



**ETUDE D'IMPACT HYDRODYNAMIQUE
ET SEDIMENTAIRE DU PARC EOLIEN
OFFSHORE DE FECAMP**

Février 2014



SOMMAIRE

PREAMBULE	1
1 - INTRODUCTION	3
2 - ETAT INITIAL - LES DONNEES NATURELLES	5
2.1 BATHYMETRIE ET MORPHOLOGIE	5
2.1.1 Cadre géographique	5
2.1.2 Cadre géomorphologique	5
2.1.3 Cadre bathymétrique	5
2.2 NATURE DES FONDS	8
2.2.1 Nature des sédiments superficiels	8
2.2.1.1 Nature des sédiments superficiels	8
2.2.1.2 Epaisseur des sédiments meubles	12
2.2.2 Domaine littoral ; le platier et le cordon de galets	13
2.2.2.1 Le platier	13
2.2.2.2 Les sables	14
2.2.2.3 Les galets	17
2.3 PARAMETRES METEO-OCEANIQUES	18
2.3.1 Le niveau de la mer	18
2.3.1.1 Niveau de marée astronomique	18
2.3.1.2 Niveaux extrêmes	18
2.3.1.3 Evolution à long terme du niveau de la mer	20
2.3.2 La houle et les clapots	21
2.3.3 Le courant	23
2.3.4 Hydrologie	24
2.3.4.1 Les débits liquides	24
2.3.4.2 Les débits solides	24
2.3.4.3 La turbidité	24
2.4 EVOLUTION DU LITTORAL ET DES FONDS MARINS	26
2.4.1 Aménagement et évolution du littoral	26
2.4.1.1 Les ouvrages portuaires	26
2.4.1.2 Le recul des falaises	26
2.4.1.3 L'érosion du platier	27
2.4.2 Evolution des fonds dans le secteur du parc éolien	27
3 - IMPACT HYDRODYNAMIQUE	33
3.1 DESCRIPTION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE	33
3.1.1 Le code Telemac-3D	33
3.1.2 Bathymétrie et maillage	34
3.1.2.1 Bathymétrie	34

3.1.2.2	Maillage	36
3.1.3	Conditions aux limites et paramétrage	39
3.1.3.1	Conditions aux limites	39
3.1.3.2	Paramétrage	39
3.2	MODELISATION HYDRODYNAMIQUE EN CONDITIONS NATURELLES	40
3.2.1	Validation par comparaison aux mesures SHOM	40
3.2.1.1	Niveau d'eau	40
3.2.1.2	Courant	42
3.2.2	Validation par comparaison aux mesures ADCP	46
3.2.2.1	Présentation des mesures ADCP	46
3.2.2.2	Comparaison avec le modèle 3D	48
3.2.3	Courant maximum	52
3.3	MODELISATION HYDRODYNAMIQUE AVEC LES FONDATIONS GRAVITAIRES	54
3.3.1	Incidence à l'échelle régionale	54
3.3.1.1	Courant barotrope	54
3.3.1.2	Courant de surface	57
3.3.1.3	Courant de fond	59
3.3.2	Incidence à l'échelle locale	61
3.3.2.1	Courant barotrope	61
3.3.2.2	Courant de surface	64
3.3.2.3	Courant de fond	67
3.3.2.4	Sections longitudinales et transverses aux fondations	70
4	IMPACT SUR LES ETATS DE MER	77
4.1	INTERACTIONS ENTRE LES VAGUES INCIDENTES ET LES FONDATIONS	77
4.1.1	Processus hydrodynamiques	77
4.1.2	Effets non linéaires au sein des interactions houle/structure, run-up	79
4.1.3	Influence du déferlement des vagues sur les risques d'affouillement	80
4.2	APPLICATION AU SITE DU PARC EOLIEN OFFSHORE DES HAUTES FALAISES	81
4.2.1	Incidence sur les vagues au voisinage des fondations	81
4.2.2	Incidence du parc éolien sur les états de mer à l'échelle régionale	82
4.2.2.1	Le code Tomawac	83
4.2.2.2	Conditions aux limites et paramétrages	84
4.2.2.3	Analyse des résultats	85
5	IMPACT SEDIMENTAIRE	89
5.1	MODELISATION NUMERIQUE SEDIMENTAIRE	89
5.1.1	Présentation de la modélisation sédimentaire	89
5.1.1.1	Le code Sisyphé	89
5.1.1.2	Dynamique des sédiments sableux	90
5.1.1.3	Transport solide	91
5.1.1.4	Paramètres numériques	92
5.1.2	Méthodologie de modélisation	93
5.1.2.1	Répartition granulométrique	93
5.1.2.2	Epaisseur de la couche superficielle et protection anti-affouillement	93
5.1.2.3	Schématisation du cycle annuel des conditions hydrodynamiques	94
5.1.3	Résultats des simulations	96
5.1.3.1	Modélisation sédimentaire en conditions naturelles	96
5.1.3.2	Modélisation sédimentaire avec les fondations gravitaires	99

5.1.4 Discussion et synthèse	106
5.2 ANALYSE DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ET PERSPECTIVES D'EVOLUTION ULTERIEURE	107
5.2.1 La dynamique des sables littoraux	107
5.2.2 Dynamique sédimentaire au large	109
5.3 INTERACTIONS ENTRE LE PROJET ET LES FONDS MARINS	110
5.3.1 Incidence à l'échelle régionale	110
5.3.1.1 Effet du courant	110
5.3.1.2 Effet de la houle	110
5.3.2 Incidence à l'échelle locale	110
5.3.2.1 Mécanismes d'affouillement	110
5.3.2.2 Caractéristiques de l'affouillement	112
5.3.2.3 Examen des risques potentiels selon la localisation des fondations	116
5.3.2.4 Protection du câble	116
6 - IMPACT SUR LA QUALITE DE L'EAU - PHASE DE TRAVAUX	119
6.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION SEDIMENTAIRE	119
6.1.1 Contexte	119
6.1.2 Le modèle	119
6.1.3 Dynamique des sédiments	119
6.2 METHODOLOGIE DE MODELISATION	120
6.2.1 Scénarii considérés	120
6.2.2 Paramétrage du modèle	120
6.3 RESULTATS DES SIMULATIONS	121
6.3.1 Concentration maximale	121
6.3.2 Dépôt maximal	124
7 - SYNTHESE GENERALE	127
BIBLIOGRAPHIE	129
ANNEXES	133
Annexe 1. Niveaux extrêmes de pleine mer	135
Annexe 2. Conditions hydrodynamiques en l'état naturel	139
Annexe 3. Impact du parc éolien à l'échelle régionale	147
Annexe 4. Impact du parc éolien à l'échelle locale	163

TABLE DES ILLUSTRATIONS

FIGURES :

Figure 1-1 : Parc éolien offshore de Fécamp : secteur du projet et schéma d'implantation des 83 machines.	3
Figure 2-1 : Le cadre hydrographique (carte SHOM 6824).....	6
Figure 2-2 : Carte bathymétrique montrant l'axe du chenal (flèches vertes) et la position de la dépression (flèches violettes) (document ID SCOPE MONACO, 2011, Réf. 29)	7
Figure 2-3 : Couverture sédimentaire au large de la Haute-Normandie (extrait de la carte des sédiments superficiels de la Manche, Larsonneur et al., 1978, Réf. 33)	8
Figure 2-4 : Carte de nature des fonds (carte SHOM 7417G, 2010).....	9
Figure 2-5 : Couverture sédimentaire de la zone du projet, d'après ID SCOPE (2011, Réf. 29).....	10
Figure 2-6 : Classification des sédiments prélevés par le GEMEL (2011, Réf. 23) (Coordonnées en Lambert 2 étendu).	11
Figure 2-7 : Carte des vallées fossiles et des accumulations sableuses en Manche orientale (Auffret et al., 1977, Réf. 3).	12
Figure 2-8 : Localisation des forages et des profils sismiques réalisés en Manche Orientale entre 1969 et 1972.....	13
Figure 2-9 : Linéaire côtier.....	15
Figure 2-10 : Evolution des surfaces d'estran couvertes par le sable entre le Cap d'Antifer et Le Tréport (Costa, 2009, Réf. 15).....	15
Figure 2-11 : Evolution à moyen terme de la contribution de chaque secteur à l'ensablement global de l'estran entre le cap d'Antifer et Le Tréport.	16
Figure 2-12 : Structure interne du cordon des Bas-Champs, d'après Migniot et Bellessort (1974, Réf. 39).....	17
Figure 2-13 : Surcotes maximales calculées en Manche et dans le Golfe de Gascogne et le long des côtes françaises (Source : Réf. 37)	19
Figure 2-14 : Rose des houles (gauche) et rose des houles les plus fortes (droite).	21
Figure 2-15 : Diagramme (Hs/Tp) au point Anemoc 2597 (gauche). Evolution spatiale de la hauteur significative moyenne pour l'année 2010 (droite).....	22
Figure 2-16 : Exemple d'observation satellite de la turbidité en Manche Orientale, extrait du site PREVIMER.....	25
Figure 2-17 : Recul de la falaise du Pays de Caux, en relation avec la lithologie (Costa, 2000, Réf. 14).....	27
Figure 2-18 : Bathymétrie de 1974 à 1978 dans la région du projet de ferme éolienne.....	28
Figure 2-19 : Bathymétrie de 2011 dans l'emprise du projet.	29
Figure 2-20 : Evolution des fonds dans l'emprise du projet entre 1975 et 2011.....	30
Figure 2-21 : Evolution des fonds entre 1975, 1989 et 2011, avec visualisation du tracé des routes du navire hydrographique.	31
Figure 3-1 : Répartition spatiale des différentes sources de données bathymétriques utilisées pour la création du modèle numérique de terrain.....	34

Figure 3-2 : Modèle numérique de terrain utilisé par les modèles : totalité du domaine (en haut), zoom sur le parc éolien (en bas). Le niveau de référence verticale est le niveau moyen des mers (NM) à Fécamp.....	35
Figure 3-3 : A gauche : grille de calcul du modèle hydrodynamique à mailles triangulaires : totalité du domaine (en haut), zoom sur le parc éolien (en bas). A droite : répartition des 16 niveaux sigma en fonction de la hauteur d'eau locale.....	36
Figure 3-4 : Schémas de principe d'une fondation GBS.....	37
Figure 3-5 : Zoom sur les maillages à proximité des fondations. Exemple par 20 m de fond.	38
Figure 3-6 : Extrait du maillage à éléments finis à proximité de 3 des 83 fondations composant le parc éolien.	38
Figure 3-7 : Localisation des ports de référence du SHOM servant à la validation des niveaux d'eau du modèle.....	41
Figure 3-8 : Comparaison des niveaux d'eau entre le modèle hydrodynamique TELEMAC (en rouge) et les mesures du SHOM (en bleu), en condition de marée de vive-eau moyenne (C95).....	42
Figure 3-9 : Comparaison des niveaux d'eau entre le modèle hydrodynamique TELEMAC et les mesures du SHOM au point de comparaison « Fécamp ».....	42
Figure 3-10 : Localisation des points de comparaison servant à la validation des courants de marée du modèle (8 points de données SHOM et 1 point de mesures ADCP). Les points noirs représentent le positionnement des fondations.....	43
Figure 3-11 : Comparaison des courants SHOM et ceux modélisés par Telemac aux points 3 et 4.	44
Figure 3-12 : Comparaison des courants de marée entre le modèle hydrodynamique TELEMAC (en rouge) et les courants du SHOM (en noir), pour une marée de vive-eau moyenne (C95).....	45
Figure 3-13 : Rose du courant barotrope mesuré sur la période de mesure.....	46
Figure 3-14 : Séries temporelles de l'intensité (en haut) et de la direction (au milieu) du courant instantané mesuré et niveau d'eau (en bas) pendant la période des mesures.	47
Figure 3-15 : Profils verticaux instantanés de l'intensité du courant mesuré pendant la période de mesure (en bleu) ; moyenne des profils instantanés (en rouge) ; et profil moyen du courant barotrope (en vert).....	47
Figure 3-16 : Comparaison entre les roses de courant barotrope mesuré (en rouge) et modélisé (en bleu) pour une marée de vive-eau moyenne (à gauche, dans la nuit du 4 au 5 août 2004) et pour une marée de morte-eau moyenne (à droite, le 8 août 2004).....	49
Figure 3-17 : Séries temporelles de l'intensité du courant en fonction de la profondeur pendant une marée de vive-eau moyenne (dans la nuit du 4 au 5 août 2004). Les mesures ADCP sont représentées sur la figure du haut et les résultats Telemac-3D sur celle du bas. Le niveau d'eau est également superposé (courbe noire).....	50
Figure 3-18 : Séries temporelles de la direction du courant en fonction de la profondeur pendant une marée de vive-eau moyenne (dans la nuit du 4 au 5 août 2004). Les mesures ADCP sont représentées sur la figure du haut et les résultats Telemac-3D sur celle du bas. Le niveau d'eau est également superposé (courbe noire).	50
Figure 3-19 : Profils verticaux de l'intensité du courant pendant une marée de vive-eau moyenne (dans la nuit du 4 au 5 août 2004). En bleu : profils instantanés ; en vert : moyenne des profils instantanés ; en rouge : profil maximum ; en noir : moyenne du courant barotrope. Les mesures ADCP sont représentées sur la figure du haut et les résultats Telemac-3D sur celle du bas.	51

Figure 3-20 : Intensité maximale du courant de marée dans le parc éolien en morte-eau moyenne C45 (à gauche) et en vive-eau moyenne C95 (à droite), d'après les simulations Telemac.	52
Figure 3-21 : Intensité du courant de marée dans le parc éolien au maximum du flot et du jusant, en vive-eau moyenne C95 (en haut) et morte-eau moyenne C45 (en bas), d'après les simulations Telemac.	53
Figure 3-22 : Différences maximales d'intensité du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne (à gauche) et de vive-eau moyenne (à droite). Courant barotrope maximum sur l'état naturel : 1,4 m/s à C95 et 0,7 m/s à C45.	55
Figure 3-23 : Différences absolues (en m/s, en haut) et relatives (en %, en bas) d'intensité du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95).	56
Figure 3-24 : Différences maximales d'intensité du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne (gauche) et de vive-eau moyenne (droite). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 1,6 m/s à C95 et 0,9 m/s à C45.	57
Figure 3-25 : Différences absolues (en m/s) d'intensité du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 1,6 m/s à C95 et 0,9 m/s à C45.	58
Figure 3-26 : Différences maximales d'intensité du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne (à gauche) et de vive-eau moyenne (à droite). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C95 et 0,3 m/s à C45.	59
Figure 3-27 : Différences absolues (en m/s) d'intensité du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C95 et 0,3 m/s à C45.	60
Figure 3-28 : Récapitulatif des distances d'impact sur le courant barotrope au maximum du flot et du jusant.	61
Figure 3-29 : Différences maximales d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de vive-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).	62
Figure 3-30 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).	63
Figure 3-31 : Récapitulatif des distances d'impact sur le courant en surface au maximum du flot et du jusant.	64
Figure 3-32 : Différences maximales d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de vive-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).	65
Figure 3-33 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à	

gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).....	66
Figure 3-34 : Récapitulatif des distances d'impact sur le courant au fond au maximum du flot et du jusant.....	67
Figure 3-35 : Différences maximales d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de vive-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).	68
Figure 3-36 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).	69
Figure 3-37 : Définition des sections longitudinale (section 1, en rouge) et transversale (section 2, en bleu)	70
Figure 3-38 : Sections longitudinales du courant au maximum du flot (en haut) et du jusant (en bas) pour une marée moyenne de vive-eau et pour la fondation M01 (nord-est du parc).....	71
Figure 3-39 : Sections longitudinales du courant au maximum du flot (en haut) et du jusant (en bas) pour une marée moyenne de vive-eau et pour la fondation A01 (sud-ouest du parc).....	72
Figure 3-40 : Sections transversales du courant au maximum du flot (en haut) et du jusant (en bas) pour une marée moyenne de vive-eau et pour la fondation M01 (nord-est du parc).....	74
Figure 3-41 : Sections transversales du courant au maximum du flot (en haut) et du jusant (en bas) pour une marée moyenne de vive-eau et pour la fondation A01 (sud-ouest du parc).....	75
Figure 4-1 : Effet de la largeur des piles sur l'agitation en surface et le régime de l'écoulement ; de gauche à droite : pile mince, intermédiaire et large (selon Haddorp, 2005, Réf. 27).	78
Figure 4-2 : Courants verticaux et champ des vagues diffractées. (Haddorp, 2005).....	78
Figure 4-3 : Régimes d'écoulement représentés dans le plan (KC,D/L). (Adapté de Haddorp, 2005 et Sumer et Fredsøe, 2006)	78
Figure 4-4 : Exemple de run-up sévère sur une éolienne du parc Horns Rev (Vattenfall and DONG Energy).....	79
Figure 4-5 : Comparaison du déficit du vent entre les observations SAR ERS-2 et le modèle empirique développé. Application au site de Horns Rev.	84
Figure 4-6 : Ecart relatif sur la hauteur significative (Hs) pour deux conditions types. Prise en compte des effets de masque des fondations (gauche) et des effets combinés du sillage des turbines (droite).	86
Figure 4-7 : Ecart relatif sur la hauteur significative (Hs) pour deux conditions types. Prise en compte des effets de masque des fondations (gauche) et des effets combinés du sillage des turbines (droite).	87
Figure 5-1 : Epaisseur sédimentaire initiale (en mètre) pour la modélisation numérique (Données ID SCOPE MONACO 2011, Réf. 29), dans la zone du parc (à gauche) et autour de la fondation D05 (à droite) avec une épaisseur nulle pour schématiser la protection anti-affouillement.....	94
Figure 5-2 : Décomposition des conditions hydrodynamiques et d'agitation sur deux jours pour deux points situés dans la zone du parc éolien (Point 1 : érosion et Point 2 : sédimentation).....	97

