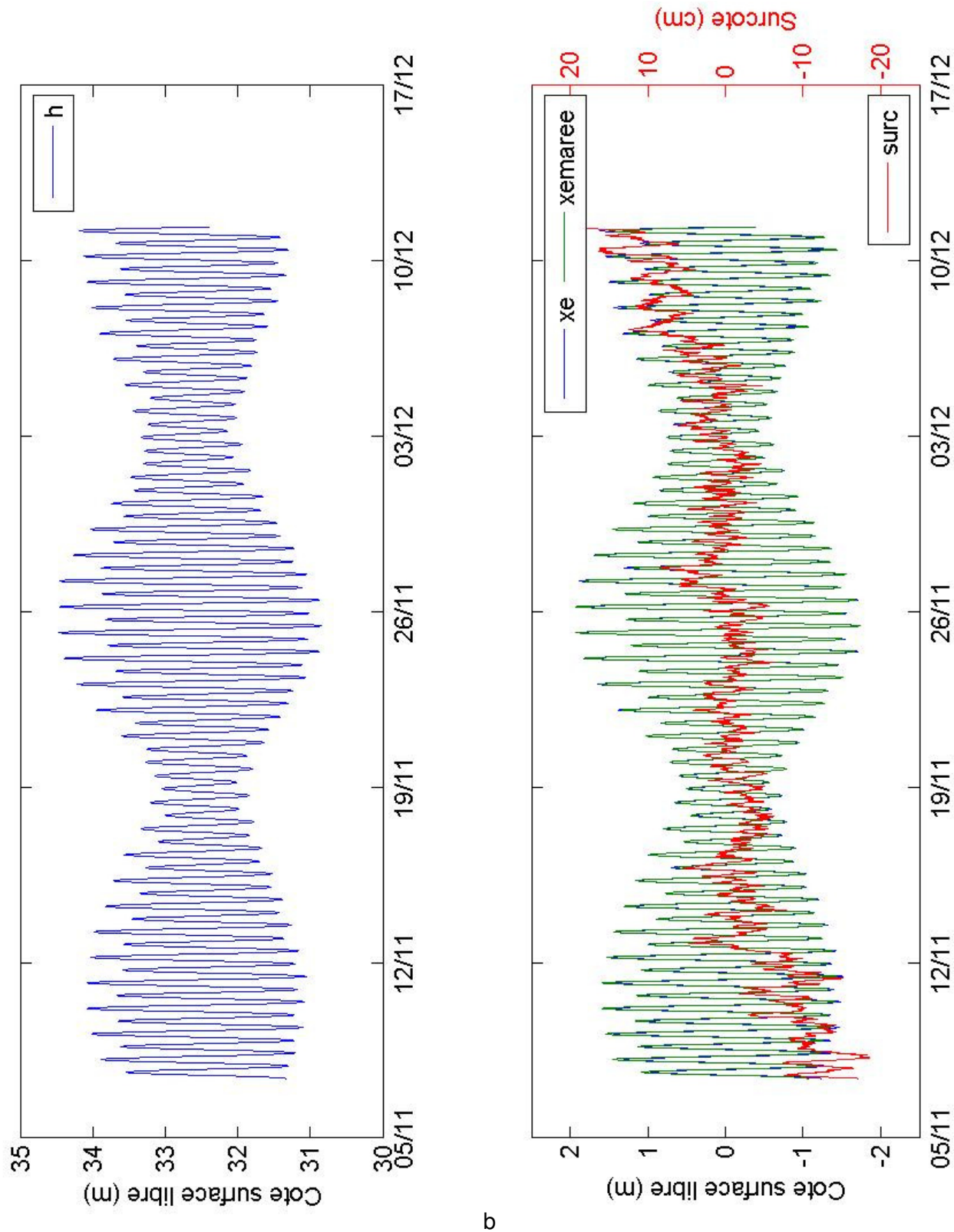


Illustration 107 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre ($xemaree$) et $surcote$ ($surc$), capteur aquadopp 9 du 05/11 au 17/12/2007

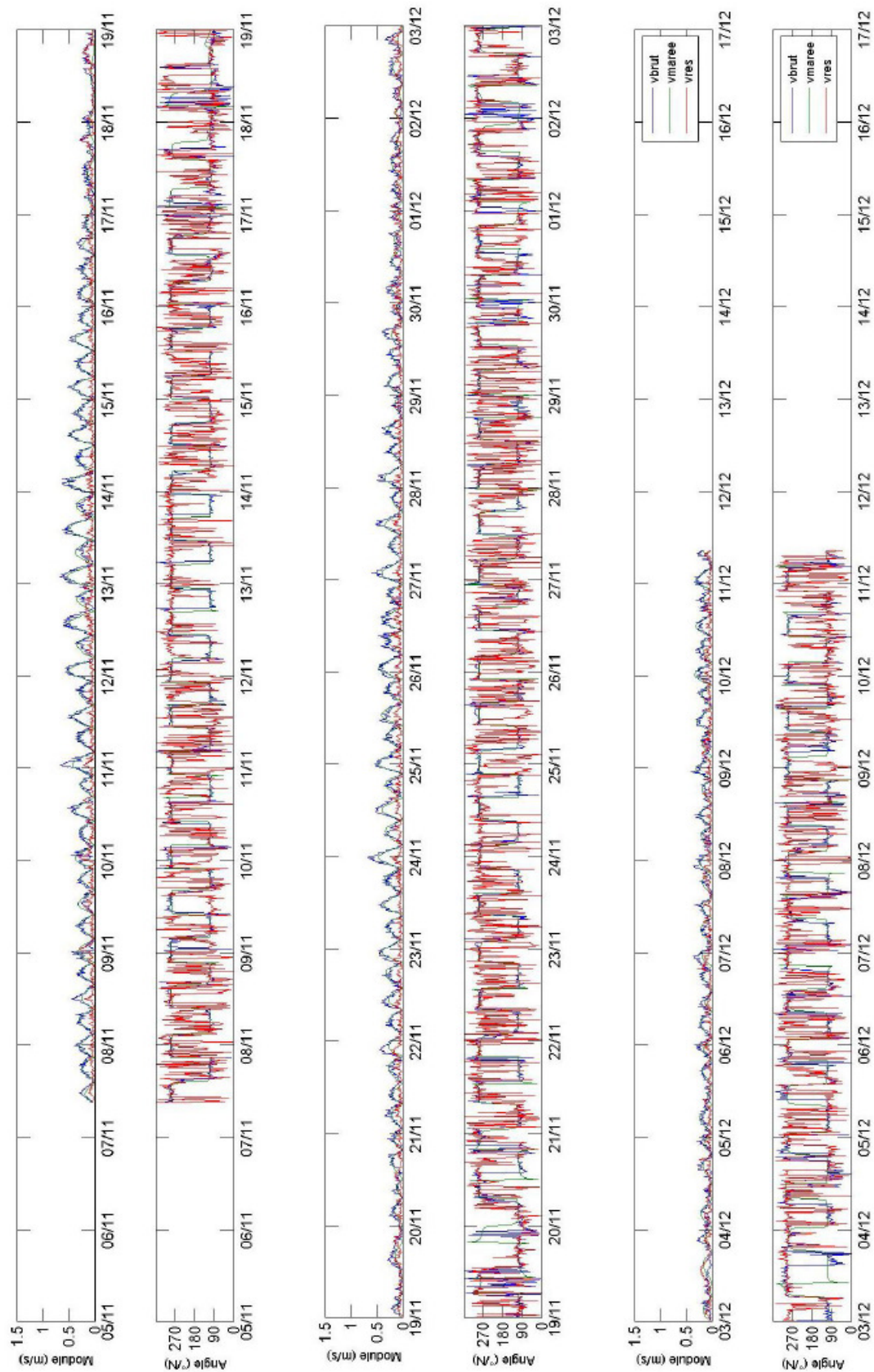


Illustration 108 – Vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vbrute), composante de marée de la vitesse de courant mesurée à 1,05 m du fond (vmaree) et vitesse de courant résiduelle ($vres = vbrut - vmaree$), capteur aquadopp 9 du 5/11 au 17/12/2007.