Figure 5-3 : Transport solide intégré sur une marée moyenne de vive-eau (en haut) et de morte-eau (en bas) dans l'état actuel (sans fondation), pour des conditions d'agitation estivale (à droite) et hivernale (à gauche).....	98
Figure 5-4 : Séries temporelles de l'évolution des fonds (en haut) et de la répartition entre les classes granulométriques 10 mm (au milieu) et 1 mm (en bas) pour deux points à proximité de la fondation M01 (nord-est). Point 1 en bleu (érosion) et point 2 en rouge (sédimentation).	100
Figure 5-5 : Impacts locaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation, pour la fondation M01 (nord-est). Le cercle noir représente le haut de la fondation gravitaire.	101
Figure 5-6 : Impacts régionaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation entre l'état naturel et le parc éolien (fondations gravitaires).	102
Figure 5-7 : Impacts locaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation entre l'état naturel et le parc éolien (fondations gravitaires).	103
Figure 5-8 : Impacts locaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation entre l'état naturel et le parc éolien (fondations gravitaires), pour la partie sud ouest du parc (en bas) et nord est (en haut).	105
Figure 5-9 : Schéma support de l'analyse des mécanismes expliquant l'évolution de l'ensablement du littoral entre le cap d'Antifer et Saint-Valéry-en-Caux.	107
Figure 5-10 : Carte des sédiments superficiels de la baie de Seine orientale (d'après Lesueur et al., 1999, Réf. 36).	109
Figure 5-11 : Interactions entre écoulement et structure dans le cas d'un cylindre vertical, d'après Whitehouse, 1998, Réf. 58	111
Figure 5-12 : Forme des évolutions des fonds autour d'un cylindre de grande largeur, en houle seule (a) et en houle et courant (b), d'après Sumer et al., 2002, Réf. 53	113
Figure 5-13 : Erosion maximale à la périphérie de la fondation, d'après Sumer et al., 2002, Réf. 53	114
Figure 5-14 : Les différentes fondations étudiées par Whitehouse (2004).	115
Figure 5-15 : Effet de l'angle à la base du cône sur l'amplification de la contrainte sur le fond, d'après Sumer et al., 1994, Réf. 51).	115
Figure 5-16 : Profondeur de pénétration du sable par une ancre de marine classique (Stokes, Hall's Union, Byers, Poolanker, in Roelens)	117
Figure 6-1 : Champ de concentration maximale (en mg/L) après 5 jours de simulation en marée de morte-eau moyenne (C45), pour un rejet de particules de diamètre médian de 100 µm (à gauche) et de 5 µm (à droite), et pour différentes positions du points de rejet (au nord-est en haut, au centre au milieu et au sud-ouest en bas).	122
Figure 6-2 : Champ de concentration maximale (en mg/L) après 5 jours de simulation en marée de vive-eau moyenne (C95), pour un rejet de particules de diamètre médian de 100 µm (à gauche) et de 5 µm (à droite), et pour différentes positions du points de rejet (au nord-est en haut, au centre au milieu et au sud-ouest en bas).	123
Figure 6-3 : Cartes de dépôt maximal (en mm) après 5 jours de simulation en marée de morte-eau moyenne (C45), pour un rejet de particules de diamètre médian de 100 µm (à gauche) et de 5 µm (à droite), et pour différentes positions du points de rejet (au nord-est en haut, au centre au milieu et au sud-ouest en bas).	125
Figure 6-4 : Cartes de dépôt maximal (en mm) après 5 jours de simulation en marée de vive-eau moyenne (C95), pour un rejet de particules de diamètre médian de 100 µm (à	

gauche) et de 5 μm (à droite), et pour différentes positions du points de rejet (au nord-est en haut, au centre au milieu et au sud-ouest en bas).	126
Figure 7-1 : Projets éoliens en Manche est.	128
Figure A- 1 : Niveaux extrêmes de plein mer pour une période de retour de 10 ans d'après SHOM - CETMEF 2012 (Réf. 49).....	136
Figure A- 2 : Niveaux extrêmes de plein mer pour une période de retour de 20 ans d'après SHOM - CETMEF 2012 (Réf. 49).....	136
Figure A- 3 : Niveaux extrêmes de plein mer pour une période de retour de 50 ans d'après SHOM - CETMEF 2012 (Réf. 49).....	137
Figure A- 4 : Niveaux extrêmes de plein mer pour une période de retour de 100 ans d'après SHOM - CETMEF 2012 (Réf. 49).....	137
Figure A- 5 : Comparaison des niveaux d'eau entre le modèle hydrodynamique TELEMAC (en rouge) et les mesures du SHOM (en bleu), en condition de marée de morte-eau moyenne (C45).....	140
Figure A- 6 : Comparaison des courants de marée entre le modèle hydrodynamique TELEMAC (en rouge) et les courants du SHOM (en noir), pour une marée de morte-eau moyenne (C45).....	141
Figure A- 7 : Champs horaires de courant obtenus par modélisation numérique pour une marée de vive-eau moyenne (C95). De PM-5 à PM, Port de référence : Fécamp.....	142
Figure A- 8 : Champs horaires de courant obtenus par modélisation numérique pour une marée de vive-eau moyenne (C95). De PM+1 à PM+6, Port de référence : Fécamp.....	143
Figure A- 9 : horaires de courant obtenus par modélisation numérique pour une marée de morte-eau moyenne (C45). De PM-5 à PM, Port de référence : Fécamp.	144
Figure A- 10 : Champs horaires de courant obtenus par modélisation numérique pour une marée de morte-eau moyenne (C45). De PM à PM+6, Port de référence : Fécamp.	145
Figure A- 11 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant barotrope au cours du flot d'une morte-eau moyenne (C45). Courant barotrope sur l'état naturel : 0,7 m/s à C45.....	148
Figure A- 12 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant barotrope au cours du jusant d'une morte-eau moyenne (C45). Courant barotrope maximum sur l'état naturel : 0,7 m/s à C45.	149
Figure A- 13 : Différences absolues (en m/s, en haut) et relatives (en %, en bas) d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne (C45).....	150
Figure A- 14 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant en surface au cours du flot d'une morte-eau moyenne (C45). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C45.	151
Figure A- 15 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant en surface au cours du jusant d'une morte-eau moyenne (C45). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C45.	152
Figure A- 16 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne (C45). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C45.	153

Figure A- 17 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant au fond au cours du flot d'une morte-eau moyenne (C45). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,3 m/s à C45.....	154
Figure A- 18 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant au fond au cours du jusant d'une morte-eau moyenne (C45). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,3 m/s à C45.	155
Figure A- 19 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne (C45). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,3 m/s à C45.	156
Figure A- 20 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant barotrope au cours du flot d'une vive-eau moyenne (C95). Courant barotrope maximum sur l'état naturel : 1,4 m/s à C95.	157
Figure A- 21 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant barotrope au cours du jusant d'une vive-eau moyenne (C95). Courant barotrope maximum sur l'état naturel : 1,4 m/s à C95.	158
Figure A- 22 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant en surface au cours du flot d'une vive-eau moyenne (C95). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 1,6 m/s à C95.	159
Figure A- 23 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant en surface au cours du jusant d'une vive-eau moyenne (C95). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 1,6 m/s à C95.	160
Figure A- 24 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant au fond au cours du flot d'une vive-eau moyenne (C95). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C95.....	161
Figure A- 25 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant au fond au cours du jusant d'une vive-eau moyenne (C95). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C95.....	162
Figure A- 26 : Différences maximales d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).....	164
Figure A- 27 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).	165
Figure A- 28 : Différences maximales d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).....	166
Figure A- 29 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).	167
Figure A- 30 : Différences maximales d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).....	168

Figure A- 31 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).....169

PHOTOS :

Photo 2-1 : Rigoles d'écoulement sur le platier (cliché : S. Costa, in Augris et al., 2004, **Réf. 4**).14

TABLEAUX :

Tableau 2-1 : Niveaux caractéristiques de marée astronomique au port de Fécamp référencés par rapport au Zéro Hydrographique. Source : **Réf. 48**.18

Tableau 2-2 : Tableau de synthèse des niveaux extrêmes de pleine mer en m /IGN (ligne supérieure), en m/ZH (ligne du milieu) et m/NM (ligne inférieure). La valeur de gauche est représentative du sud-ouest du parc éolien tandis que celle de droite est représentative du nord-est de la zone. D'après SHOM-CETMEF 2012 (**Réf. 49**).....20

Tableau 2-3 : Diagramme (Hs/Tp) pour un point au voisinage du parc éolien (-29,4 m).22

Tableau 4-1 : KC et D/L associés au diagramme (Hs/Tp) pour une fondation cylindrique de 10,2 m de diamètre.81

Tableau 4-2 : KC et D/L associés au diagramme (Hs/Tp) pour une embase gravitaire circulaire de 34 m.82

ABREVIATIONS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
BM	Basse Mer
CM	Cote Marine
MNT	Modèle Numérique de Terrain
PM	Pleine Mer
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine

PREAMBULE

Le développement du site éolien offshore de Fécamp a été confié à la société Eolien Maritime France (EMF), consortium réunissant EDF Energies Nouvelles et DONG Energy Wind Power, associé à WPD Offshore France. La Société Projet Eoliennes Offshore des Hautes Falaises a été créée pour mener à bien ce projet.

Un certain nombre de missions et d'études d'expertise sont à produire afin de démontrer la faisabilité de l'installation. Parmi les études demandées, figure le volet impact hydrodynamique et hydro-sédimentaire. Ce rapport présente les travaux menés pour répondre à ce besoin.

1 - INTRODUCTION

Le projet de parc éolien en mer de Fécamp se situe à 13 kilomètres du littoral de Haute Normandie. La Figure 1-1 présente une vue d'ensemble de la zone et du schéma d'implantation des éoliennes. Avec 83 aérogénérateurs, le site de Fécamp développera une capacité totale de production de 500 MW. Les aérogénérateurs considérés seront implantés à une hauteur de 100 m et auront un diamètre de 150 m. Ils seront répartis sur 8 lignes orientées sud-sud-ouest / nord-nord-est (Figure 1-1). La distance entre deux aérogénérateurs est d'1 km. Les fondations envisagées sont des fondations gravitaires coniques sur une embase circulaire de diamètre maximum 34 m. Dans le secteur d'implantation, les profondeurs sont généralement comprises entre 25 m et 30 m CM. Les fonds sont réguliers, en légère pente vers le nord-ouest (un peu moins de 0,5 ‰).

Cette étude vise à évaluer les incidences du projet éolien offshore sur l'hydrodynamique et sur les évolutions sédimentaires aussi bien d'un point de vue local que régional. Le présent document a été établi conjointement par la société Actimar et Bernard Latteux (expert en dynamique sédimentaire). Tout d'abord, une description de l'état initial et des données naturelles caractérisant le site d'étude est réalisée (cf. chapitre 2 -). Ensuite, les incidences du parc éolien sont évaluées sur l'hydrodynamique (cf. chapitre 3 -), sur les états de mer (cf. chapitre 4 -), sur la dynamique sédimentaire (cf. chapitre 5 -) et sur la qualité des eaux durant la phase des travaux d'installation des fondations (cf. chapitre 6 -). Enfin, une synthèse générale permet de résumer les différents résultats clés de la présente étude (cf. chapitre 7 -).

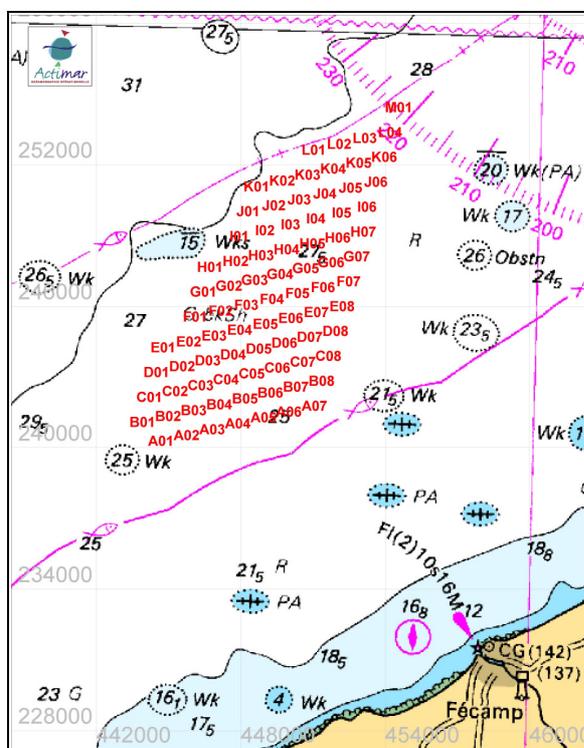


Figure 1-1 : Parc éolien offshore de Fécamp : secteur du projet et schéma d'implantation des 83 machines.

2 - ETAT INITIAL – LES DONNEES NATURELLES

2.1 BATHYMETRIE ET MORPHOLOGIE

2.1.1 Cadre géographique

Le littoral est du type « côte à falaise » sur tout le secteur s'étendant du Havre à Ault, soit sur environ 130 km. Les falaises crayeuses sont le plus souvent d'une hauteur comprise entre 60 et 100 m ; elles sont entaillées par le débouché des vallées, vallées sèches et valleuses (vallées suspendues) sur environ 25 km (Costa, 1997, **Réf. 13**).

2.1.2 Cadre géomorphologique

Cette côte à falaises se caractérise par la « trilogie falaise-platier-cordon » (Costa, 1997, **Réf. 13**). Ces éléments évoluent de façon couplée, les deux premiers étant soumis aux processus d'érosion, et le dernier aux processus d'accumulation.

2.1.3 Cadre bathymétrique

La plus grande partie des fonds marins en Manche orientale, au large de la côte de la Seine-Maritime et de la Somme, se situe entre les niveaux 30 m et 50 m sous les plus basses mers.

La ligne des -30 m est au plus proche (cap d'Antifer) à un peu plus de 10 km du rivage ; au sud-ouest, elle s'éloigne jusqu'à 25 km (cap de la Hève) ; au nord-est, sa distance à la côte croît progressivement jusqu'au niveau des Bas-Champs de la Somme (40 km).

La ligne des -20 m est généralement située à une distance de l'ordre de 3 à 5 km de la côte depuis le sud du cap d'Antifer jusqu'à la pointe d'Ailly. Au nord-est, cette distance augmente brutalement, passant aux alentours de 20 km à l'ouest du Tréport.

Dans l'emprise du projet (cf. Figure 2-1), les fonds sont approximativement compris entre -26 m et -32 m ; la pente des fonds y est assez douce, de l'ordre de 0,5 ‰.

La campagne bathymétrique menée dans le cadre du projet (ID SCOPE MONACO, 2011, **Réf. 29**) indique cependant un relief plus accidenté, avec notamment l'existence d'un chenal orienté sud-sud-ouest / nord-nord-est et d'une large dépression de forme circulaire, d'environ 300 m de diamètre (cf. Figure 2-2).

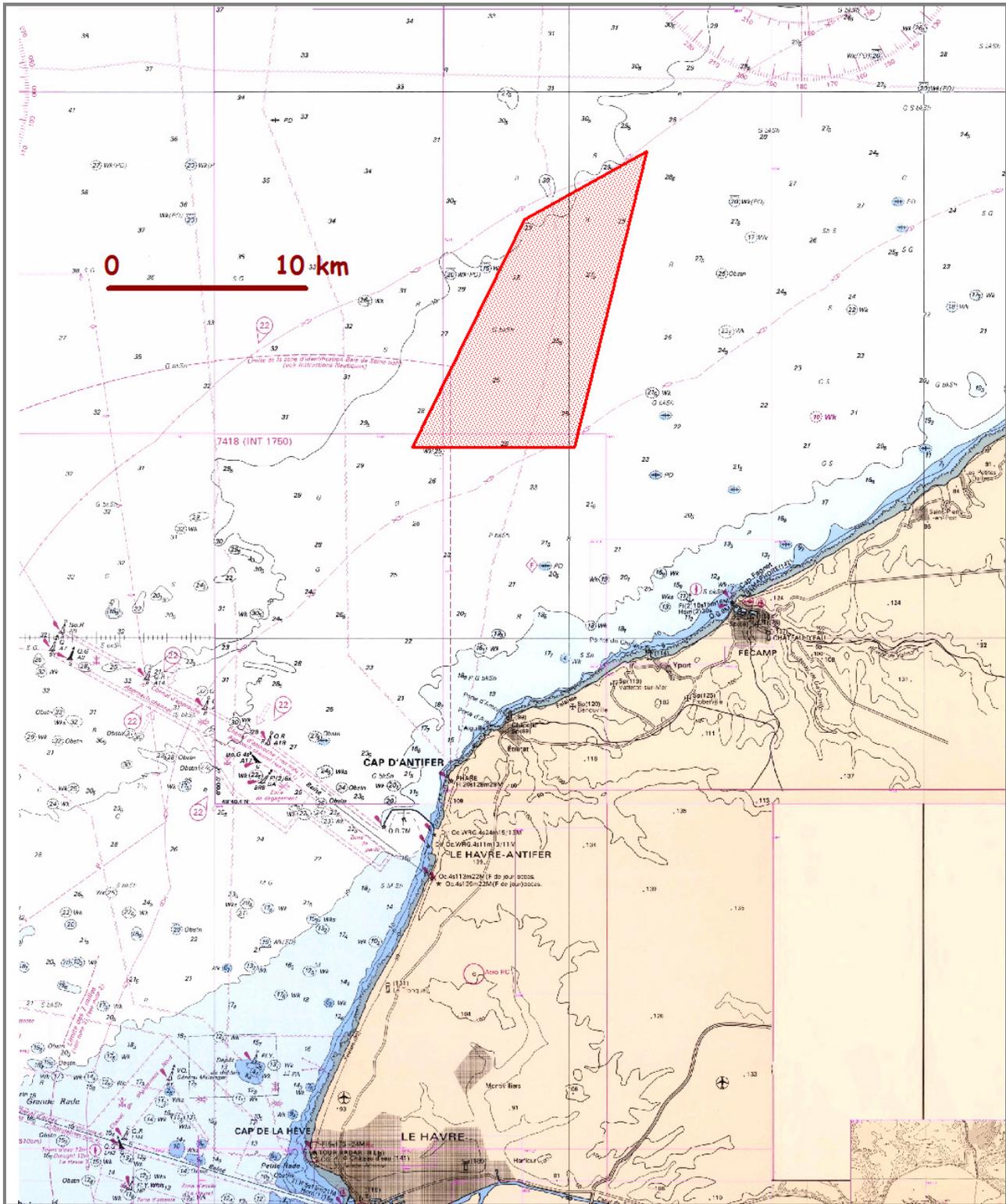


Figure 2-1 : Le cadre hydrographique (carte SHOM 6824).

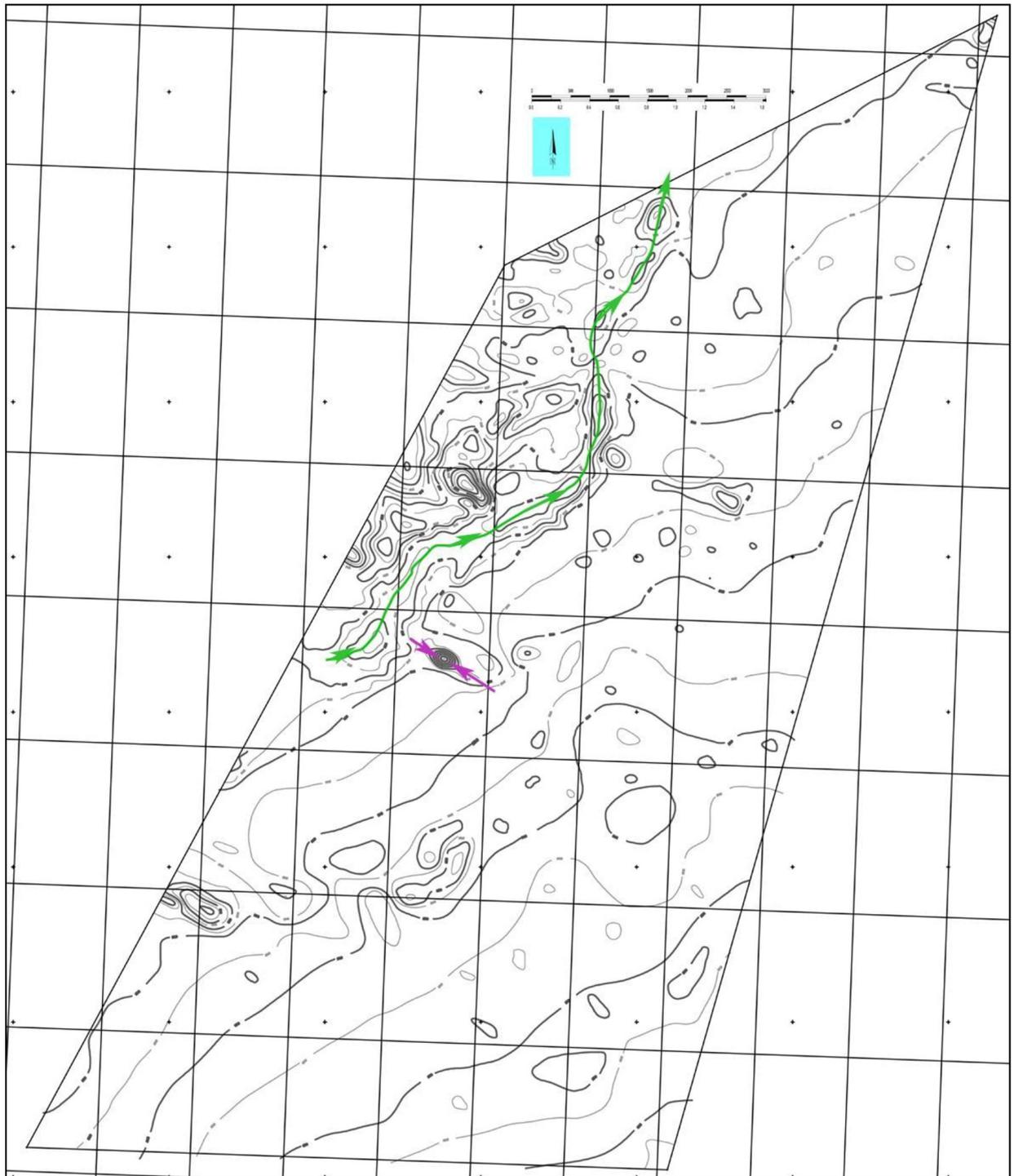


Figure 2-2 : Carte bathymétrique montrant l'axe du chenal (flèches vertes) et la position de la dépression (flèches violettes) (document ID SCOPE MONACO, 2011, Réf. 29)

2.2 NATURE DES FONDS

2.2.1 Nature des sédiments superficiels

2.2.1.1 Nature des sédiments superficiels

La Figure 2-3, tirée de la carte de Larsonneur *et al.* (1978, Réf. 33), fournit la répartition des sédiments superficiels à l'échelle régionale :

- les sédiments les plus grossiers (cailloutis) couvrent les fonds marins du cap d'Antifer à Veulettes-sur-Mer,
- de part et d'autre de cette zone, les sédiments s'affinent progressivement – rapidement au sud du cap d'Antifer – vers des graviers, puis sables graveleux, sables grossiers et enfin sables fins, voire des sablons et de la vase (estuaire de la Seine),
- perpendiculairement à la côte, la variation la plus manifeste à grande échelle concerne l'affinement progressif des sédiments à mesure que l'on se rapproche du littoral au droit de la côte picarde,
- des bandes étroites et allongées de sablons et de vases se rencontrent assez fréquemment le long de la côte, à une distance de l'ordre de 1 à 2 km.

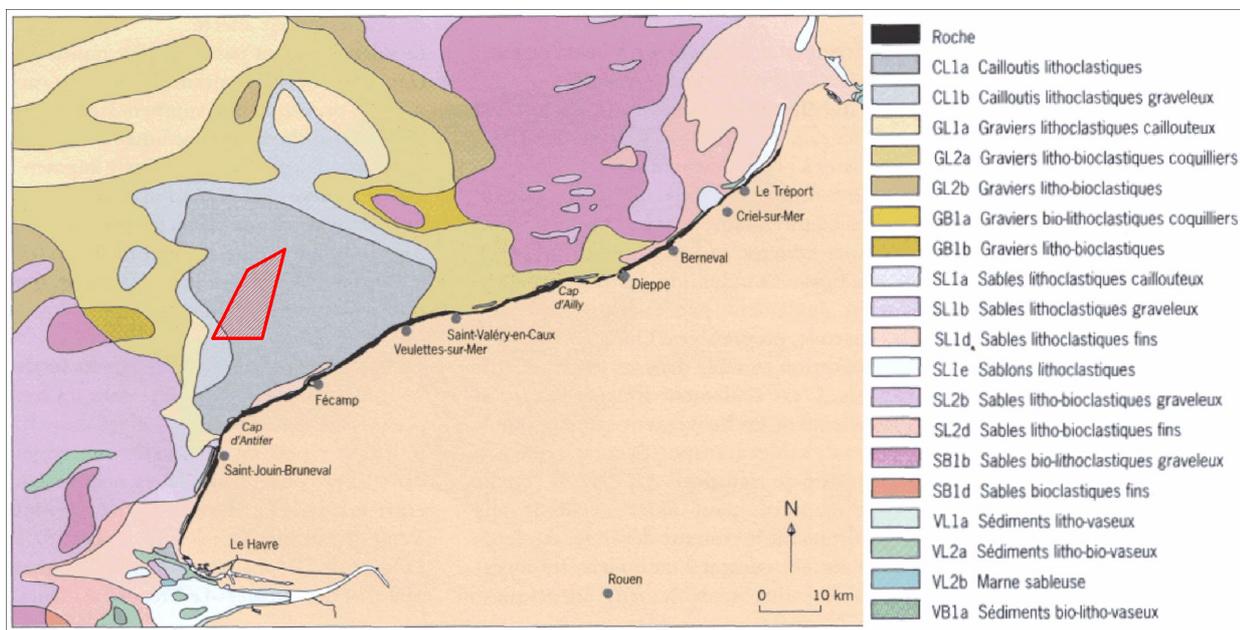


Figure 2-3 : Couverture sédimentaire au large de la Haute-Normandie (extrait de la carte des sédiments superficiels de la Manche, Larsonneur *et al.*, 1978, Réf. 33)

Cette répartition est fortement liée aux conditions hydrodynamiques :

- le long du littoral, les sédiments les plus grossiers se situent dans les zones où les courants sont les plus intenses ; les sédiments s'affinent à mesure que le courant ralentit,
- transversalement, l'existence de la bande de sédiments plus fins à faible distance de la côte traduit la transition entre la zone d'influence prépondérante du courant (plus au large) et celle de la houle (plus à la côte) ; cette bande correspond au minimum de l'énergie hydrodynamique sur le fond.

La carte de nature des fonds du SHOM (carte 7417G, 2010) détaille la nature des fonds au voisinage du projet : les fonds marins superficiels sont majoritairement composés de cailloutis, et de sable sur une petite zone au nord-ouest (Figure 2-4). Cependant, cette cartographie a été réalisée avec un très petit nombre de prélèvements dans le secteur du projet, et ne peut être considéré comme véritablement précise.

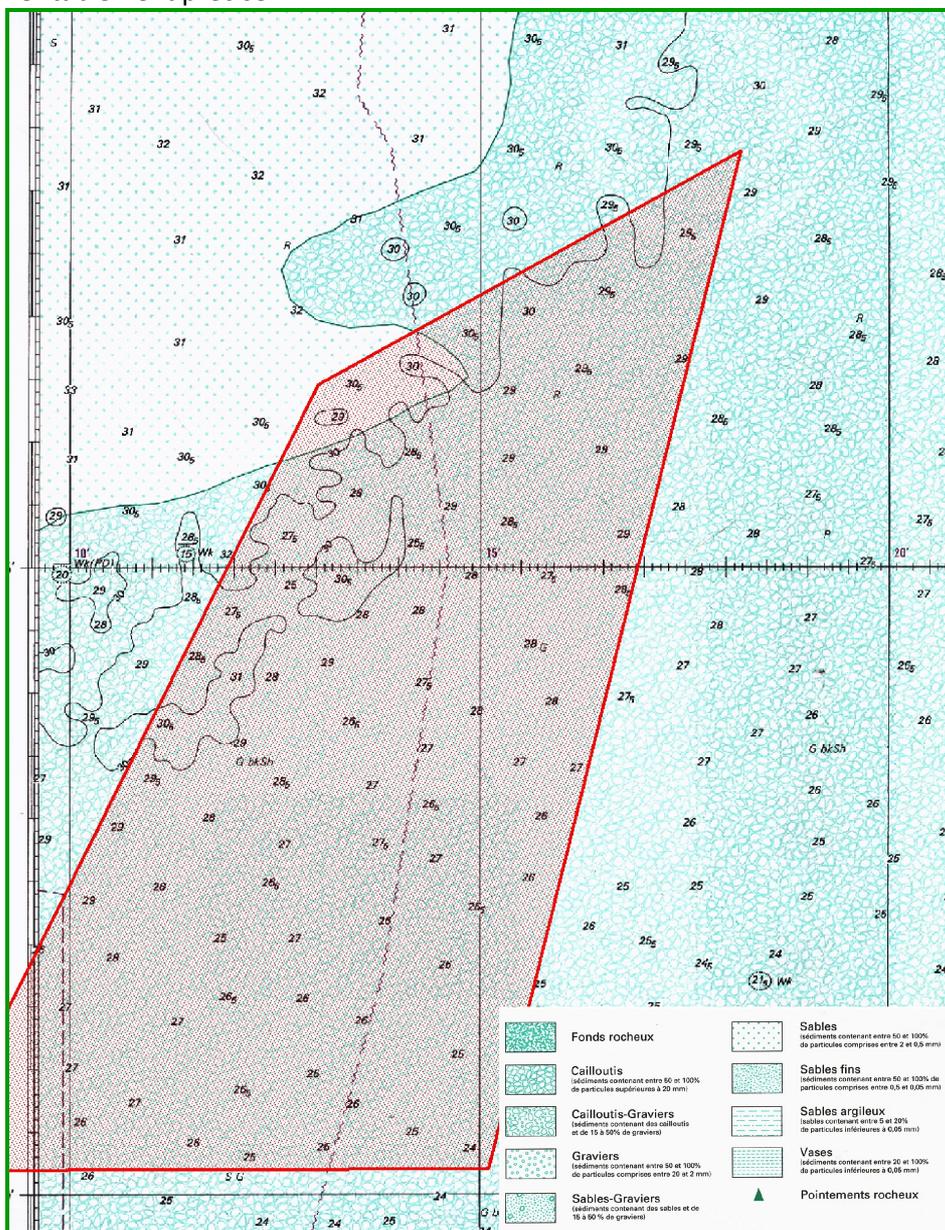


Figure 2-4 : Carte de nature des fonds (carte SHOM 7417G, 2010).

Une reconnaissance géophysique du champ éolien a été réalisée par ID SCOPE MONACO (2011, Réf. 29) : les informations tirées à la fois de la campagne sismique et de l'imagerie du sonar à balayage latéral ont permis de préciser la nature des fonds superficiels dans le secteur (Figure 2-5) : « le cailloutis lithoclastique à fraction coquillière est quasi omniprésent dans la zone. Il forme sans doute le cœur de la couverture sédimentaire, le sable grossier à médium ne venant qu'en placage superficiel ». Le substratum crayeux affleure très localement ; il est sub-affleurant dans certains secteurs du nord-est du projet.

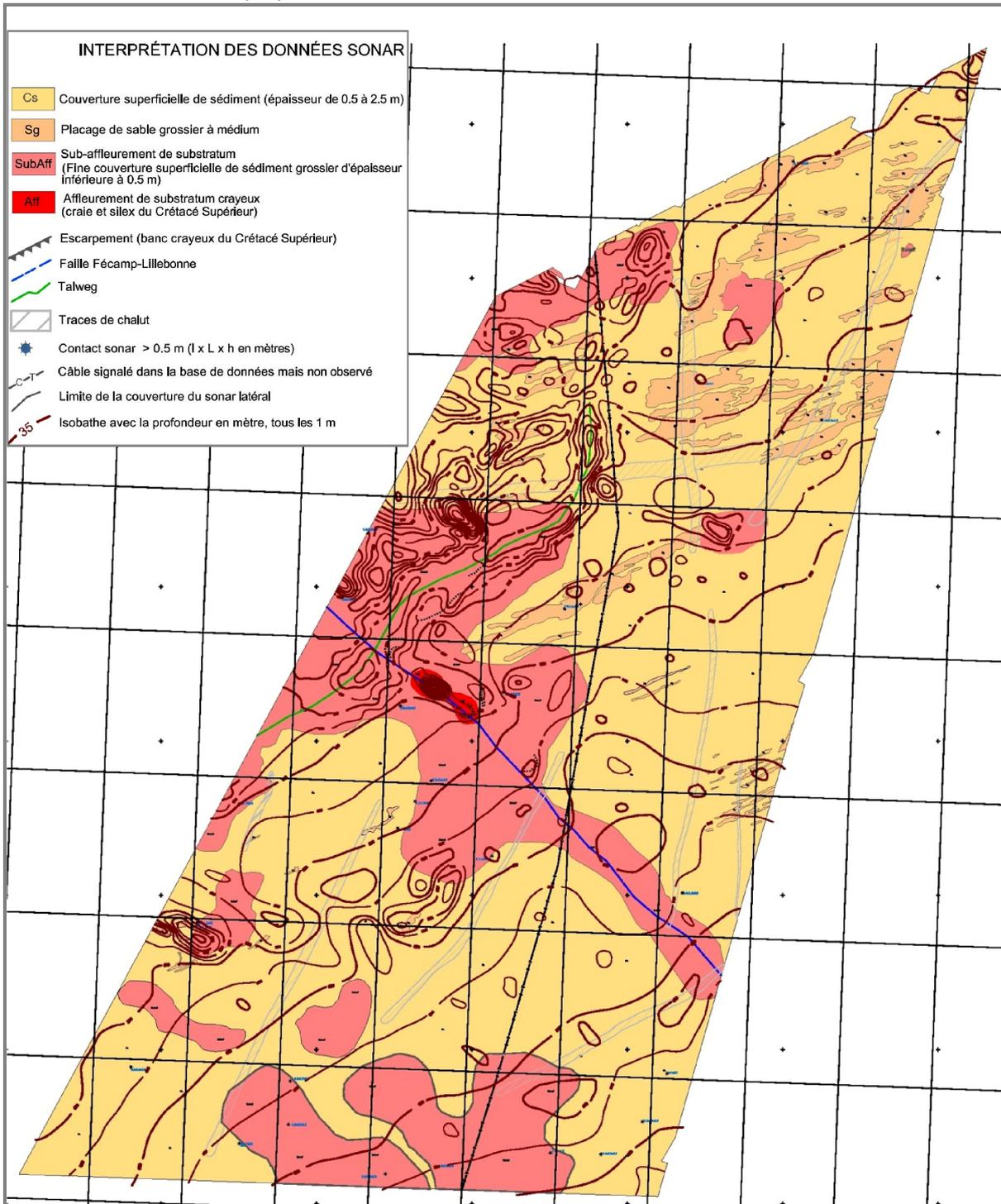


Figure 2-5 : Couverture sédimentaire de la zone du projet, d'après ID SCOPE (2011, Réf. 29).

Le GEMEL Picardie a procédé à 25 prélèvements de sédiments superficiels dans le secteur, et en a effectué l'analyse granulométrique (GEMEL, 2011, Réf. 23). Les résultats mettent en évidence la très faible proportion de sédiments fins (la teneur en particules de taille inférieure à 0,16 mm n'a jamais dépassé 1,1 %). Les sédiments sont hétérogènes, et ne sont constitués que de 2 catégories : graviers et graviers ensablés (Figure 2-6).

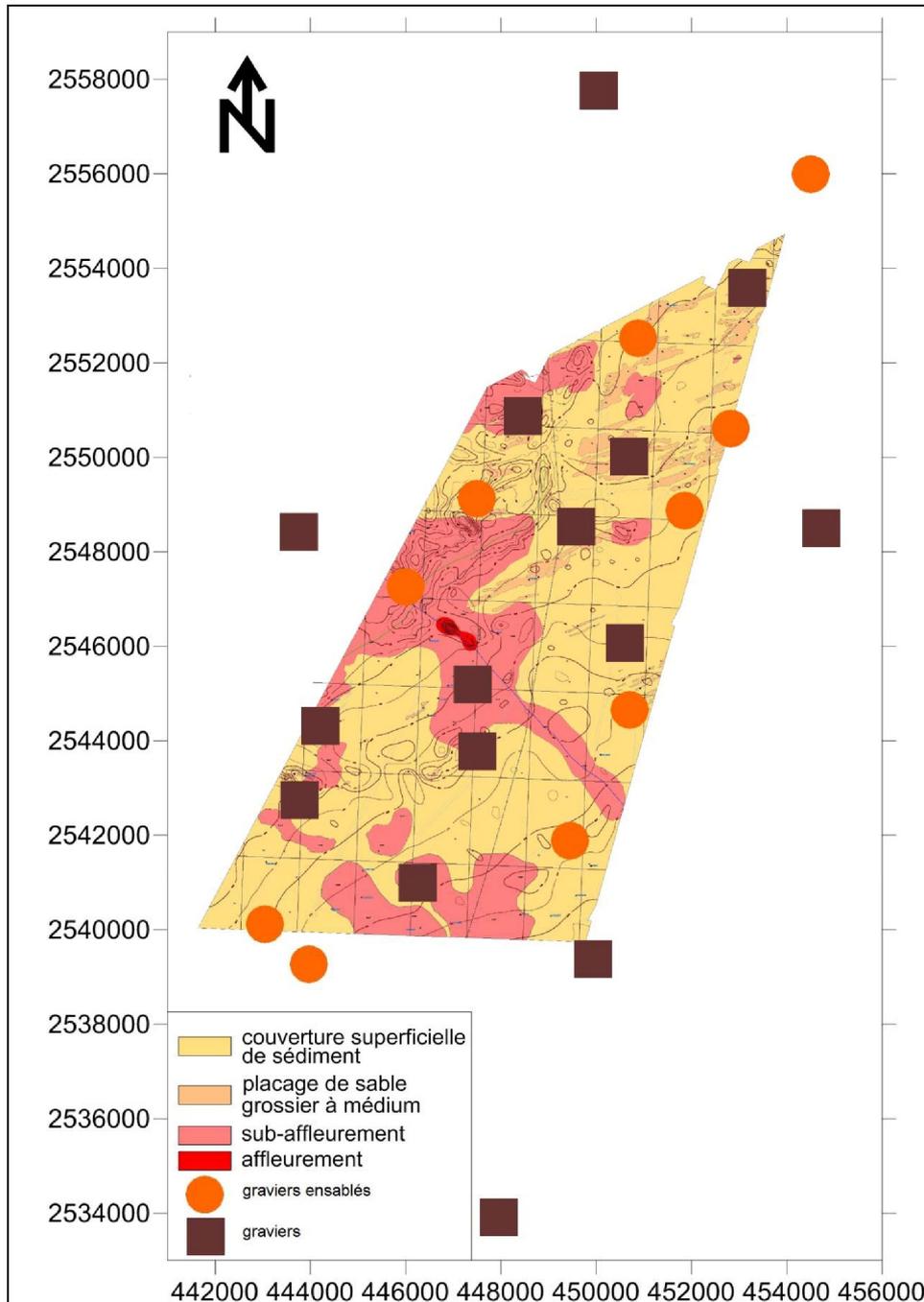


Figure 2-6 : Classification des sédiments prélevés par le GEMEL (2011, Réf. 23)
(Coordonnées en Lambert 2 étendu).