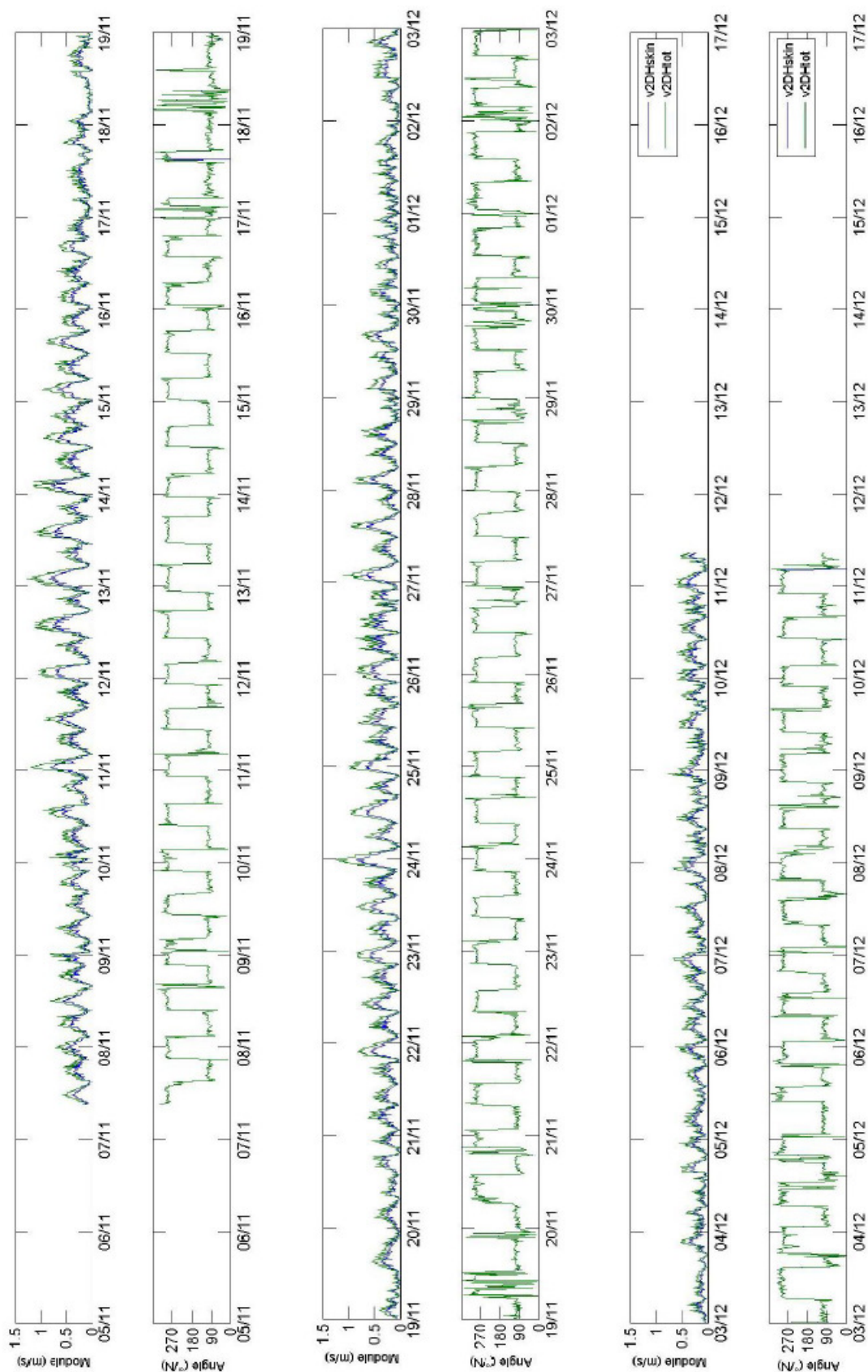


Illustration 109 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 9 du 5/11 au 17/12/2007. v2DHskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHtot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).

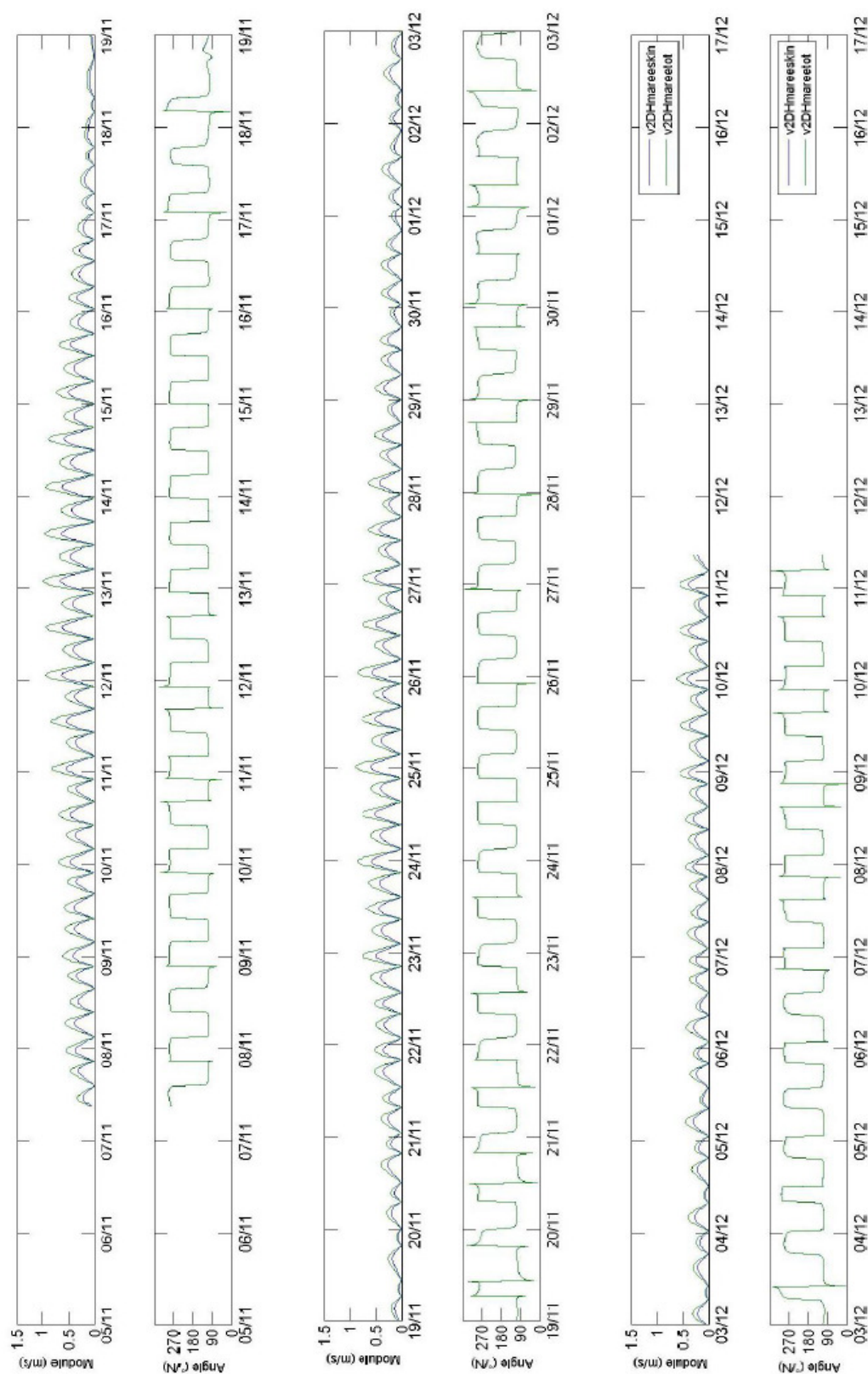


Illustration 110 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur aquadopp 9 du 5/11 au 17/12/2007.
v2DHmareeskin : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 0,0006$ m (rugosité de peau). v2DHmareetot : vitesse calculée en supposant une rugosité de fond $k_s = 1.25$ m (rugosité totale).