2.2.1.2 Epaisseur des sédiments meubles

La reconnaissance géologique par sismique réflexion a permis de décrire la géomorphologie du toit du toit rocheux en Manche orientale, et de quantifier l'épaisseur des formations superficielles meubles, qui n'est importante qu'à l'occasion de deux formations - superposées lorsqu'elles occupent le même lieu (Auffret et al., 1977, Réf. 3 ; Figure 2-7) :

- des nappes alluviales qui remplissent des paléovallées creusées dans le fond des sédiments indurés (dépôts fluviaux ou fluvio-marins mis en place lors des épisodes glaciaires du quaternaire, lorsque la Manche était exondée),
- des accumulations sableuses en partie supérieure, correspondant au dernier stade de la morphogénèse sous-marine (holocène).

La Figure 2-7 indique clairement que le projet se situe en dehors de ces formations sédimentaires.

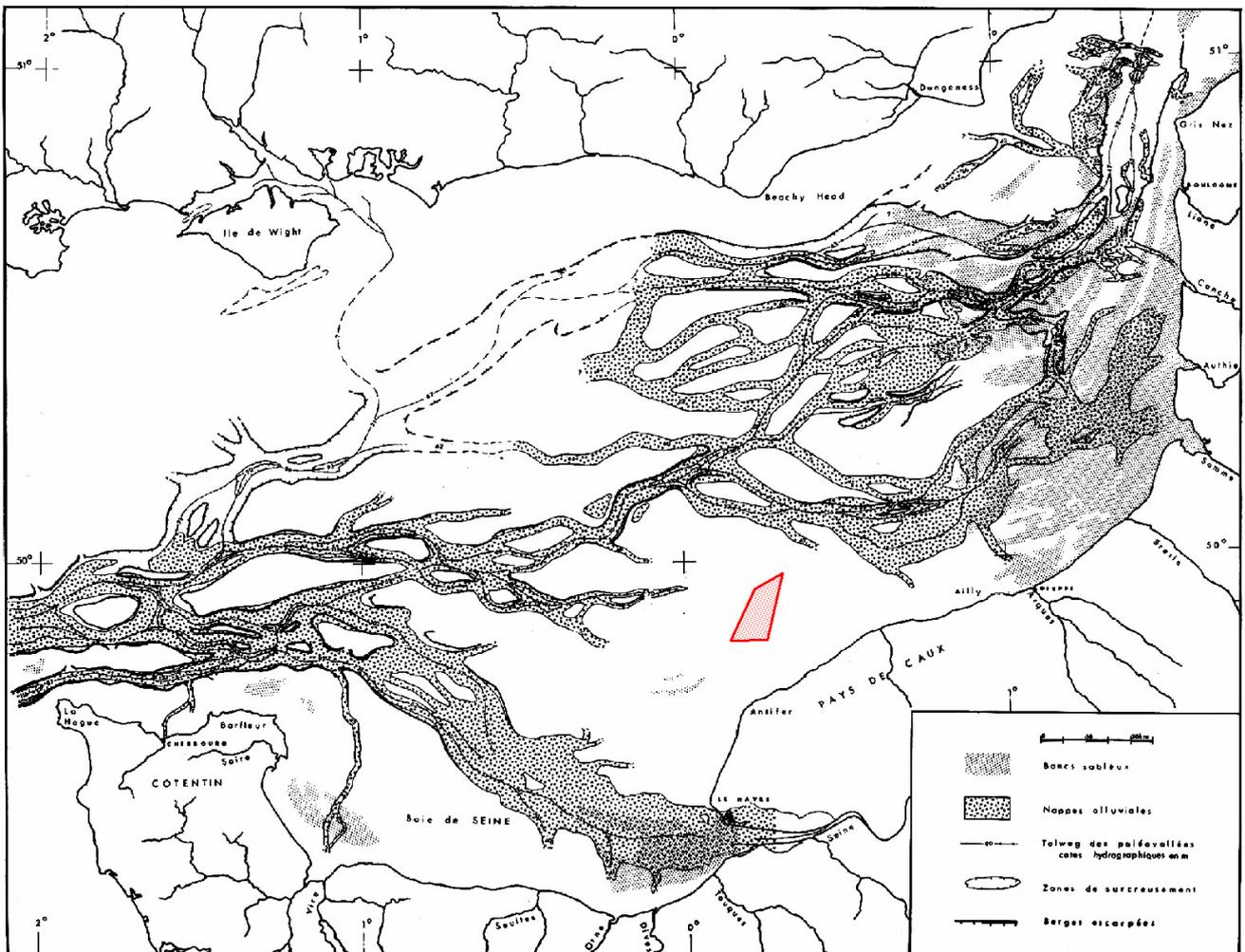


Figure 2-7 : Carte des vallées fossiles et des accumulations sableuses en Manche orientale (Auffret et al., 1977, Réf. 3).

Plus localement, d'après la campagne de ID SCOPE MONACO (2011, Réf. 29), la couverture sédimentaire meuble est partout de faible épaisseur, inférieure à la limite de résolution du sparker utilisé pour la reconnaissance, *i.e.* partout inférieure à 2,5 m.

Selon BRL Ingénierie (2011, Réf. 8), 3 profils sismiques réalisés dans le secteur en 1969 indiquent une épaisseur sédimentaire plus faible que le signal acoustique, et donc inférieure à 2 m ; d'autre part, 4 forages effectués en 1972 au sud-ouest de la zone du projet (localisation sur la Figure 2-8) ont révélé une épaisseur de sédiments meubles inférieure au mètre.

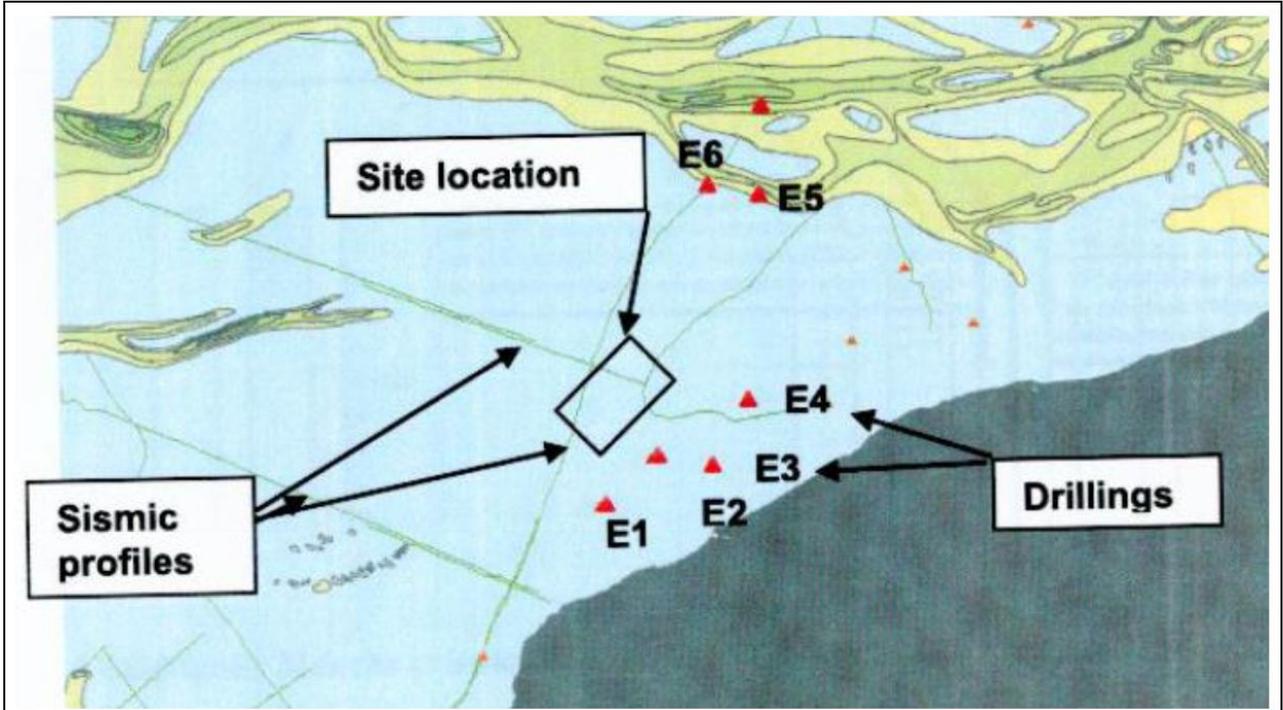


Figure 2-8 : Localisation des forages et des profils sismiques réalisés en Manche Orientale entre 1969 et 1972.

La campagne géophysique réalisée par IXSURVEY au printemps 2013 (Réf. 31) confirme la très faible épaisseur de la couche sédimentaire meuble, là où elle existe, (épaisseur comprise entre 0.5 m et 1.5 m, d'après les résultats de cette campagne).

2.2.2 Domaine littoral ; le platier et le cordon de galets

2.2.2.1 Le platier

Le recul des falaises laisse à son pied une plate-forme d'abrasion littorale, ou platier rocheux, dont la largeur est minimale au niveau d'Antifer. Ce platier est entaillé de rigoles, appelés carniaux, orientés perpendiculairement à la côte, parfois bien profondes (Photo 2-1, tirée de Augris *et al.*, 2004, Réf. 4).

La largeur des estrans associés à ces platiers est de l'ordre de 200 à 400 m, excepté au voisinage de pointes rocheuses, où il est bien plus étroit – comme dans le secteur du cap d'Antifer, où la largeur de l'estran est localement inférieure à 100 m.

La transition entre l'estran et les très petits fonds est bien souvent marquée par un abrupt, parfois deux.



Photo 2-1 : Rigoles d'écoulement sur le platier (cliché : S. Costa, in Augris et al., 2004, Réf. 4).

2.2.2.2 Les sables

En dehors de certaines plages situées entre Le Havre et Antifer, la présence de sable est assez rare sur ces platiers : on le rencontre sous forme de placage dans les creux des platiers, ou occasionnellement en haut d'estran, ou encore lorsque ce sable est bloqué par des ouvrages (plage de sable à l'ouest des ouvrages d'eau de la centrale de Penly).

Sur l'estran, la localisation des secteurs sableux entre le cap d'Antifer et Le Tréport, et la quantification de leur surface, ont été obtenues par analyse de clichés aériens de l'IGN à différents instants : 1966, 1986, 1995, 1999 (Albaret et al., 2004, Réf. 4 ; Costa, 2009, Réf. 15), ainsi que par inspection de terrain à basse mer tout au long du littoral en 2007 (Guerrero, 2007, Réf. 25).

Le linéaire a été découpé en 4 zones : du cap d'Antifer à Yport, de Fécamp à Saint-Valéry-en-Caux, de Veules-les-Roses au cap d'Ailly et enfin de Varengeville-sur-Mer au Tréport (Figure 2-9) - ce qui permet de suivre la dynamique des ensablements.

A l'échelle de l'ensemble du littoral examiné, le recensement montre une augmentation continue des surfaces ensablées de 1966 à 1995, puis une décroissance en 1999, suivie d'une nouvelle augmentation en 2007 (Figure 2-10). Au niveau du littoral compris entre Varengeville-sur-Mer et Le Tréport – secteur sur lequel se situe le CNPE de Penly –, cette dynamique est également bien nette, avec un ensablement encore plus marqué lors de l'inspection de 2007.

A noter que d'après les analyses morphoscopiques, minéralogiques, calcimétriques et granulométriques de ces sables, leur origine serait essentiellement marine (Guerrero, 2008, Réf. 26). Les clichés et missions sur site sont cependant trop espacés dans le temps pour en tirer des conclusions nettes sur les tendances à moyen terme de l'évolution de l'ensablement : en particulier, les événements météorologiques précédant chaque cliché jouent un rôle important sur l'aspect quantitatif de l'ensablement.

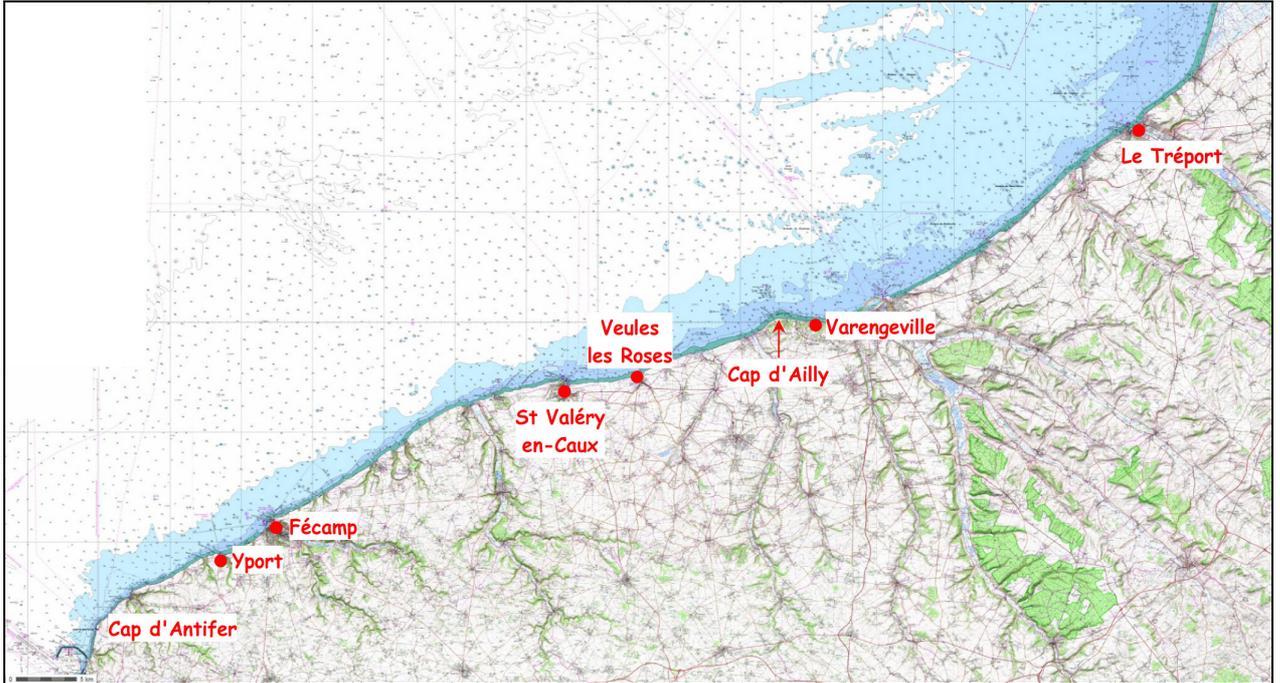


Figure 2-9 : Linéaire côtier.

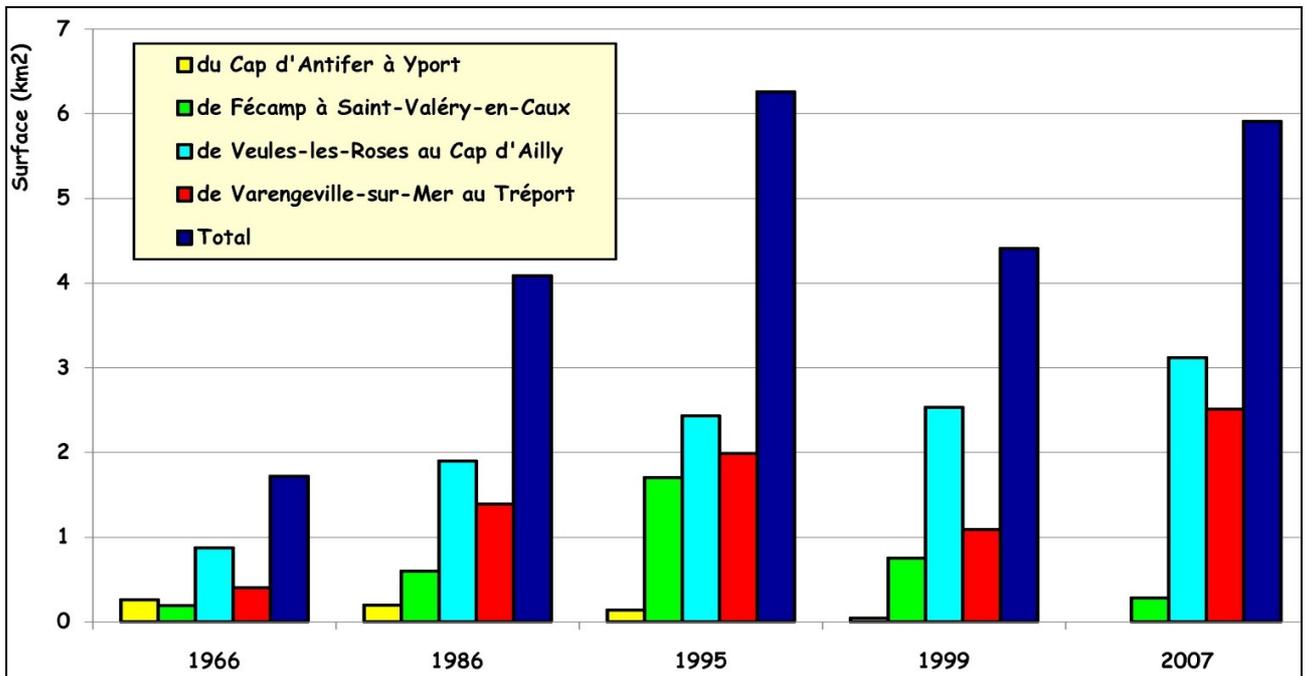


Figure 2-10 : Evolution des surfaces d'estran couvertes par le sable entre le Cap d'Antifer et Le Tréport (Costa, 2009, Réf. 15).

Par contre, il est plus instructif de raisonner en relatif – ce qui par ailleurs supprime le biais lié au changement de méthodologie en 2007 - et d'exposer l'évolution de la contribution de chaque secteur à l'ensablement global. La Figure 2-11 montre ainsi un déplacement progressif vers l'est de la contribution maximale de chaque secteur :

- maximale en 1966 pour le secteur s'étendant du cap d'Antifer à Yport, décroissant ensuite jusqu'à un ensablement nul en 2007,
- croissant progressivement jusqu'en 1995, décroissant graduellement ensuite pour le secteur s'étendant de Fécamp à Saint-Valéry-en-Caux,
- maximal en 1999 pour le secteur s'étendant de Veules-les-Roses au cap d'Ailly,
- et enfin maximal en 2007 pour le secteur s'étendant de Varengeville-sur-Mer au Tréport.