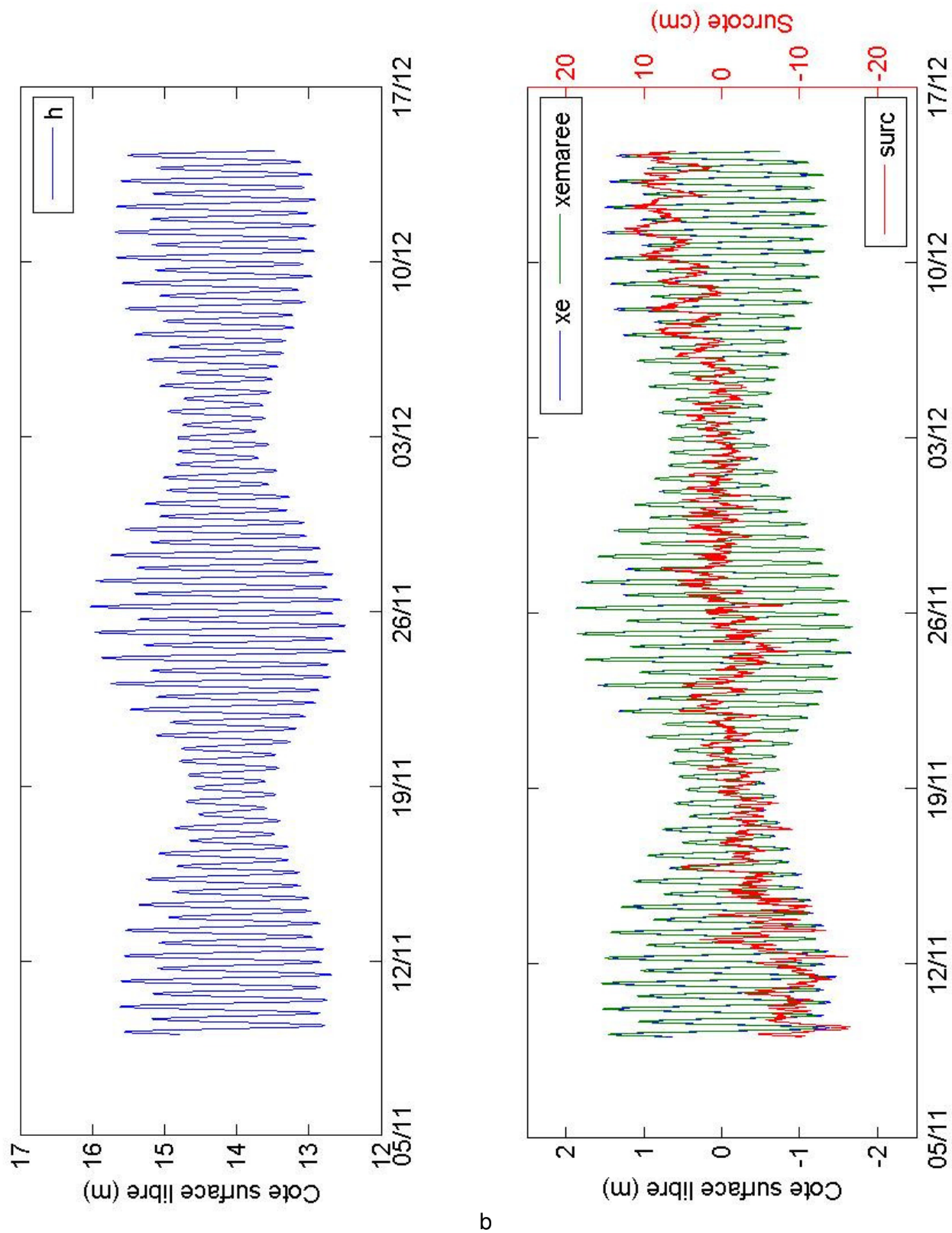


Illustration 111 – a : Hauteur d'eau (h), b : cote de surface libre (xe) composante de marée de la cote de surface libre ($xemaree$) et surcote ($surc$), capteur ADCP 4b du 05/11 au 17/12/200

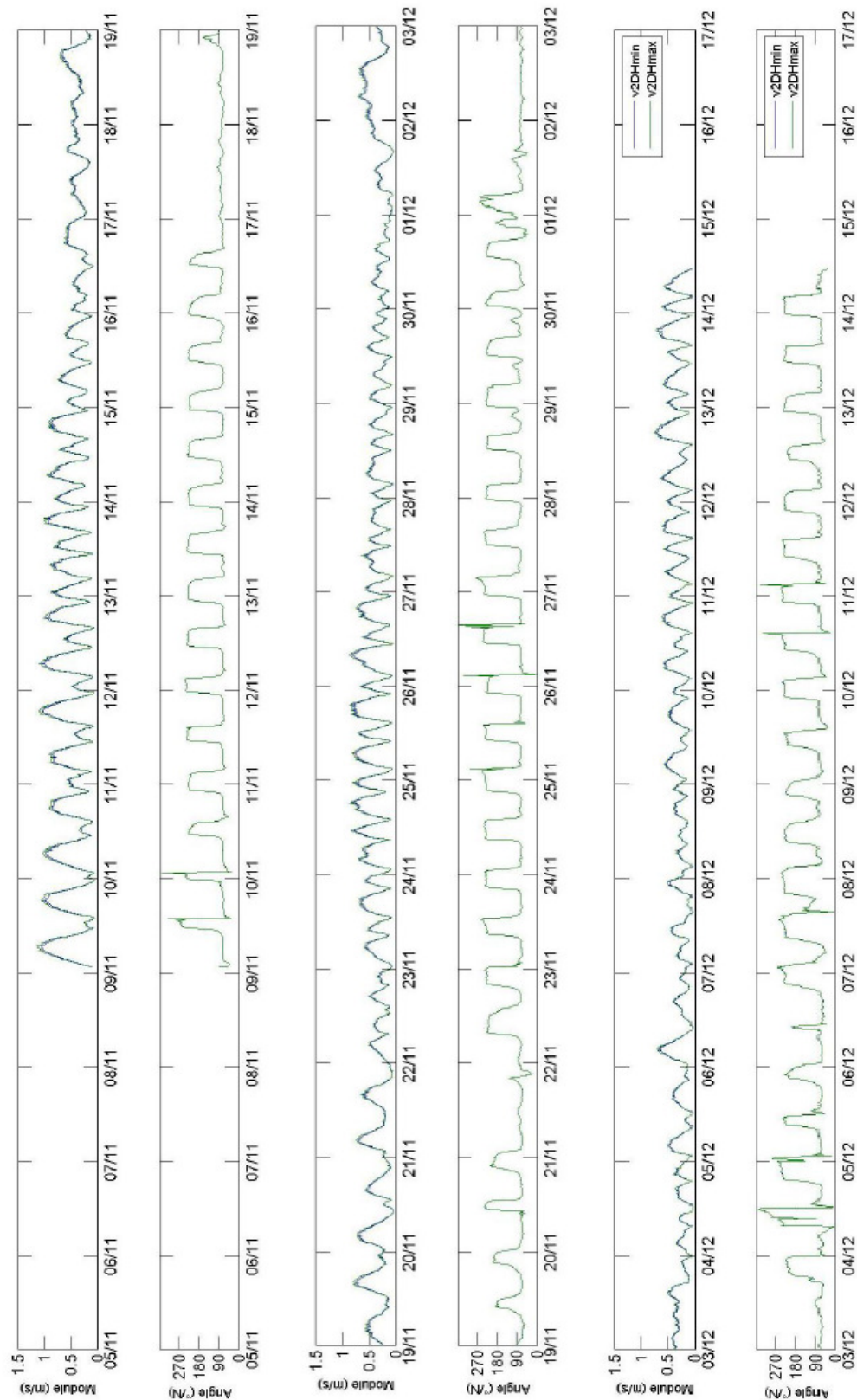


Illustration 112 – Vitesse de courant intégrée sur la verticale, capteur ADCP 4b du 5/11 au 17/12/2007.
 v2DHmin : vitesse calculée en minimisant la vitesse du courant de 0 à 1,73 m au dessus du fond par 0 m/s. v2DHmax : vitesse calculée en maximisant la vitesse du courant de 0 à 1,73 m au dessus du fond par $v(1,73 < z < 2,73)$.

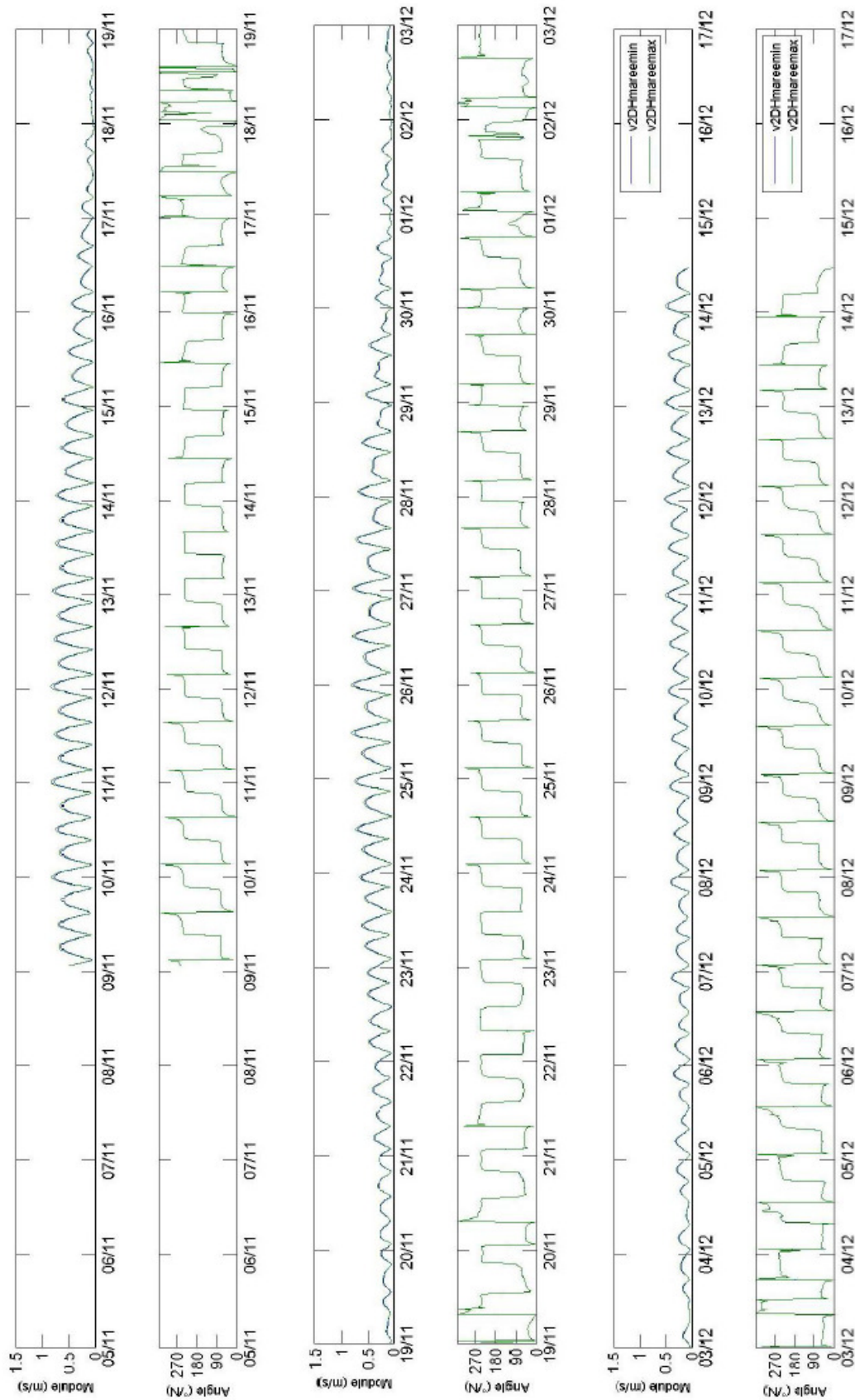


Illustration 113 – Vitesse de courant de marée intégrée sur la verticale, capteur ADCP 4b du 5/11 au 17/12/2007.
 v2DHmin : vitesse calculée en minimisant la vitesse du courant de 0 à 1,73 m au dessus du fond par 0 m/s. v2DHmax

: vitesse calculée en maximisant la vitesse du courant de 0 à 1,73 m au dessus du fond par $v(1,73 < z < 2,73)$.

Annexe 3

Définition des erreurs

Cette annexe regroupe la définition des erreurs dans le cas de la représentation numérique d'une grandeur physique variable dans l'espace et le temps.

Soit une grandeur physique $X(t)$, variable dans le temps, dont sont faites n observations notées $(x(t_i))_{i=1,n}$.

Le choix d'un estimateur de cette grandeur, noté $\theta(t)$, permet d'avoir accès aux estimations de la grandeur X aux différents instants de mesure. Ces estimations sont notées $(\theta(t_i))_{i=1,n}$.

A un instant t donné, l'écart entre les deux valeurs que l'on veut comparer (X et θ) peut être définie de plusieurs façons :

- Erreur (notée $E(t)$) : différence entre $x(t)$ et $\theta(t)$

$$E(t) = x(t) - \theta(t)$$

- Erreur absolue (notée $EA(t)$) : valeur absolue de la différence entre $x(t)$ et $\theta(t)$

$$EA(t) = |x(t) - \theta(t)|$$

- Erreur relative (en %) : erreur absolue normée par la valeur absolue de $x(t)$

$$ER(t) = \frac{EA(t)}{|x(t)|} = \frac{|x(t) - \theta(t)|}{|x(t)|}$$

- Erreur quadratique (square error en anglais) : carré de l'erreur

$$SE(t) = E(t)^2 = |x(t) - \theta(t)|^2$$

Si l'on considère maintenant l'ensemble des valeurs observées $(x(t_i))_{i=1,n}$ et l'ensemble des estimations $(\theta(t_i))_{i=1,n}$, on peut à partir de ces données quantifier la qualité de l'estimateur grâce à différents indicateurs :

- Le biais de l'estimateur correspond à la différence entre les espérances de la mesure et de l'estimateur, c'est-à-dire également l'espérance de l'erreur. Dans le cas discret de n observations, cette espérance est estimée par :

$$Biais = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} x(t_i) - \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} \theta(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} E(t_i)$$

- L'erreur maximale : maximum atteint par l'erreur absolue pour les n estimations

$$\Delta_{\max} = \max(EA(t_i))_{i=1,n}$$

- L'erreur absolue moyenne correspond à la moyenne des erreurs absolues pour les n estimations

$$\Delta_{moyenne} = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} EA(t_i)$$

- La variance de l'erreur (ou écart type au carré) donne une estimation de l'étalement de l'erreur autour de sa valeur moyenne :

$$Variance = \frac{1}{n} \sum_{i=1,n} (E(t_i) - Biais)^2$$

- La racine de l'erreur quadratique moyenne, notée RMS (Root mean square en anglais)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1,n} SE(t_i)} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1,n} (E(t_i))^2}$$

Ces indicateurs sont calculés sur un nombre fini d'observations. Ainsi ils ne représentent pas l'erreur réelle de l'estimateur mais sont eux-mêmes des estimateurs de cette erreur. Plus le nombre d'observations sera grand, plus les indicateurs d'erreur calculés correspondront à une erreur réelle de l'estimateur (loi des grands nombres).

Annexe 4

Validation du modèle : comparaison entre mesures et résultats du modèle

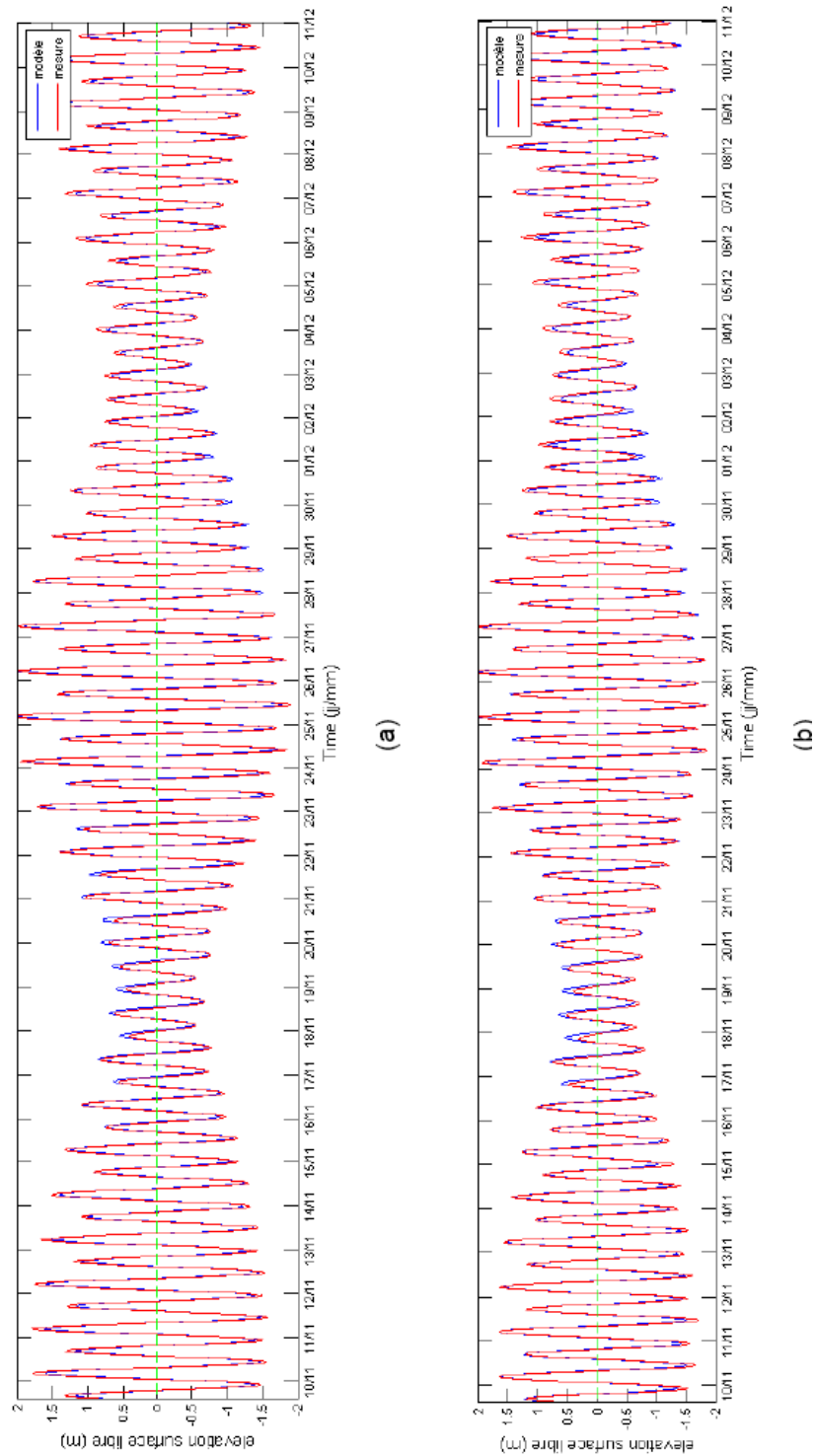


Illustration 114 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 1b : (a) signal de marée ; (b) signal total