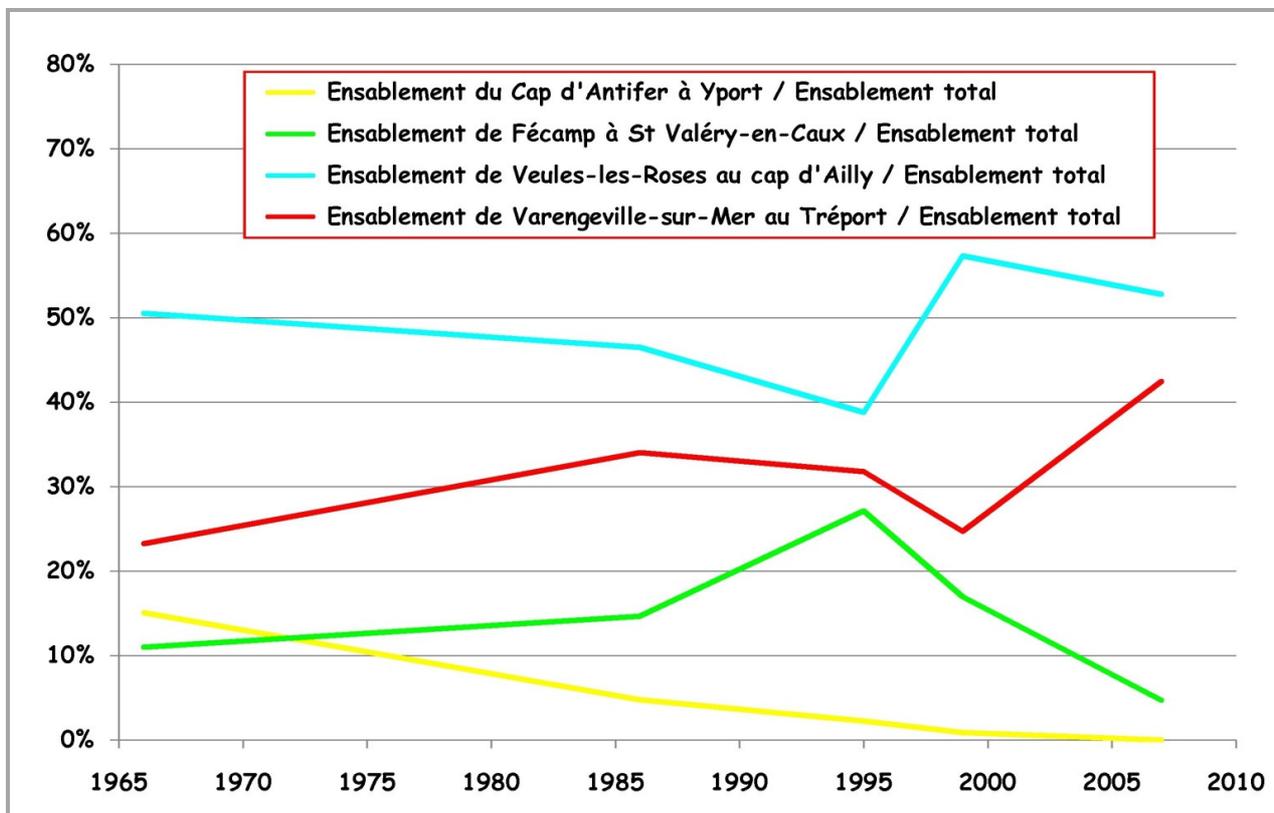


Figure 2-11 : Evolution à moyen terme de la contribution de chaque secteur à l'ensablement global de l'estran entre le cap d'Antifer et Le Tréport.

2.2.2.3 Les galets

Les galets, libérés lors de l'érosion de la falaise, sont poussés par la houle en haut d'estran, et s'accumulent en pied de falaise.

En l'absence d'obstacle qui le bloque, la largeur de ce cordon, lorsqu'il existe, est de l'ordre de 10 à 20 m, pour une épaisseur de l'ordre du mètre. Il est sensiblement plus large entre La Hève et Antifer (de l'ordre de 50 à 60 m de largeur : LCHF-BRGM, 1987), ou encore de Saint-Pierre-en-Port à Veulettes (30 à 40 m de large).

Par contre, en présence d'obstacles au transit de galets (protection par épis ou d'aménagements portuaires, *i.e.* le plus souvent au débouché des vallées), ce cordon prend de l'ampleur, et sa largeur peut alors dépasser une centaine de mètres : c'est le cas sur la plage de Dieppe, contre la digue ouest.

Il convient de souligner que ces cordons ne sont pas entièrement constitués de galets, bien que leur apparence extérieure puisse le laisser supposer : en réalité, dans les zones d'accumulation, la teneur en sable et graviers est de l'ordre 50 % du volume du cordon, et peut même atteindre 70 % (Costa, 1997, Réf. 13) ; cette teneur diminue lorsque la largeur du cordon décroît. La répartition des matériaux dans le cordon montre un accroissement progressif de la teneur en sable et graviers du sommet vers la base du cordon (Figure 2-12).

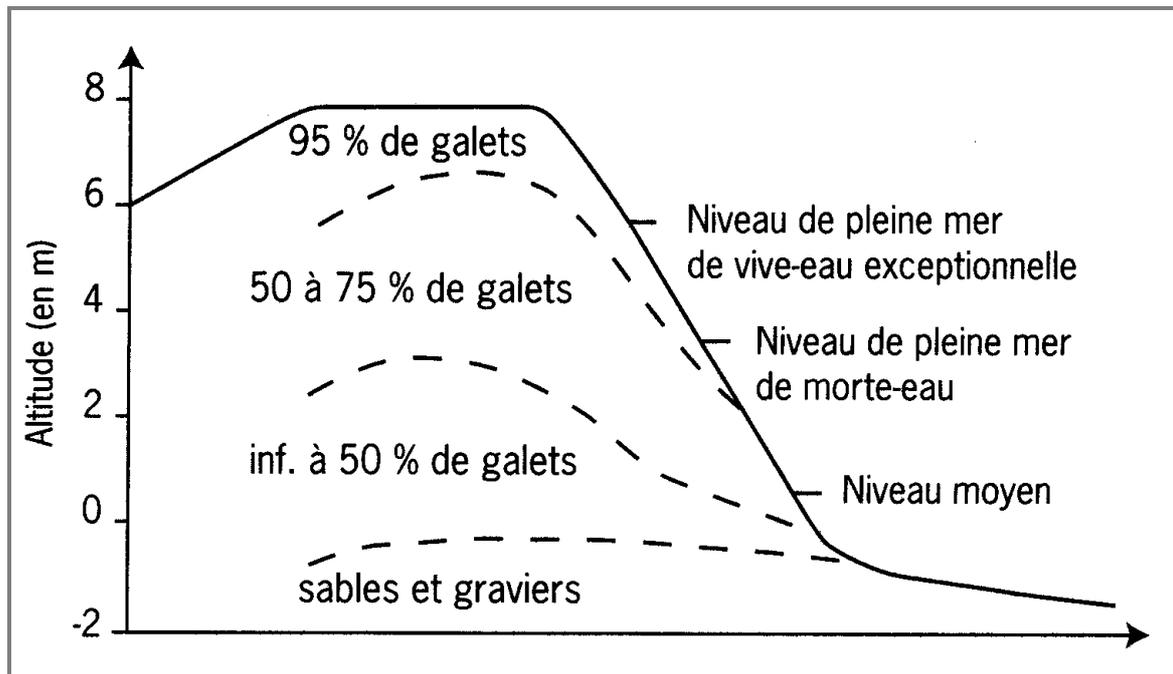


Figure 2-12 : Structure interne du cordon des Bas-Champs, d'après Migniot et Bellessort (1974, Réf. 39)

2.3 PARAMETRES METEO-OCEANIQUES

2.3.1 Le niveau de la mer

2.3.1.1 Niveau de marée astronomique

Le Tableau 2-1 indique les valeurs des niveaux caractéristiques de marée astronomique au port de Fécamp (49°46'N – 0°22'E) fournis par le SHOM (Réf. 48). Les niveaux d'eau sont donnés par rapport au Zéro Hydrographique. Ils dépendent du coefficient de la marée considérée. Ce coefficient de marée est un indicateur simple permettant de comparer l'amplitude des marées. Un coefficient de 70 correspond à une marée moyenne. Des coefficients de 45 et 95 correspondent respectivement des marées moyennes de morte-eau et de vive-eau. Lors des marées exceptionnelles d'équinoxe, ce coefficient peut atteindre 120 lors de la vive-eau et 20 lors de la morte-eau. Le niveau des plus hautes mers à Fécamp est de 9,07 m.

A Fécamp, l'écart entre le Zéro Hydrographique et la référence altimétrique légale en France métropolitaine (IGN69) est de -4,435 m.

Niveaux de marée astronomique	Fécamp
Plus haute mer astronomique (PHMA)	9,07 m
Pleine mer moyenne de vive-eau (PMVE)	8,35 m
Pleine mer moyenne de morte-eau (PMME)	6,85 m
Niveau moyen (NM)	4,87 m
Basse mer moyenne de morte-eau (BMME)	2,80 m
Basse mer moyenne de vive-eau (BMVE)	1,20 m
Plus basse mer astronomique (PBMA)	0,27 m

Tableau 2-1 : Niveaux caractéristiques de marée astronomique au port de Fécamp référencés par rapport au Zéro Hydrographique. Source : Réf. 48.

2.3.1.2 Niveaux extrêmes

Les niveaux extrêmes résultent de la combinaison de la marée astronomique (prédictible) et des perturbations dues majoritairement aux conditions météorologiques que l'on nomme surcotes.

2.3.1.2.1 Surcotes

On appelle surcote (ou décote) l'écart entre le niveau d'eau observé et la marée astronomique prédite. Il est généré par les conditions météorologiques de vent et de pression et son influence est loin d'être négligeable puisqu'il peut dépasser le mètre dans certains ports lors d'épisodes de tempêtes.

A partir d'une étude sur les surcotes en Manche et dans le Golfe de Gascogne (Réf. 37, Figure 2-13) on constate que la surcote maximale calculée par le modèle est proche de 1,5 m dans la zone d'intérêt.

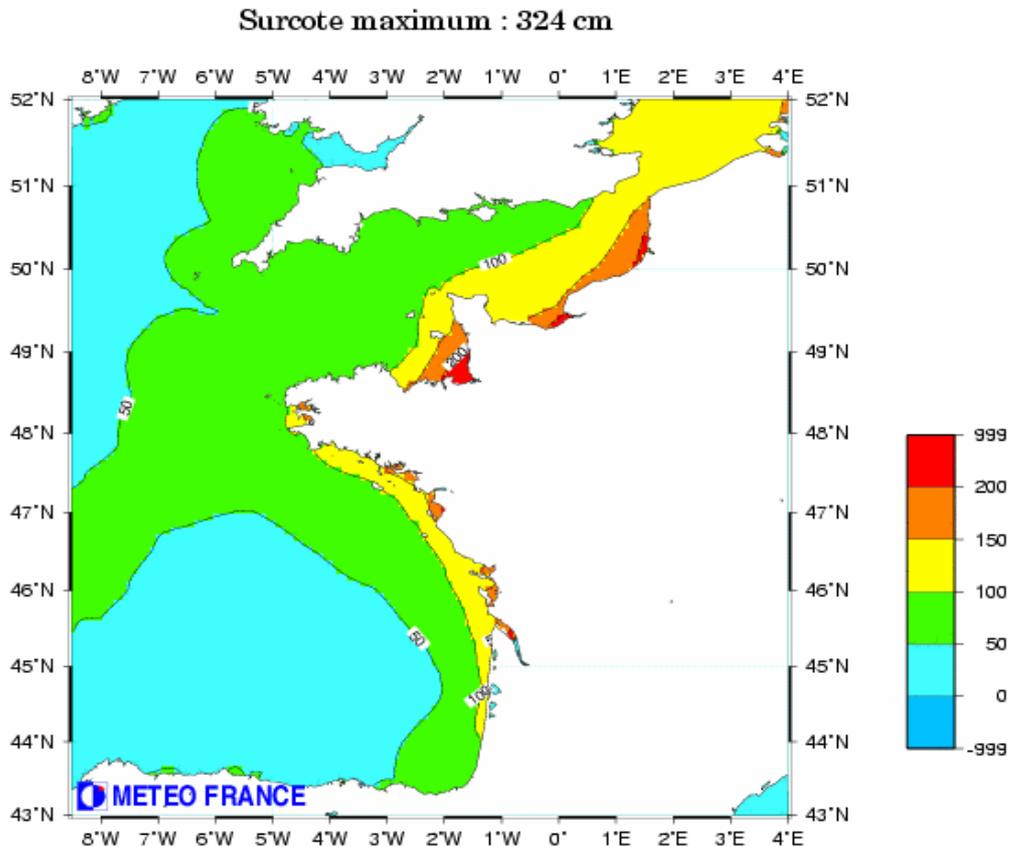


Figure 2-13 : Surcotes maximales calculées en Manche et dans le Golfe de Gascogne et le long des côtes françaises (Source : Réf. 37)

2.3.1.2.2 Niveaux extrêmes

Les résultats présentés ici sont issus d'une étude réalisée en 2012 par le SHOM et le CETMEF (Réf. 49) pour déterminer les niveaux marins extrêmes de pleine mer associés à différentes périodes de retour (10, 20, 50 et 100 ans) à l'aide d'observations marégraphiques de longue durée réalisées dans différents ports le long des côtes française de l'Atlantique, de la Manche et de la Mer du Nord. Il s'agit d'une mise à jour d'études antérieures réalisées en 1994 et en 2008 s'appuyant sur des observations supplémentaires et utilisant des techniques d'interpolation plus performantes et adaptées. Cependant cette mise à jour reste incomplète, et en particulier, les incertitudes (dus à la méthode de calcul et aux données disponibles) n'ont pas été estimées.

Le Tableau 2-2 synthétise les informations des niveaux extrêmes de pleine mer fournies par cette étude dans la zone du parc éolien. Une gamme de valeur est ici présentée pour chaque période de retour car elle représente la variabilité spatiale de l'évolution des niveaux entre le sud-ouest et le nord-est du parc éolien. En effet, comme le montrent les cartes présentées en annexe A (cf. Figure A-1 à **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), les valeurs minimales sont rencontrées au sud-ouest de la zone tandis que les valeurs maximales sont présentes au nord-est.

Pour en simplifier l'interprétation, les niveaux lus sur les cartes (estimés à 5cm près) ont également été ramenés au Zéro Hydrographique et au Niveau Moyen des mers à Fécamp.

Périodes de retour		Niveaux extrêmes maximum (m)
10 ans	/IGN	4,80 – 5,10
	/ZH	9,25 – 9,55
	/NM	4,35 – 4,70
20 ans	/IGN	4,85 – 5,15
	/ZH	9,30 – 9,60
	/NM	4,40 – 4,75
50 ans	/IGN	4,95 – 5,25
	/ZH	9,40 – 9,70
	/NM	4,50 – 4,85
100 ans	/IGN	5,00 – 5,30
	/ZH	9,45 – 9,75
	/NM	4,55 – 4,90

Tableau 2-2 : Tableau de synthèse des niveaux extrêmes de pleine mer en m /IGN (ligne supérieure), en m/ZH (ligne du milieu) et m/NM (ligne inférieure). La valeur de gauche est représentative du sud-ouest du parc éolien tandis que celle de droite est représentative du nord-est de la zone. D'après SHOM-CETMEF 2012 (Réf. 49).

2.3.1.3 Evolution à long terme du niveau de la mer

L'influence du changement climatique sur la composante eustatique du niveau marin est abordée ici d'après les dernières études du GIEC (Réf. 24). A l'échelle globale, les observations des dernières années indiquent une montée moyenne du niveau des eaux de $1,8 \text{ mm} \pm 0,5 \text{ mm}$ par an dans les 50 dernières années. Cette tendance s'accroît entre 1993 et 2003 : de $3,1 \text{ mm} \pm 0,7 \text{ mm}$.

Les perspectives d'évolution à l'horizon 2100 représentent une élévation comprise entre 18 et 59 cm selon le GIEC (Réf. 24). Cependant, de nombreux chercheurs estiment que ces prévisions sont trop optimistes. Des travaux interministériels sur l'impact du changement climatique et sur l'adaptation aux risques côtiers font l'hypothèse d'une élévation d'un mètre en 2100 (Réf. 12).

2.3.2 La houle et les clapots

Les vagues atteignant la zone d'étude sont générées essentiellement par les perturbations atmosphériques en provenance de l'Atlantique.

Les houles d'ouest générées en Atlantique se propagent en se dissipant vers l'est dans la Manche. Elles se superposent à la mer du vent levée en Manche. Plus élevés en automne et en hiver, les états de mer faiblissent au printemps et en été.

La base de données reconstituées ANEMOC (EDF-LNHE, CETMEF, FR) permet d'évaluer les caractéristiques statistiques de la houle dans la zone de projet, au point ANEMOC C_2597 (49°50,7'N / 0°12,96'E) situé sur une profondeur de 29,4 m. La position du point ANEMOC C_2597 est présentée sur la Figure 2-15. Les houles les plus fréquentes et les plus fortes sont issues du secteur ouest (cf. Figure 2-14).

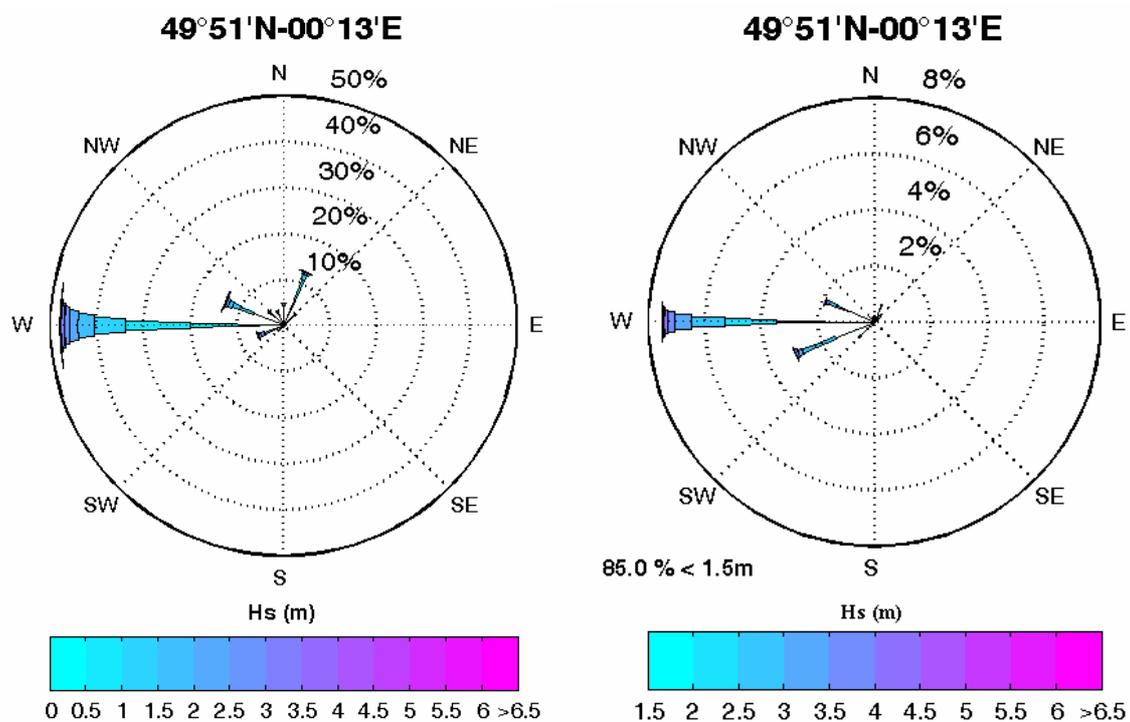


Figure 2-14 : Rose des houles (gauche) et rose des houles les plus fortes (droite).

Le Tableau 2-3 présente la distribution (Hs/Tp) au point 2597 (extrémité sud de la zone de projet), 70% des hauteurs significatives sont inférieures à 1 m et 92% sont inférieures à 2 m. On distingue deux périodes pics : l'une comprise entre 2 et 8 s correspondant à la mer du vent et associée à des vagues courtes ; l'autre comprise entre 8 et 20 s correspondant à la houle générée en Atlantique, atténuée au cours de sa propagation en Manche. Les mers du vent sont plus fréquentes et plus vigoureuses que les houles ; les périodes pic les plus courantes passent progressivement de 4-5 s pour les agitations les plus faibles à 11 s pour les plus violentes.

La Figure 2-15 présente l'évolution spatiale de la hauteur significative moyenne sur une année (2010). Les états de mer se dissipent au fur et à mesure de leur propagation vers le littoral. La hauteur significative moyenne des états de mer est de l'ordre de 1 m sur la partie la plus au large du parc.

Hs (m)	0<<0,5	0,5<<1	1<<1,5	1,5<<2	2<<2,5	2,5<<3	3<<3,5	3,5<<4	4<<4,5	4,5<<5	5,5<<5	5,5<<6	Total
2<<3	4,17	0,87	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,04
3<<4	27,76	33,48	0,32	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61,66
4<<5	39,33	96,79	23,27	0,36	0	0	0	0	0	0	0	0	159,7
5<<6	56,66	64,33	65,33	21,40	1,11	0	0	0	0	0	0	0	208,9
6<<7	39,60	35,66	40,54	40,40	17,21	3,04	0,13	0	0	0	0	0	176,6
7<<8	49,89	18,49	10,32	12,93	16,48	12,01	3,25	0,67	0,02	0	0	0	124,1
8<<9	64,87	13,61	1,18	0,93	2,06	5,49	5,54	1,85	0,33	0,08	0,01	0	95,94
9<<10	64,09	10,60	0,22	0	0,02	0,11	0,65	1,36	1,04	0,36	0,06	0,02	78,53
10<<11	42,43	6,59	0,04	0	0	0	0	0	0,10	0,32	0,16	0,07	49,74
11<<12	19,26	3,96	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0,03	23,32
12<<13	8,08	1,82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9,90
13<<14	2,33	0,75	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3,11
14<<15	1,61	0,38	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1,99
15<<16	0,62	0,21	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,83
16<<17	0,41	0,03	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,44
17<<18	0,18	0,05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,24
18<<19	0,02	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07
19<<20	0,02	0,04	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,07
Total	421,3	287,7	141,3	76,01	36,88	20,65	9,58	3,89	1,48	0,77	0,23	0,13	1000

Tableau 2-3 : Diagramme (Hs/Tp) pour un point au voisinage du parc éolien (-29,4 m).

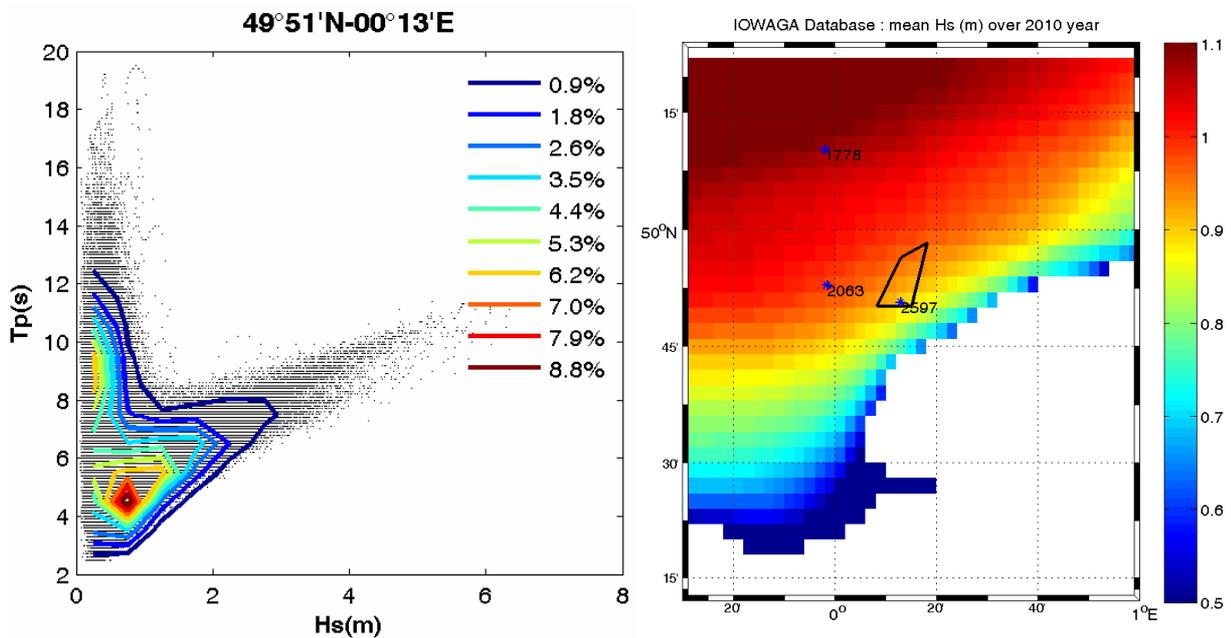


Figure 2-15 : Diagramme (Hs/Tp) au point Anemoc 2597 (gauche). Evolution spatiale de la hauteur significative moyenne pour l'année 2010 (droite).

2.3.3 Le courant

Les courants induits par la marée astronomique dominant au large de Fécamp sur l'ensemble de la colonne d'eau. En Manche, la marée est de type semi-diurne : la composante majeure est celle associée à la rotation de la Lune autour de la Terre (onde M2). Ce mouvement astronomique se traduit par un cycle de 12,4 heures décrivant les phases de courants alternés (flot et jusant), séparées par des étales (renverses de courant), soit environ 4 cycles par jour de variation de l'intensité des courants (4 périodes de courants forts et 4 étales au cours d'une journée).

Ce cycle principal est modulé par la position du Soleil par rapport à la Lune ; la combinaison des marées lunaires et des marées solaires provoque l'alternance des vives eaux et des mortes eaux qui se répètent environ 2 fois par mois. La vive-eau se traduit par des courants de marée plus forts que la moyenne, et la morte-eau par des courants moins forts.

Les marées moyennes de vive-eau et de morte-eau sont caractérisées par des coefficients de marée respectivement de 95 et 45. Une marée moyenne correspond à un coefficient de 70. Lorsque le Soleil et la Lune sont alignés avec la Terre, la marée de vive-eau est plus importante. Les marées exceptionnelles sont caractérisées par un coefficient de marée proche de 120. Les courants de marée atteignent leur intensité maximale.

Outre ces variations temporelles, les courants de marée peuvent être intensifiés dans certaines zones à proximité des côtes, en raison de la morphologie du trait de côte, des hauts-fonds ou à proximité d'épaves ou dans les chenaux. Les courants de marée sont ainsi plus forts dans les zones peu profondes et étroites appelées « raz » (terme signifiant également « courants »). Les courants de marée sont plus faibles au large (en eau plus profonde) ou dans les zones étendues.

L'étude des niveaux d'eau (cf. paragraphe 2.3.1) montre que le marnage aux abords de Fécamp est relativement important (plus de 7 m en vive-eau), ce qui induit des courants de marée intenses. Entre Antifer et Le Tréport, la marée est de type macro-tidale, et les courants sont de type alternatifs, sensiblement parallèles à la côte.

Les caractéristiques détaillées des courants de marée sont présentées au paragraphe 3.2 à partir de la modélisation numérique hydrodynamique mise en place pour les besoins de cette étude et réalisée par le code Telemac (EDF-LNHE).

Les champs de courants horaires, pour les deux coefficients de marée (C 45 et C 95), sont présentés en annexe A, à l'échelle du parc éolien, de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Dans la zone du parc éolien, le courant de flot porte à l'est-nord-est, son intensité maximale dans la zone du projet est de 1,4 m/s en marée de vive-eau (C95) et de 0,7 m/s en marée de morte-eau (C45).

Le courant de jusant porte à l'ouest-sud-ouest et est légèrement plus faible que le courant de flot : 1,2 m/s en marée de vive-eau (C95) et de 0,7 m/s en marée de morte-eau (C45).

2.3.4 Hydrologie

2.3.4.1 Les débits liquides

Le module de la Seine à l'embouchure est évalué aux environs de $480 \text{ m}^3/\text{s}$ (Garnaud, 2002, Réf. 22). Les débits d'étiage les plus faibles se situent aux environs de $40 \text{ m}^3/\text{s}$; les crues exceptionnelles peuvent dépasser $2\,000 \text{ m}^3/\text{s}$.

Plus près du projet, les fleuves côtiers sont plutôt modestes : la Valmont, qui se jette dans la mer à Fécamp (bassin versant : 159 km^2 ; module : $1,8 \text{ m}^3/\text{s}$) et le Durdent, qui débouche en mer près de Veulettes-sur-Mer, 20 km au nord-est (bassin versant : 355 km^2 ; module : $3,9 \text{ m}^3/\text{s}$).

2.3.4.2 Les débits solides

D'après Avoine (1994, in Lesueur *et al.*, 1999, Réf. 36), le débit solide de la Seine en particules fines (vases) sur la période 1960-1993 est de l'ordre de $650\,000 \text{ t/an}$ au niveau du barrage de Poses. Cette moyenne fluctue largement d'une année sur l'autre : de $130\,000 \text{ t}$ en 1973 à $1\,730\,000 \text{ t}$ en 1966. La granulométrie de ces sédiments fins est de l'ordre de 10 à 20 microns en régime de débit moyen, et entre 20 et 60 microns en crue.

Les apports estuariens à l'aval du barrage de Poses ne sont pas connus précisément ; ils représenteraient un supplément de l'ordre de 10 % par rapport à ces valeurs, si l'on supposait le débit solide proportionnel au débit liquide.

En ce qui concerne les sables, le barrage de Poses, à la limite de la remontée de la marée dynamique, empêche les apports venant de l'amont ; d'autre part, les apports estuariens à l'aval sont considérés comme négligeables (Programme Scientifique Seine-Aval, fascicule 3, 1999).

Si l'on suppose que l'érosion spécifique des bassins versants côtiers est similaire à celui de la Seine, l'apport solide de vases de l'ensemble de la Valmont et du Durdent s'établit à près de $8\,000 \text{ t/an}$.

2.3.4.3 La turbidité

De nombreuses informations indiquent l'existence d'une sorte de "fleuve côtier", de quelques kilomètres de large, s'étendant de l'embouchure de la Seine au Pas-de-Calais, voire même au-delà, et cheminant du sud-ouest, depuis l'embouchure de la Seine, vers le nord-est (Brylinski *et al.*, 1988, Réf. 10). En particulier, le devenir des marqueurs naturels provenant de la Seine plaide en ce sens. Ce couloir est visible sur les clichés satellites, et pourrait correspondre à une zone à plus forte turbidité (voir un exemple d'imagerie satellite, extrait du site de PREVIMER, sur la Figure 2-16).

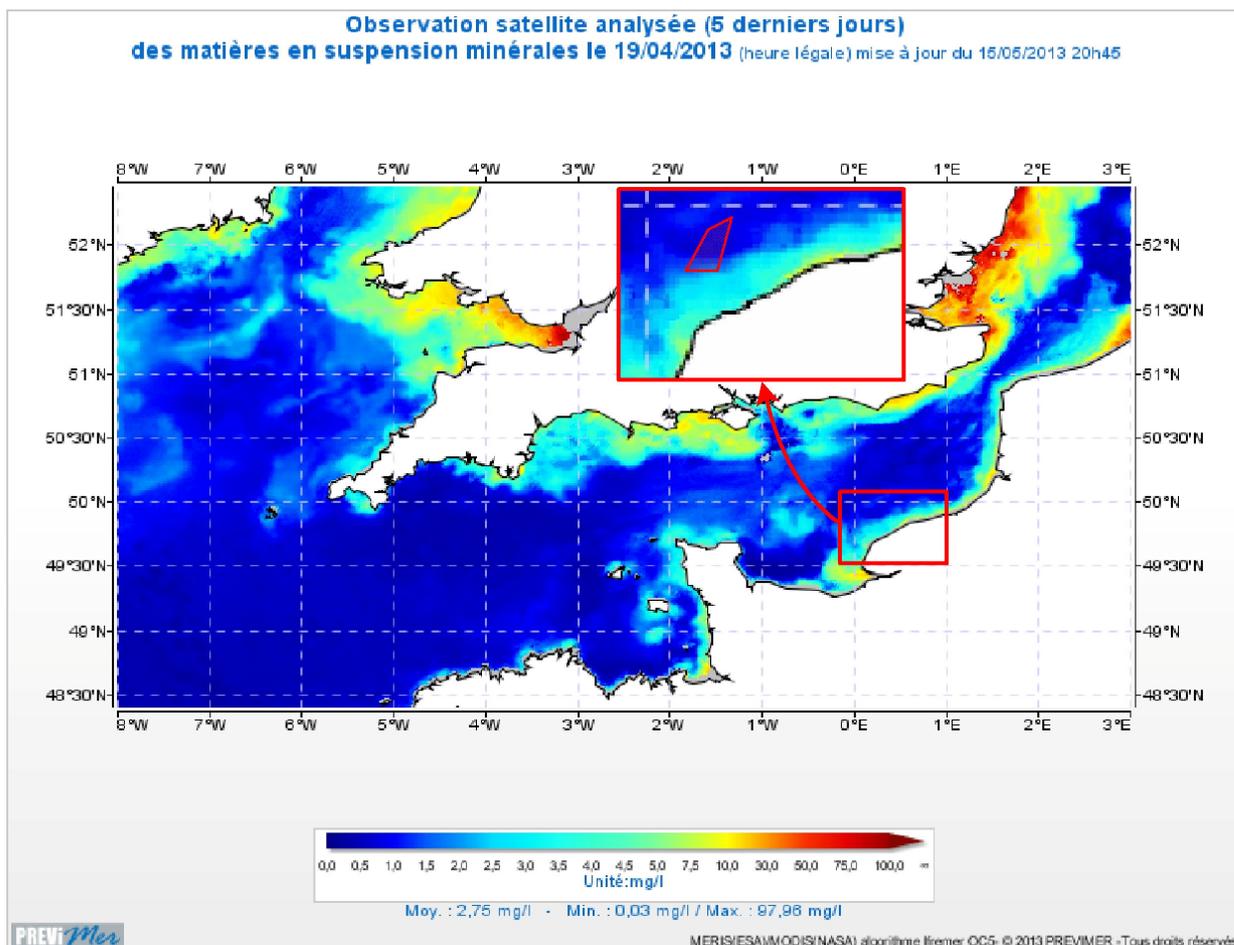


Figure 2-16 : Exemple d'observation satellite de la turbidité en Manche Orientale, extrait du site PREVIMER.

A noter que différentes études récentes montrent un envasement important de la baie de Seine depuis la fin des années 60 et plus particulièrement de l'estuaire depuis une quinzaine d'années. La comparaison de la répartition des vases en baie de Seine révèle notamment un fort développement des fonds vaseux depuis le cap de la Hève en direction d'Antifer. Ces évolutions dépassent les éventuelles variations saisonnières et caractérisent une dynamique de masse dont les mécanismes sont encore mal connus (migration du bouchon vaseux de la Seine vers l'embouchure ? Erosion des fonds de la baie de Seine, et notamment des bancs d'argiles fossiles ?), mais qui pourrait à terme affecter l'envasement du littoral du Pays de Caux.

A plus faible distance de la côte, l'aspect blanc crayeux des masses d'eau sur quelques centaines de mètres de large témoigne de leur charge substantielle en craie, provenant de l'érosion de la falaise.

Les mesures concernant les concentrations en matières en suspension sont assez rares et sont généralement réalisées par temps calme ; leurs résultats sont de ce fait minorés par rapport au régime annuel moyen. L'évaluation de ce régime moyen peut cependant être abordée à partir des taux d'envasement portuaire – ce qui aboutit à une concentration moyenne annuelle de l'ordre de 50 à 100 mg/l (Latteux, 2001, Réf. 34). Ces valeurs sont applicables en zone côtière, les valeurs croisées entre données satellitaires et les quelques mesures réalisées plus au large montrent des valeurs plutôt situées entre 1 et 20 mg/l en conditions normales et en fonction de la saison.

2.4 EVOLUTION DU LITTORAL ET DES FONDS MARINS

2.4.1 Aménagement et évolution du littoral

2.4.1.1 Les ouvrages portuaires

La plupart des ports actuels de la côte haut-normande ont une ancienneté qui remonte à plusieurs siècles. Cependant, les ouvrages portuaires ne s'étendaient que très peu vers le large, et ne bloquaient donc que modérément le transport de sédiments – notamment de galets. Les jetées ne s'étendaient alors, tout au plus, qu'au niveau des plus basses mers. Les chenaux d'accès aux ports étaient d'ailleurs fréquemment encombrés de galets, qu'il fallait alors dégager.

Les travaux d'extension des digues ont été entrepris depuis le milieu ou la fin du XIX^{ème} siècle pour lutter contre l'invasion des accès par les galets.

Ces travaux et l'entretien des chenaux d'accès ont conduit à interrompre le cheminement des galets, partiellement (Saint-Valéry-en-Caux) ou (presque) totalement (Le Havre, Antifer, Fécamp, Dieppe, Le Tréport, ouvrages d'eau des centrales nucléaires de Paluel et de Penly).

Il en résulte une sectorisation du littoral en "unités sédimentaires", ou "provinces sédimentaires", qui possèdent, du fait du cloisonnement, une certaine autonomie au niveau sédimentologique.

2.4.1.2 Le recul des falaises

Les extractions de galets et les obstacles à leur cheminement naturel le long du rivage ont conduit à accélérer le recul des falaises, surtout à l'aval des ouvrages bloquant leur transit, où la vitesse de recul est approximativement doublée sur une distance de l'ordre de 1 à 2 km (Costa, 2000, Réf. 14).

La Figure 2-17 détaille les vitesses moyennes de recul de la falaise par secteur (cellule hydro-sédimentaire), en relation avec la lithologie, d'après les travaux de S. Costa (2000, Réf. 14) : le recul est de l'ordre de 10 à 15 cm/an entre Antifer et Fécamp.