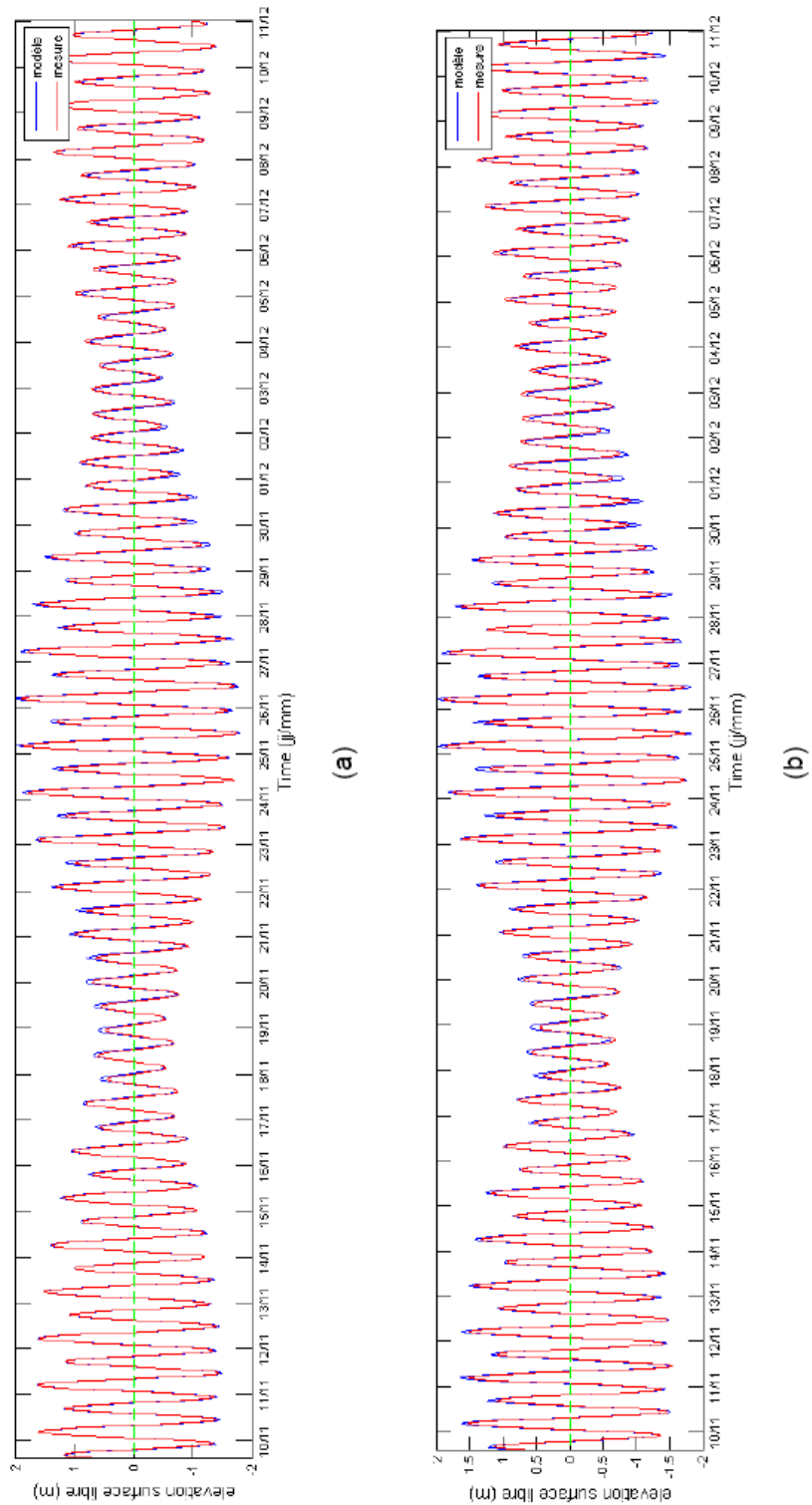


Illustration 115 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 2 : (a) signal de marée ; (b) signal total

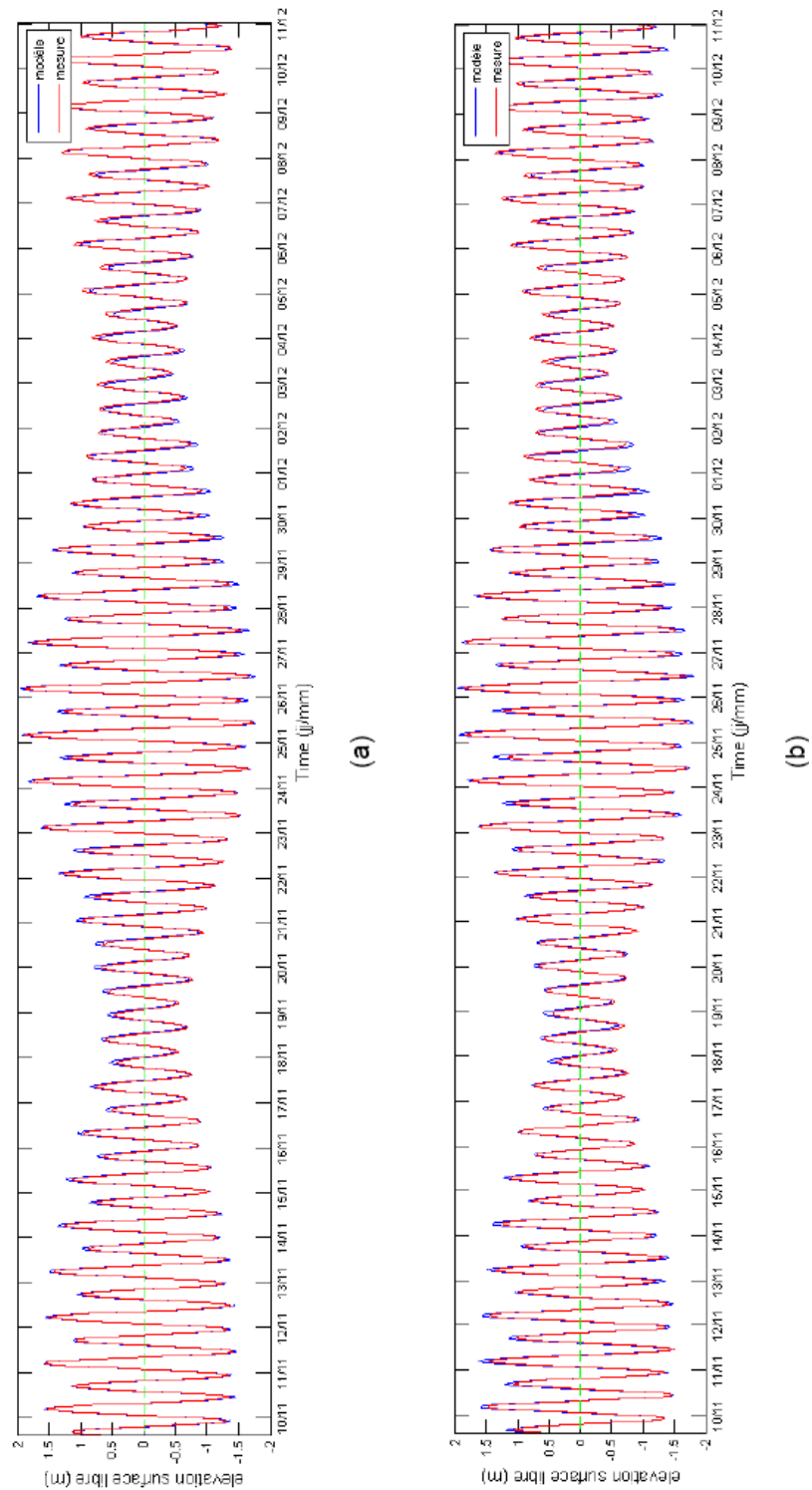


Illustration 116 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 4 : (a) signal de marée ; (b) signal total