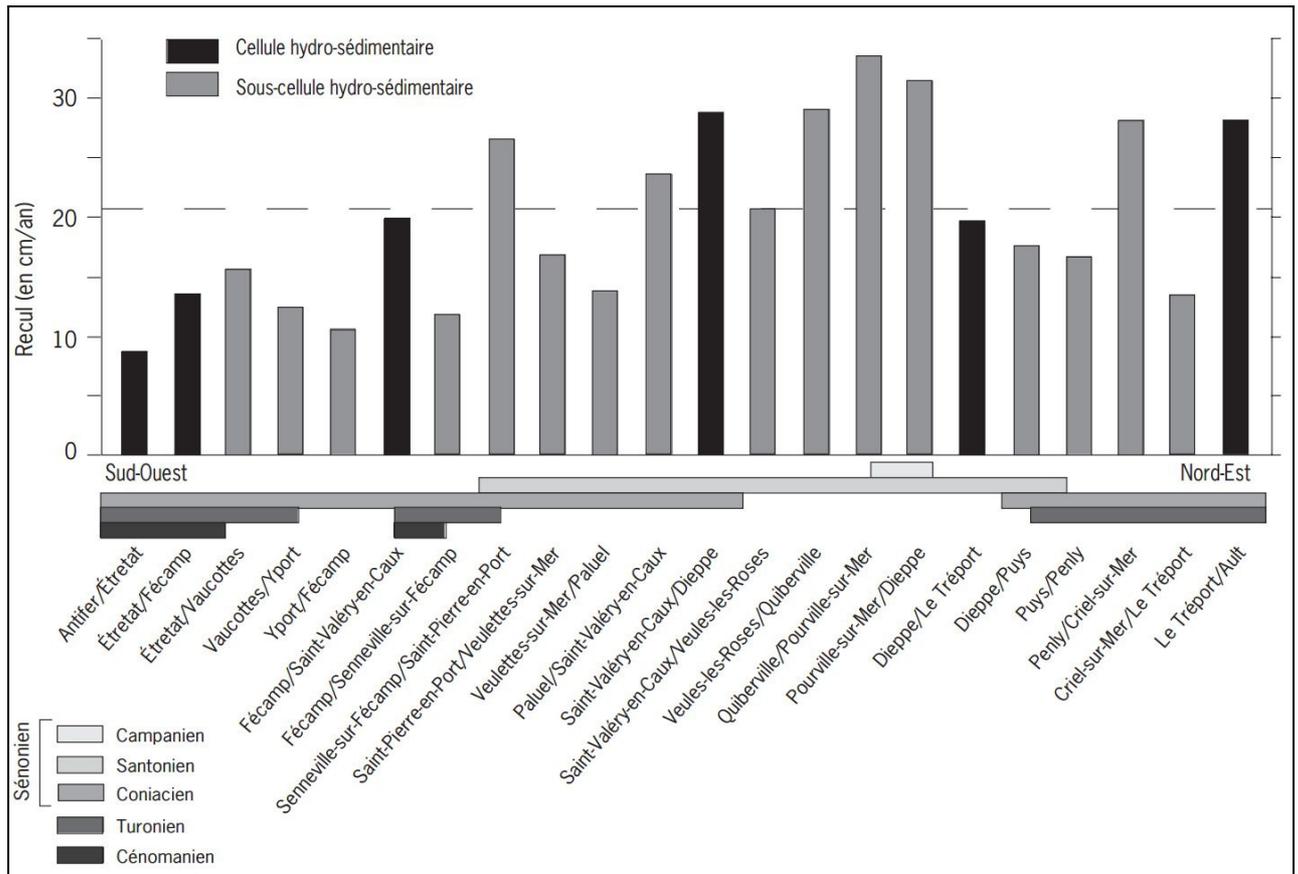


Figure 2-17 : Recul de la falaise du Pays de Caux, en relation avec la lithologie (Costa, 2000, Réf. 14)

2.4.1.3 L'érosion du platier

En l'absence d'observations précises, il est généralement considéré que le recul de l'estran suit en moyenne celui de la falaise.

Ce recul est cependant bien plus considérable lorsque le platier se trouve à l'aval immédiat d'ouvrages importants de blocage du transit de sédiments : ainsi à Bruneval, au nord d'Antifer, le départ de galets s'est accompagné d'une érosion du platier de 1,5 à 2 m en moins de 2 ans (LCHF, 1986, Réf. 35). De la même façon, à l'est immédiat de la nouvelle digue de Dieppe, l'aspect du platier témoigne d'une usure particulièrement forte.

2.4.2 Evolution des fonds dans le secteur du parc éolien

Dans le secteur de la ferme éolienne, 2 levés bathymétriques sont disponibles :

- ➡ le levé SHOM de 1975,
- ➡ le levé réalisé par ID SCOPE en mars 2011.

La Figure 2-18 présente la carte bathymétrique résultant du traitement des minutes des sondages réalisés entre 1974 et 1978 (sondages uniquement de 1975 dans l'emprise du projet) : on y remarque quelques chenaux et singularités vers l'ouest et le nord-ouest de l'emprise, dans une bathymétrie sinon assez régulière.

Un artefact apparaît assez nettement : la présence de bandes le long desquelles la bathymétrie est sensiblement plus haute qu'ailleurs.

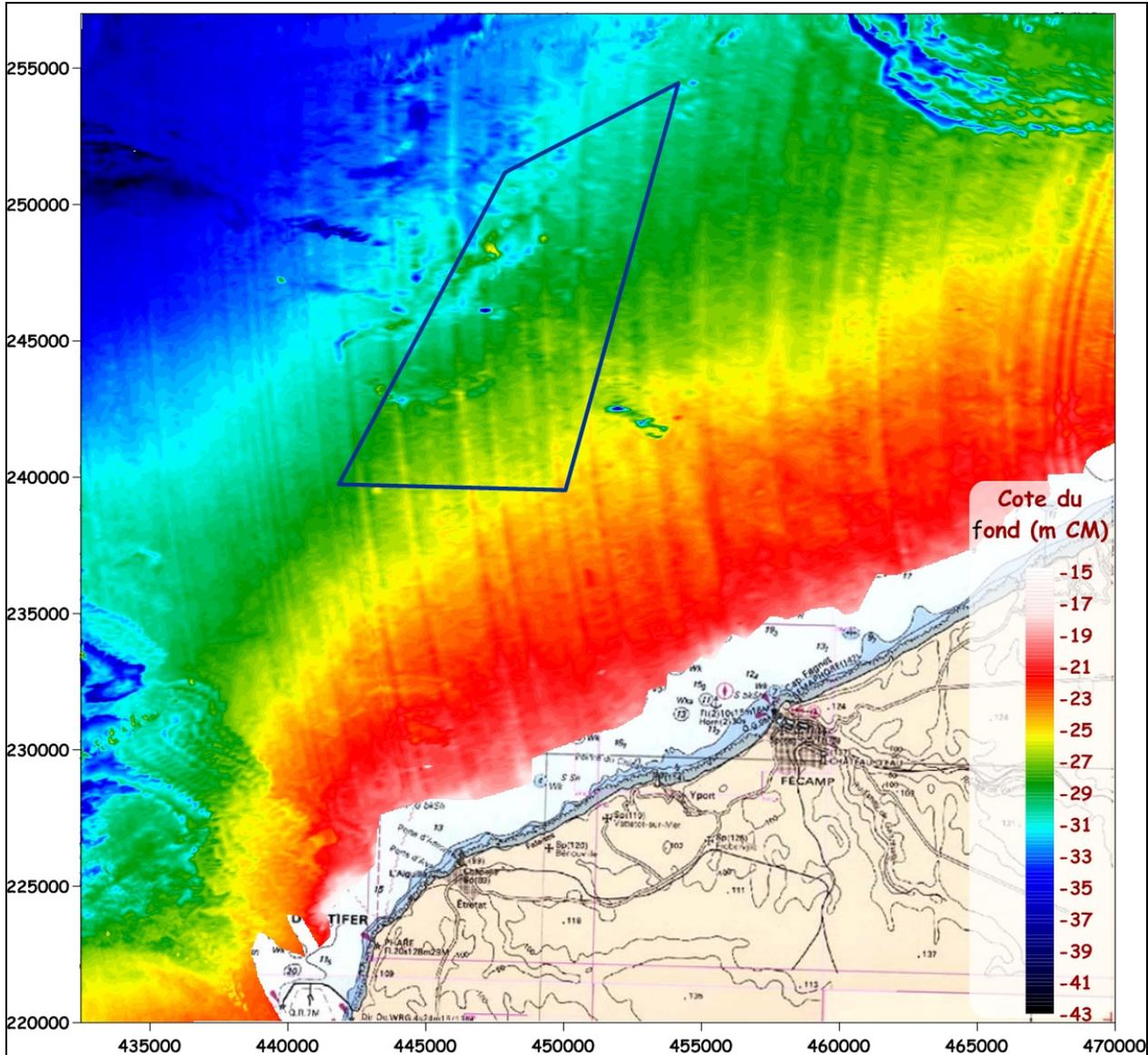


Figure 2-18 : Bathymétrie de 1974 à 1978 dans la région du projet de ferme éolienne.

La Figure 2-19 décrit la bathymétrie relevée en 2011 : les mêmes accidents de terrain sont repérables dans le secteur ouest et nord-ouest de l'emprise du projet, avec une meilleure résolution : des chenaux d'environ 2 m de profondeur, ainsi qu'une fosse particulièrement profonde – près de 10 m de profondeur.

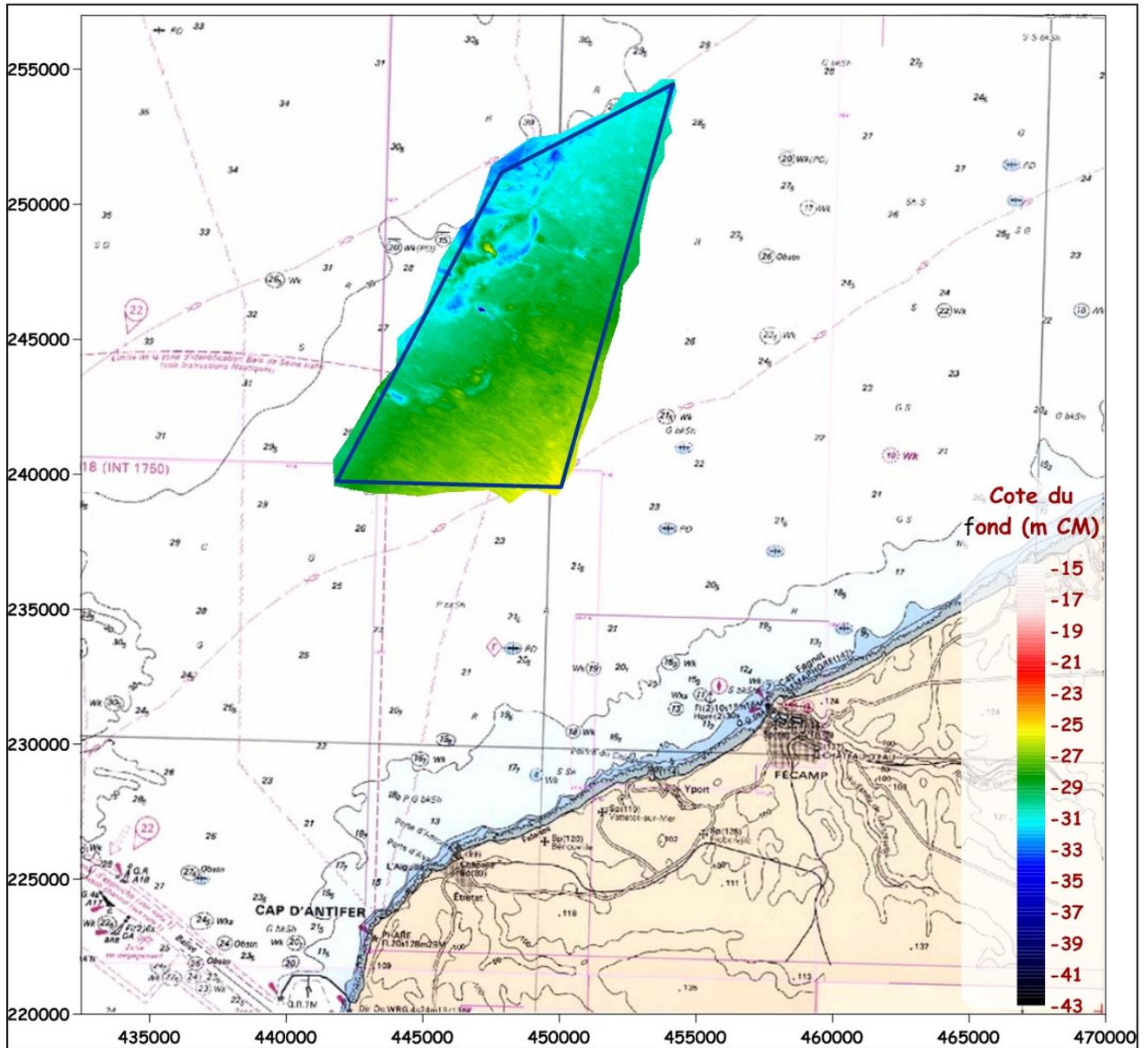


Figure 2-19 : Bathymétrie de 2011 dans l'emprise du projet.

La Figure 2-20 présente l'évolution des fonds entre 1975 et 2011 dans l'emprise du projet : cette figure donne l'image d'une érosion généralisée, homogène à l'échelle régionale, mais parcourue de couloirs d'érosion renforcée.

L'artefact discerné sur la Figure 2-18 (bathymétrie de 1974 à 1978), et à nouveau visualisé sur la Figure 2-20, a conduit à mettre en relation ces bandes d'érosion avec le trajet du navire hydrographique : les alignements des points de sondage repérables sur la Figure 2-21 mettent en évidence ces routes du navire, et donnent à penser que les artefacts proviennent alors d'un défaut lors de la réduction des sondes (prise en compte des hauteurs instantanées de la marée).

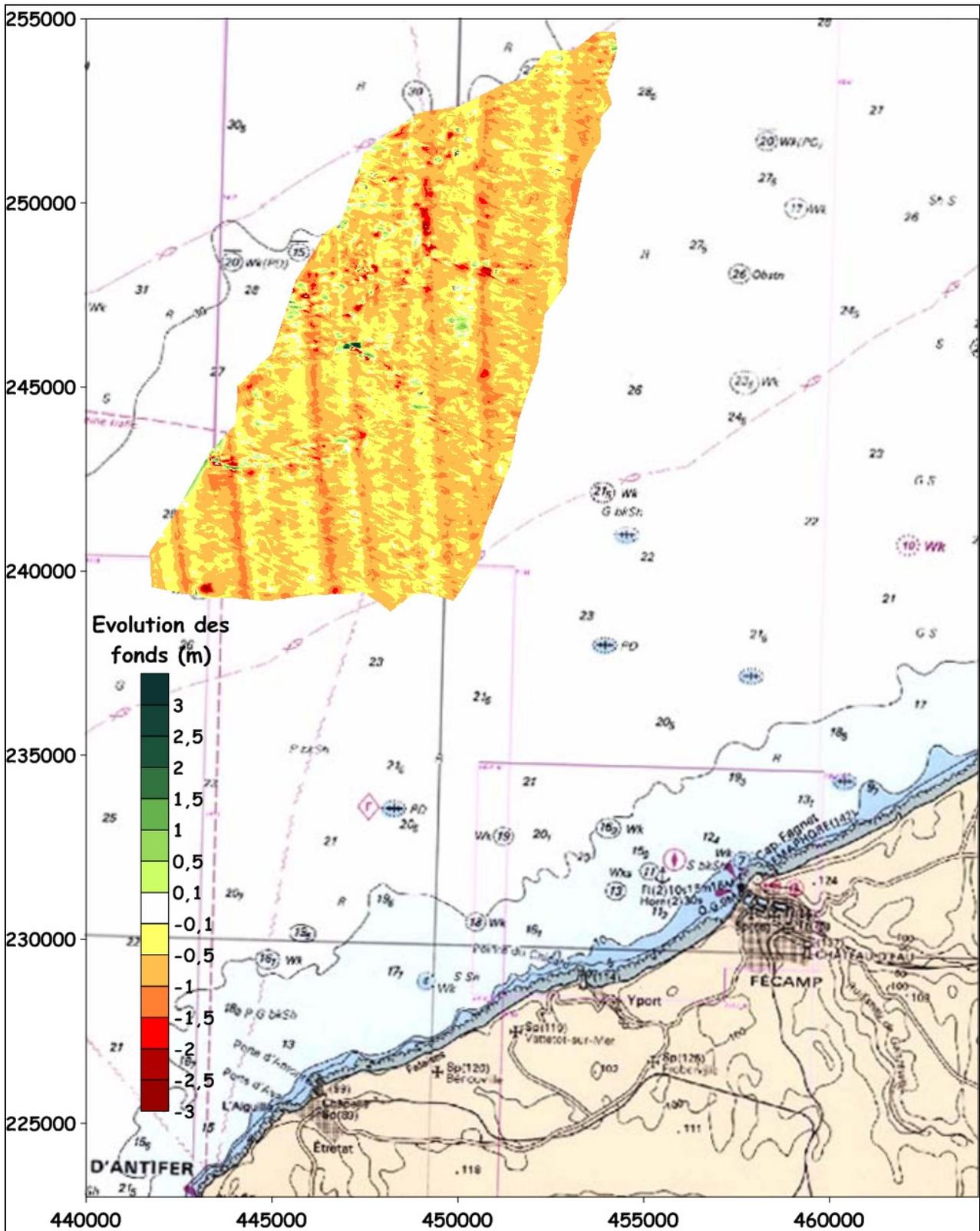


Figure 2-20 : Evolution des fonds dans l'emprise du projet entre 1975 et 2011.

De plus, la cartographie de l'évolution des fonds déterminée par ailleurs entre les sondages SHOM de 1975 et de 1989 montrent la même configuration : érosion généralisée avec des bandes d'érosion plus fortes alignées le long de routes du navire hydrographique. Tous ces constats concourent à diagnostiquer un problème de réduction de sondes sur le levé de 1975 ; par contre, compte tenu du caractère homogène de l'érosion observée (une fois filtrées les bandes d'érosion renforcée), le plus probable, en réalité, s'avère être la stabilité des fonds marins.