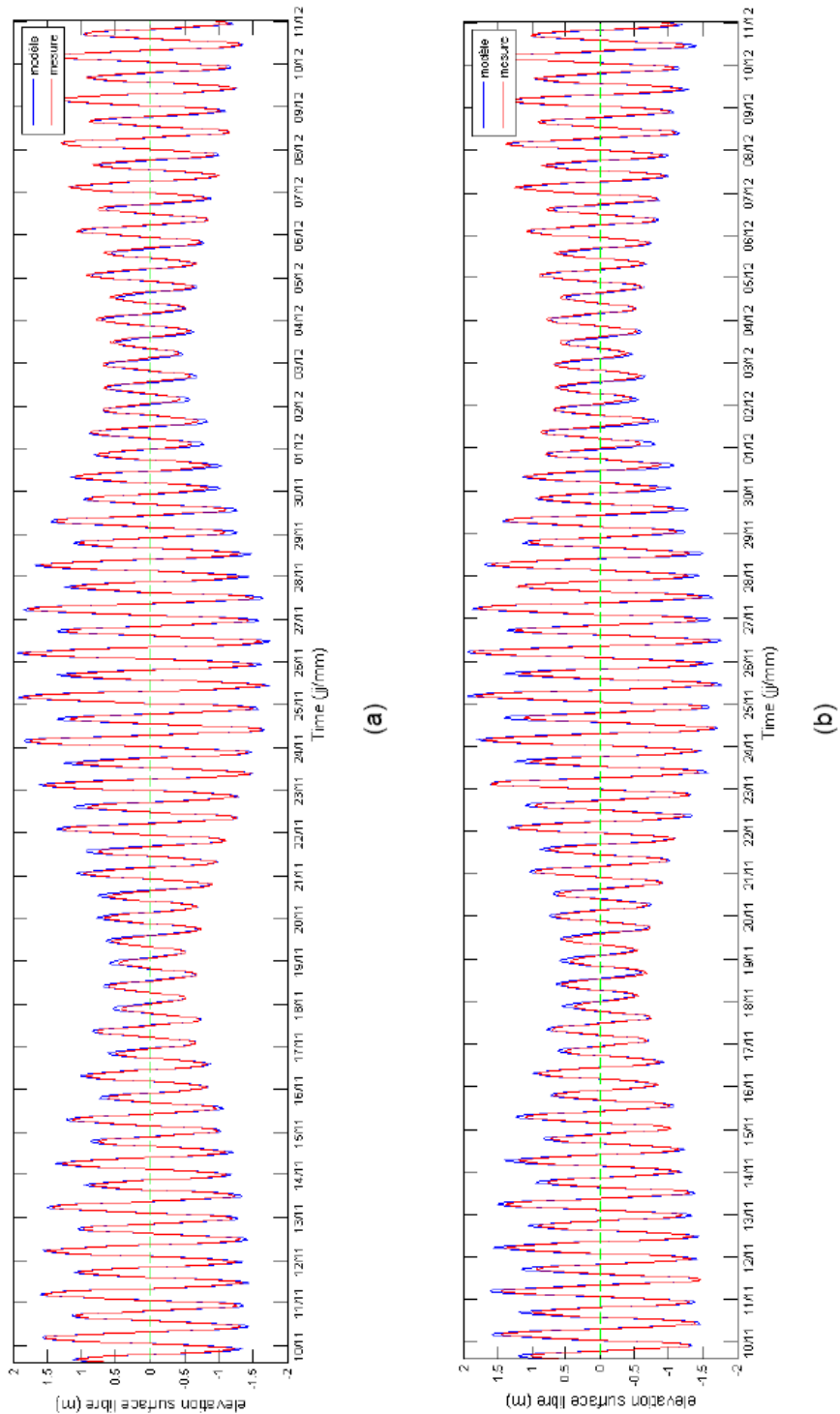


Illustration 117 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 4b : (a) signal de marée ; (b) signal total

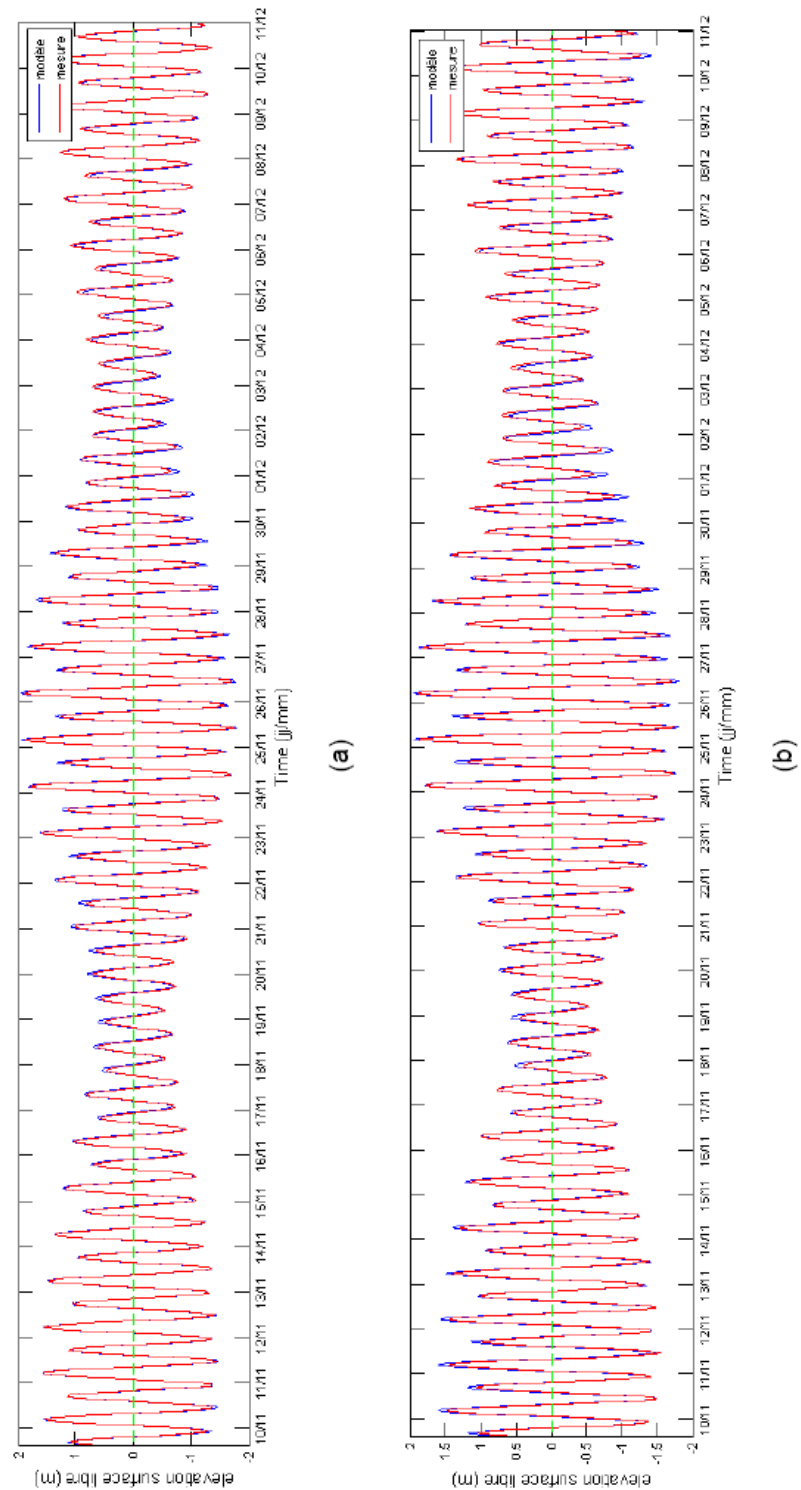


Illustration 118 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 5 : (a) signal de marée ; (b) signal total

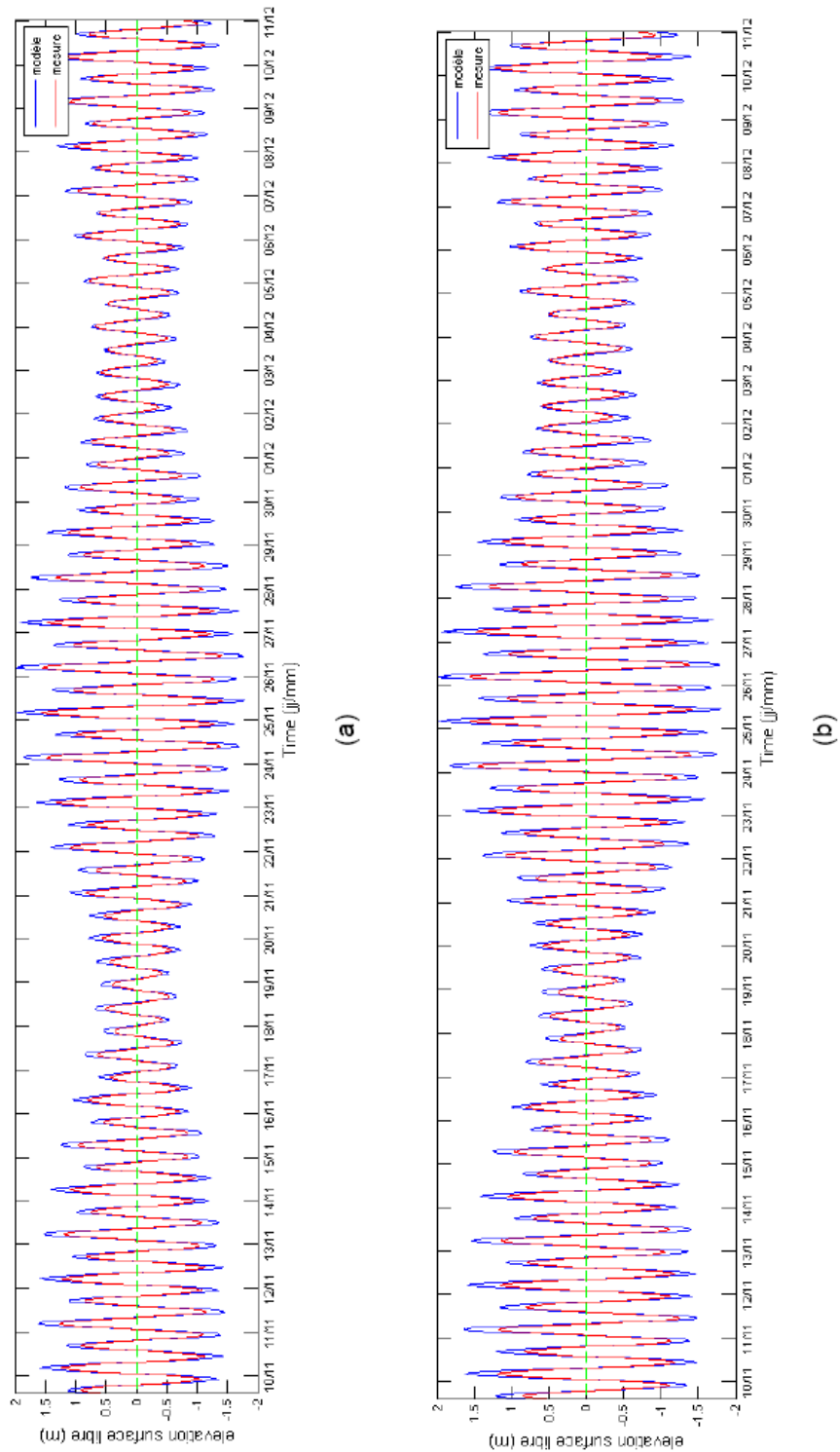


Illustration 119 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 6b : (a) signal de marée ; (b) signal total

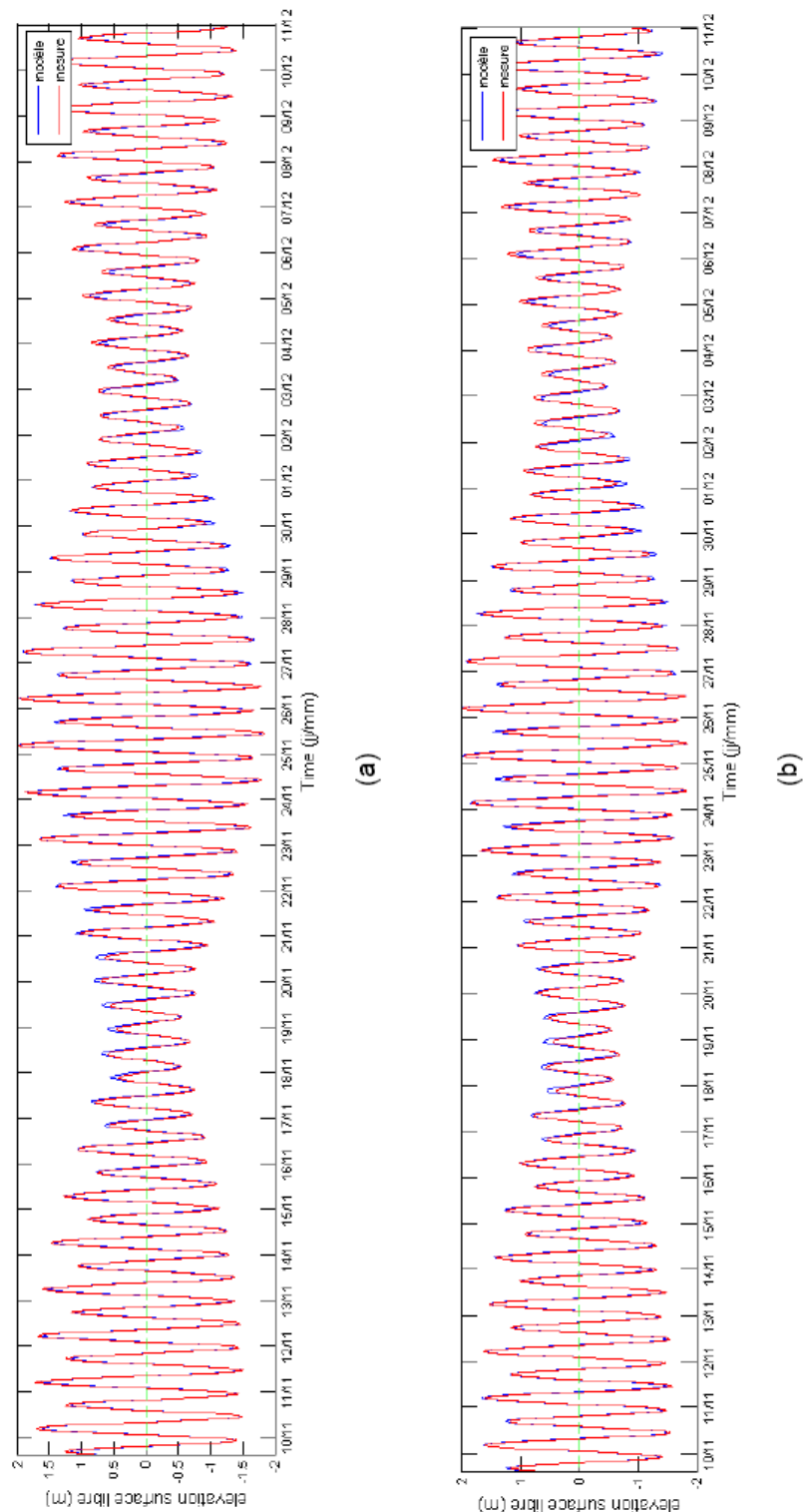


Illustration 120 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 7b : (a) signal de marée ; (b) signal total

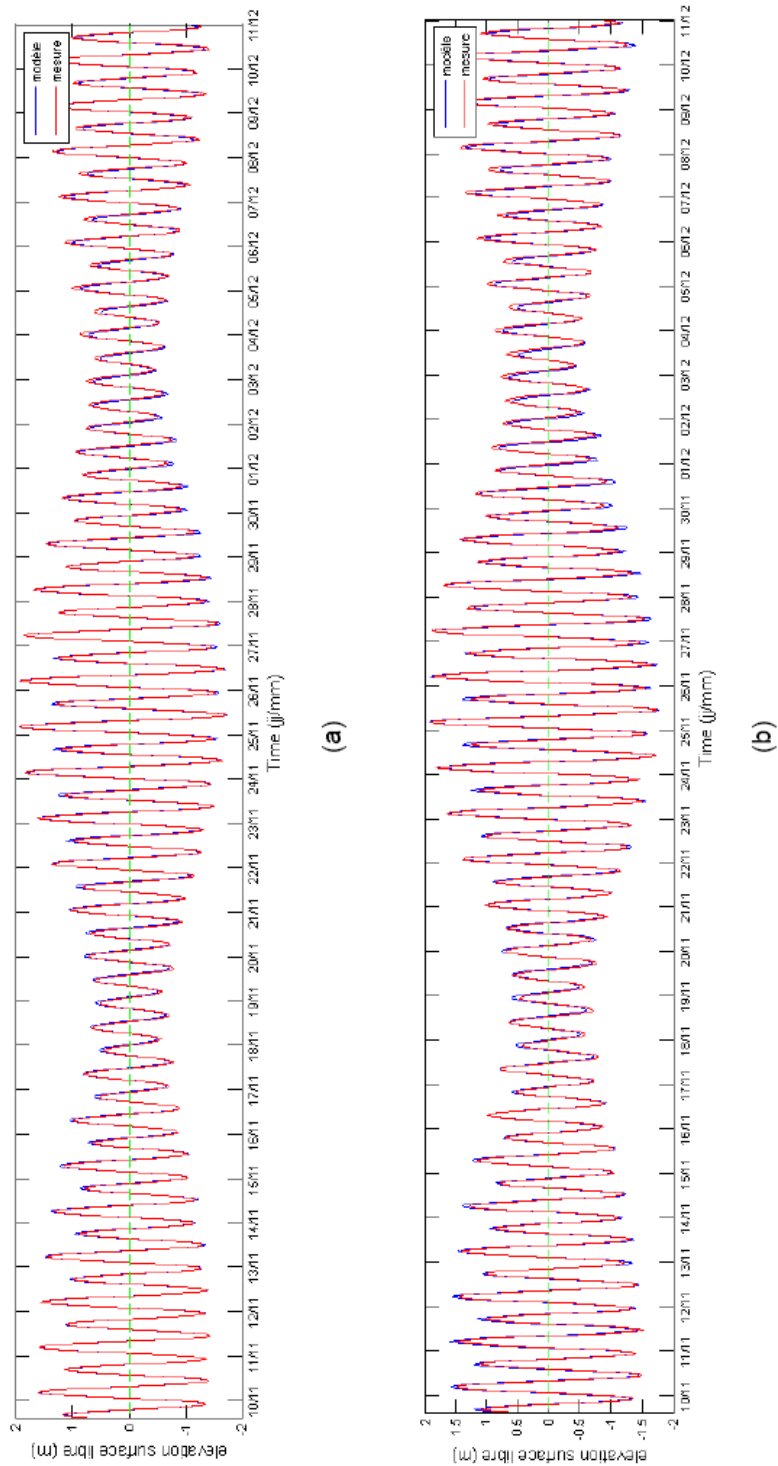


Illustration 121 - Cotes de surface libre – modèle et mesures au capteur 9 : (a) signal de marée ; (b) signal total

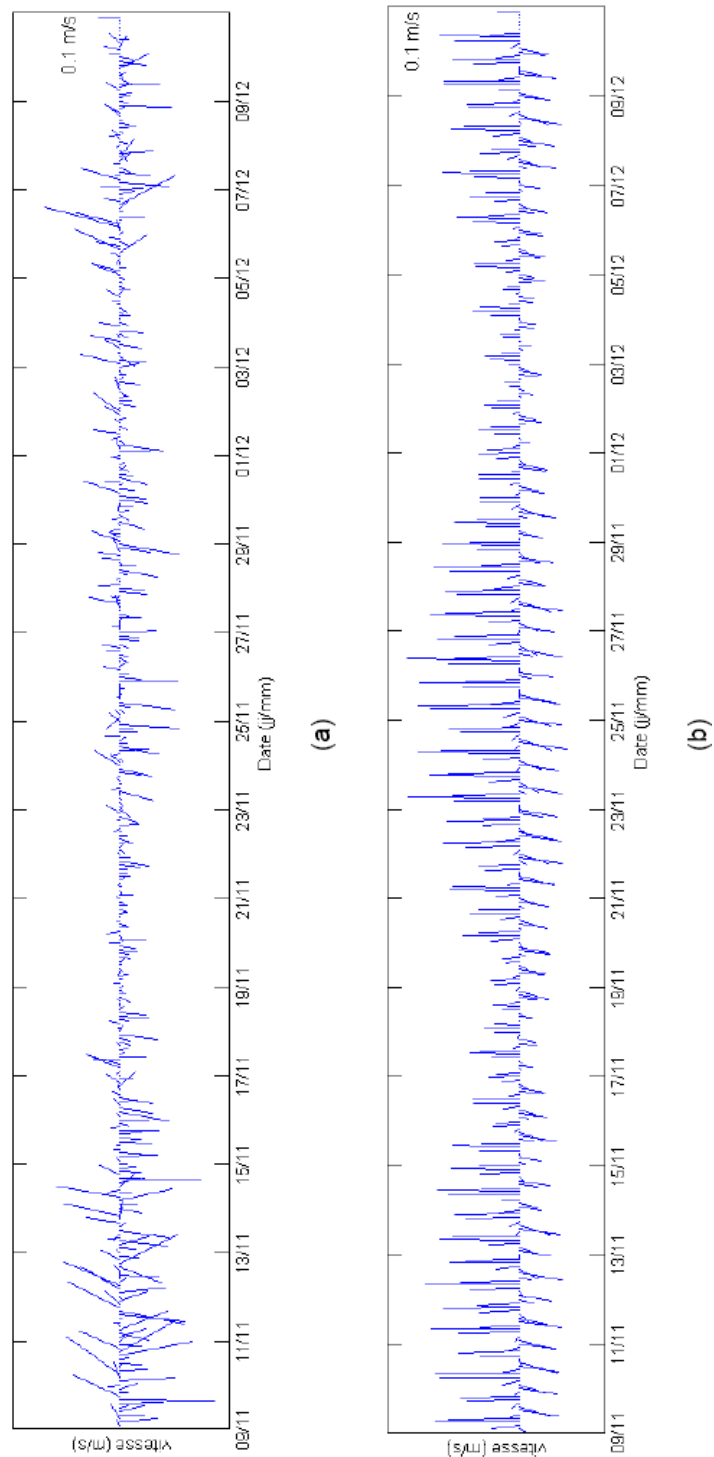


Illustration 122 - Vecteurs courant au capteur 6b – signal total : (a) mesure ; (b) modèle

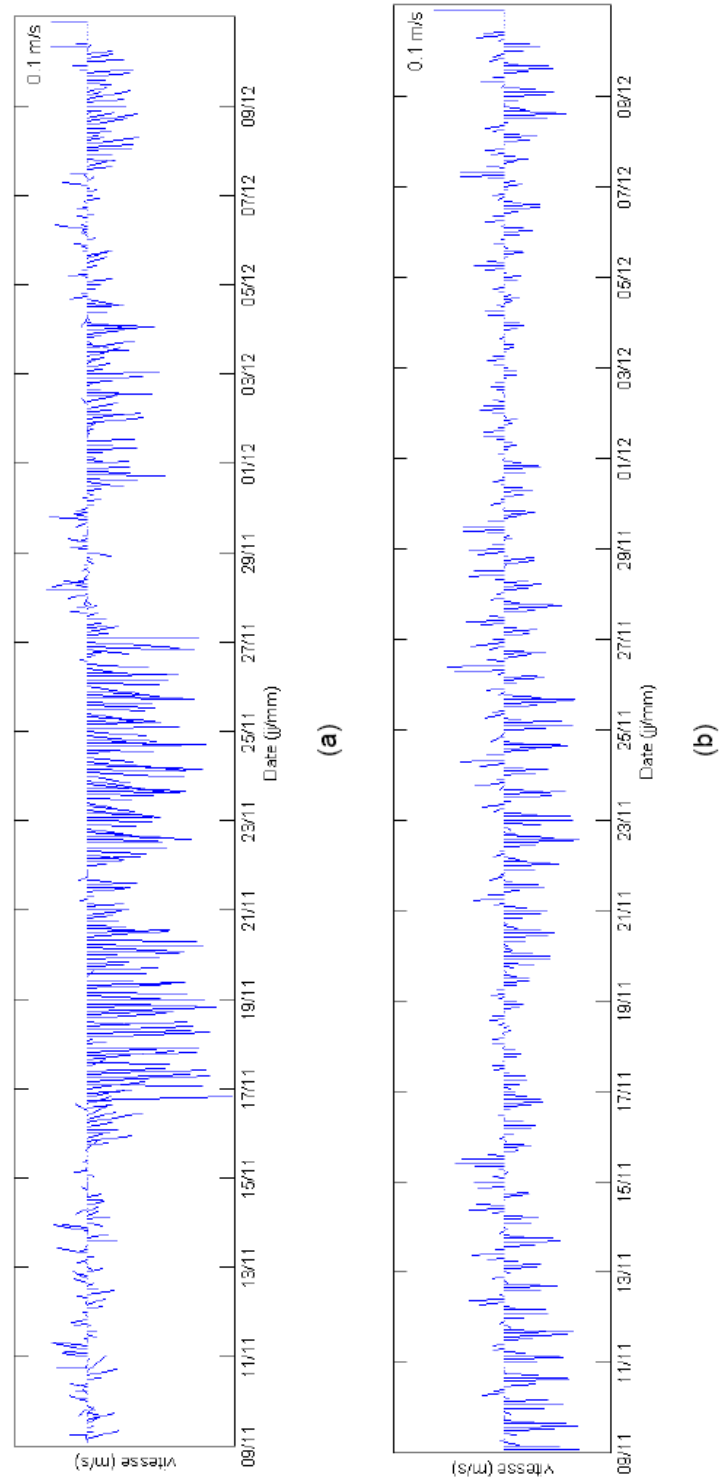


Illustration 123 - Vecteurs courant au capteur 7b – signal total : (a) mesure ; (b) modèle



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34

Service géologique régional de La Réunion

5, sur Ste Anne
BP 906

97478 – St Denis Cedex - France
Tél. : 02 62 21 22 14