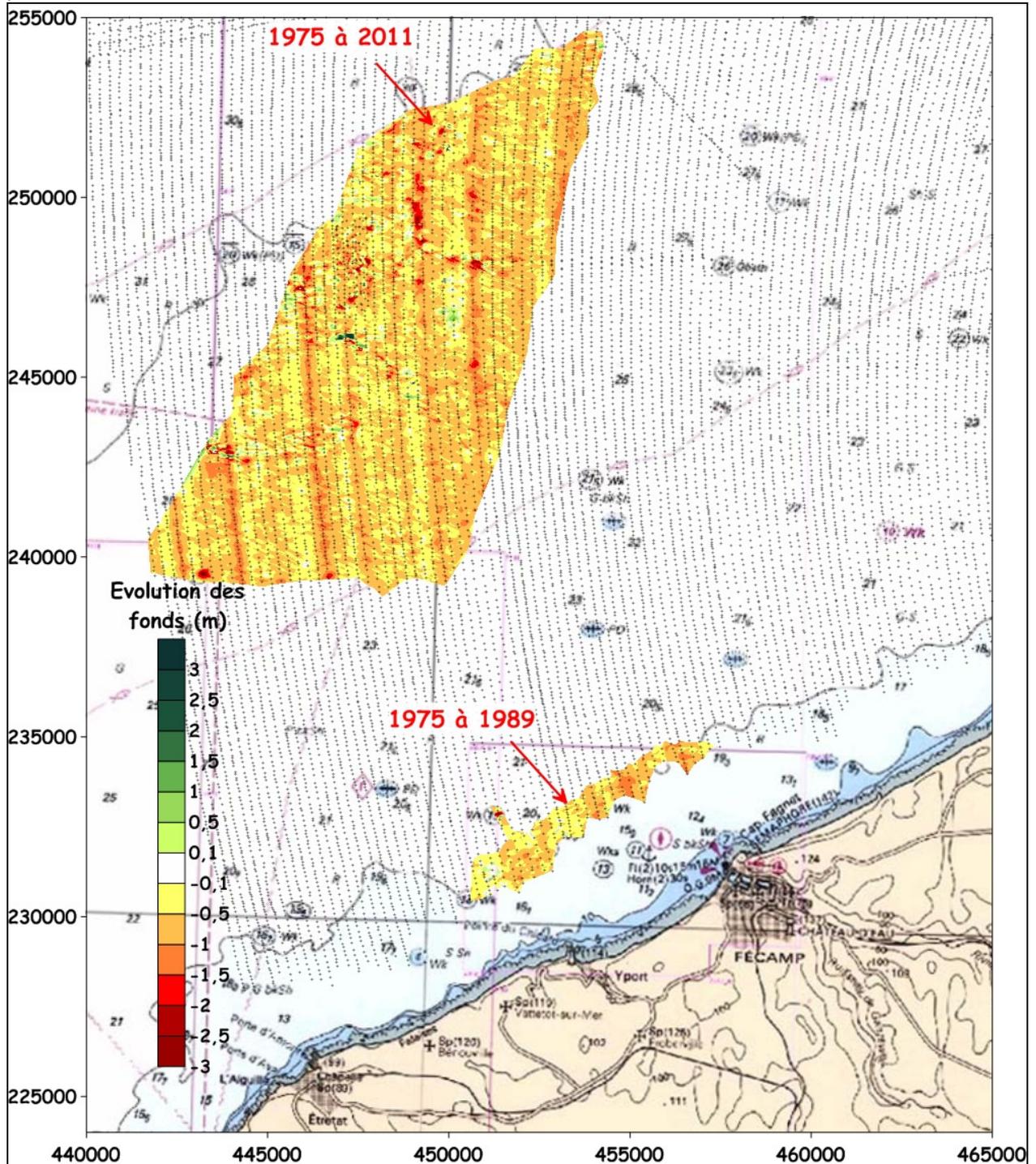


Figure 2-21 : Evolution des fonds entre 1975, 1989 et 2011, avec visualisation du tracé des routes du navire hydrographique.

3 - IMPACT HYDRODYNAMIQUE

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence du projet de parc éolien au large de Fécamp sur l'hydrodynamique locale et régionale. Pour cela, des simulations hydrodynamiques dans les conditions naturelles (absence des fondations) sont réalisées dans une première phase du projet. Elles permettent de caler et de valider le modèle mis en place. Puis, les fondations des turbines sont insérées dans la grille de calcul et les résultats obtenus sont comparés à la situation de référence (conditions naturelles). Cette méthodologie permet d'évaluer l'incidence du projet éolien.

3.1 DESCRIPTION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

Le modèle hydrodynamique retenu pour l'étude est le code Telemac-3D, développé par EDF-LNHE, car il repose sur l'utilisation de maillages non-structurés qui eux seuls permettent de bien représenter les géométries complexes et, pour notre étude, d'inclure des fondations dans le maillage.

3.1.1 Le code Telemac-3D

Le logiciel Telemac-3D résout les équations de Navier-Stokes tridimensionnelles avec surface libre (avec ou sans l'hypothèse de pression hydrostatique) et de transport-diffusion de grandeurs intrinsèques (température, salinité, concentration de matières en suspension). Ses principaux résultats sont, en chaque point du maillage de résolution, la vitesse dans les trois directions et la concentration des grandeurs transportées. Sur le maillage en surface, le résultat principal est la hauteur d'eau. Telemac-3D trouve ses principales applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale et est capable de prendre en compte les phénomènes suivants :

- Influence de la température et/ou de la salinité sur la densité,
- Frottement sur le fond,
- Influence de la force de Coriolis,
- Influence de phénomènes météorologiques : pression atmosphérique et vent,
- Prise en compte des échanges thermiques avec l'atmosphère,
- Sources et puits de fluide et de quantité de mouvement à l'intérieur du domaine,
- Modèles de turbulences simples ou complexes (K-Epsilon) avec prise en compte des effets de la force d'Archimède (flottabilité),
- Zones sèches dans le domaine de calcul : bancs découvrants,
- Entraînement par le courant et diffusion d'un traceur, avec des termes de création ou de disparition.

3.1.2 Bathymétrie et maillage

3.1.2.1 Bathymétrie

Les données bathymétriques du SHOM ont été exploitées pour la construction du modèle. Il s'agit de points de sondes dont la résolution spatiale est d'environ 25 m. Ces données ont été complétées par un MNT de la Manche à une minute d'arc de résolution, par la digitalisation de points de sonde issus de carte marine du SHOM, ainsi que par les levés bathymétriques multifaisceaux haute résolution de la zone du projet, réalisé par IXSURVEY en mars 2013 (Réf. 31). La Figure 3-1 présente la répartition spatiale de ces différentes sources de données bathymétriques utilisées pour la création du MNT du modèle. Il est représenté dans sa forme finale par la Figure 3-2.

Le domaine de calcul s'étend du cap de la Hève (au nord du Havre) à l'ouest, jusqu'à la pointe d'Ailly (à l'ouest de Dieppe) à l'est. Les profondeurs d'eau sont exprimées en mètre par rapport au niveau moyen à Fécamp. Le système de projection utilisé est le Lambert 1 nord.

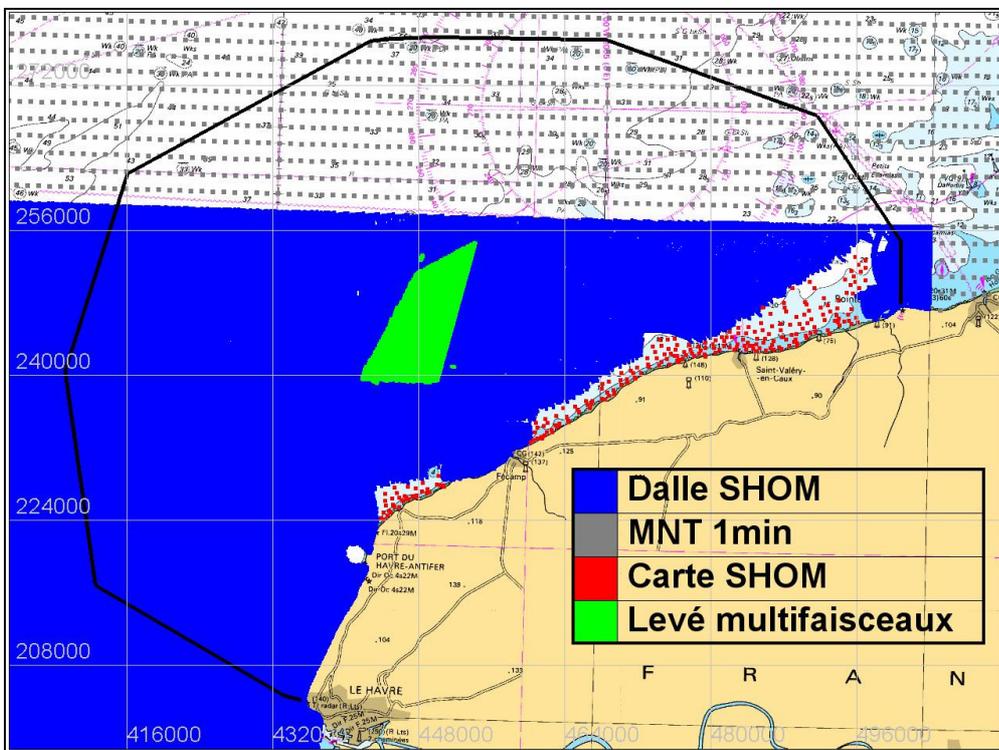


Figure 3-1 : Répartition spatiale des différentes sources de données bathymétriques utilisées pour la création du modèle numérique de terrain.

3 - Impact hydrodynamique

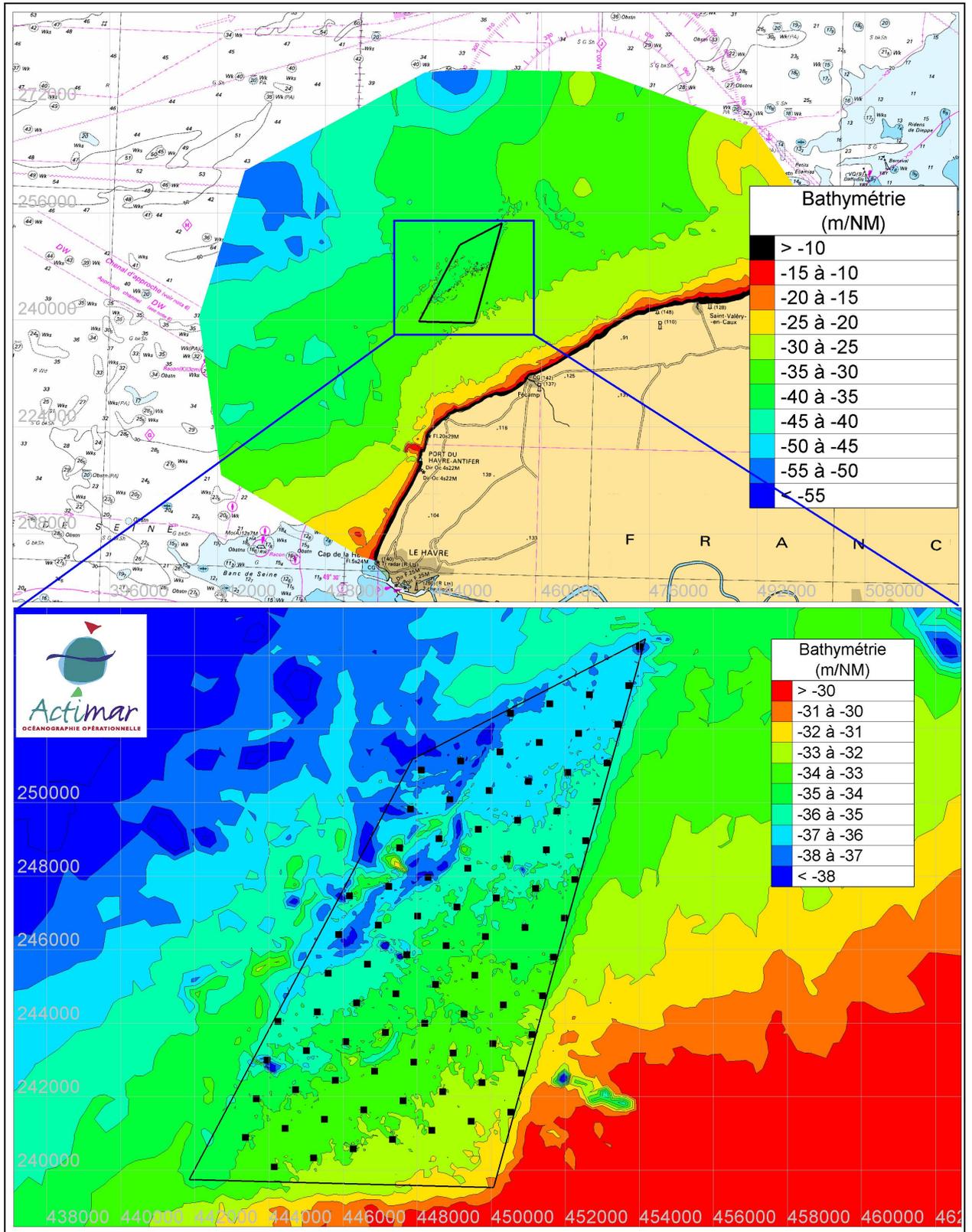


Figure 3-2 : Modèle numérique de terrain utilisé par les modèles : totalité du domaine (en haut), zoom sur le parc éolien (en bas). Le niveau de référence verticale est le niveau moyen des mers (NM) à Fécamp.

3.1.2.2 Maillage

Le maillage pour les conditions naturelles (sans les fondations) est présenté sur la Figure 3-3. Il est composé de 83 299 nœuds et de 166 319 éléments triangulaires. Au large de Fécamp, la taille des mailles est d'environ 3 kilomètres. La résolution du maillage diminue progressivement pour atteindre un raffinement d'environ 75 mètres dans la zone du parc éolien et un mètre autour de chaque éolienne. Dans la bande littorale, le maillage a une résolution de 500 mètres.

La discrétisation verticale comporte 16 niveaux sigma répartis selon l'illustration de la Figure 3-3 en fonction de la hauteur d'eau instantanée en chaque point du maillage horizontal ; ce qui permet d'obtenir un raffinement de la grille verticale aussi bien à proximité du fond que de la surface.

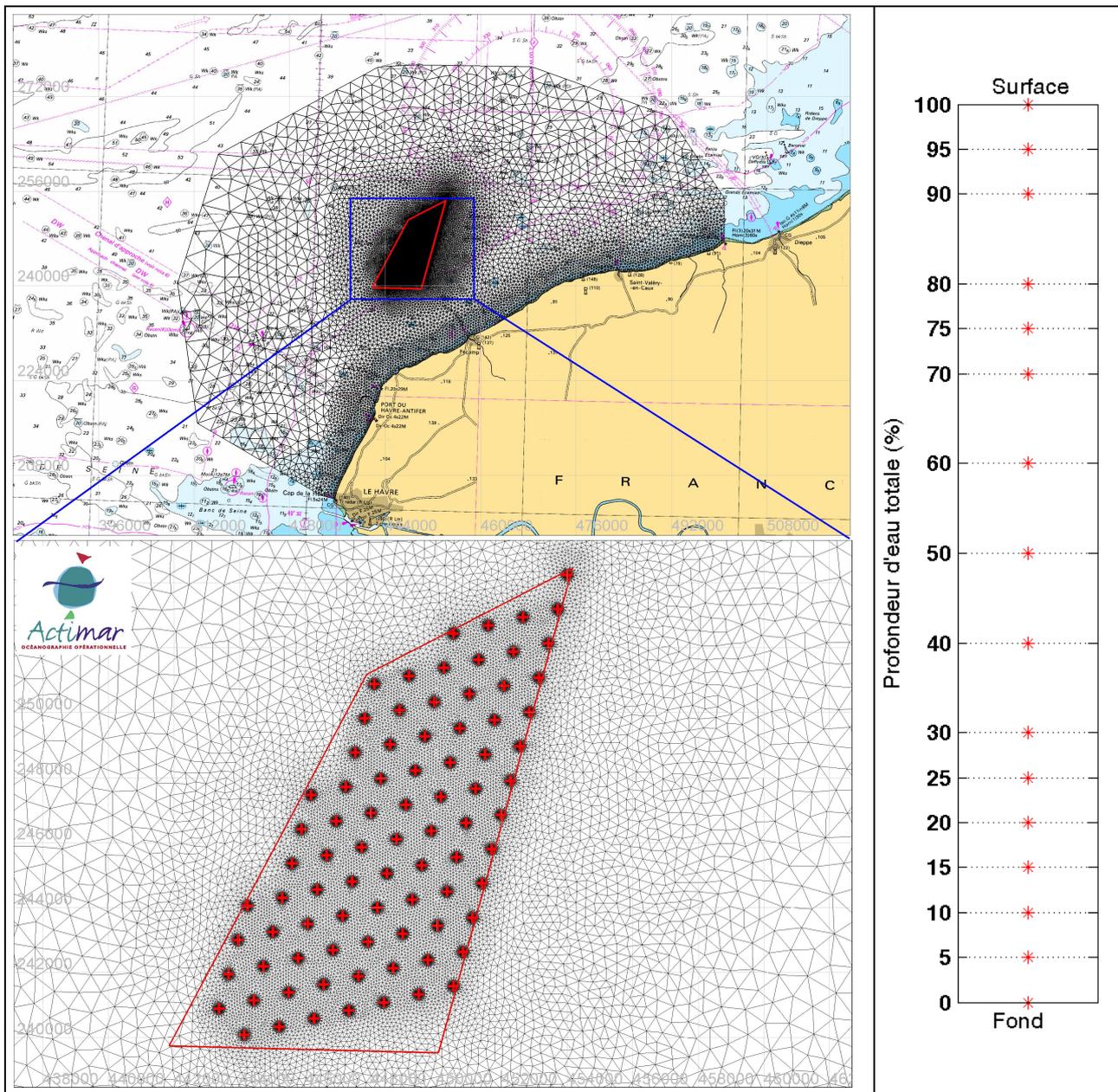


Figure 3-3 : A gauche : grille de calcul du modèle hydrodynamique à mailles triangulaires : totalité du domaine (en haut), zoom sur le parc éolien (en bas). A droite : répartition des 16 niveaux sigma en fonction de la hauteur d'eau locale.

3 - Impact hydrodynamique

La solution de fondations GBS (Gravity Base Structure) a été retenue pour la fondation des turbines. Le schéma de principe d'une fondation GBS est présenté sur la Figure 3-4. Il s'agit d'un ouvrage béton rempli de matériau de ballastage, mis en place directement sur le sol naturel ou sur une couche de nivellement permettant d'assurer la planéité de l'assise. Une couche de matériaux rocheux pourra être mise en œuvre en périphérie de la structure afin d'assurer une protection anti-affouillement de l'assise. Les dimensions retenues pour les 83 fondations composant le parc sont les suivantes :

- une première embase plane circulaire de 34 m de diamètre, d'une hauteur de 10 m ;
- une seconde partie conique de 15 m de hauteur, le cône ayant pour diamètre 15 m à la base et 8 m au sommet ;
- une dernière partie cylindrique de 8 m de diamètre, émergente.

Afin de représenter le plus fidèlement possible ces fondations, une attention particulière a été portée au maillage autour des éoliennes : la taille des mailles est de l'ordre du mètre au pied du mât ; elle augmente progressivement au fur et à mesure de l'éloignement (cf. Figure 3-5).

Le modèle hydrodynamique est construit à partir du projet de parc éolien établi au démarrage de l'étude d'impact. Il comporte 83 éoliennes à embase gravitaire. Un extrait du maillage est présenté Figure 3-6.

L'évaluation des effets s'effectue par différence entre les modélisations avec fondations et la modélisation en « conditions naturelles ». Pour éviter tout biais et/ou effet de lissage lié aux interpolations sur les grilles de calcul, on contraint les différentes modélisations à reposer sur des maillages strictement identiques en tout point extérieur aux fondations. Une illustration du maillage autour des positions d'éoliennes est présentée en Figure 3-5 et Figure 3-6.

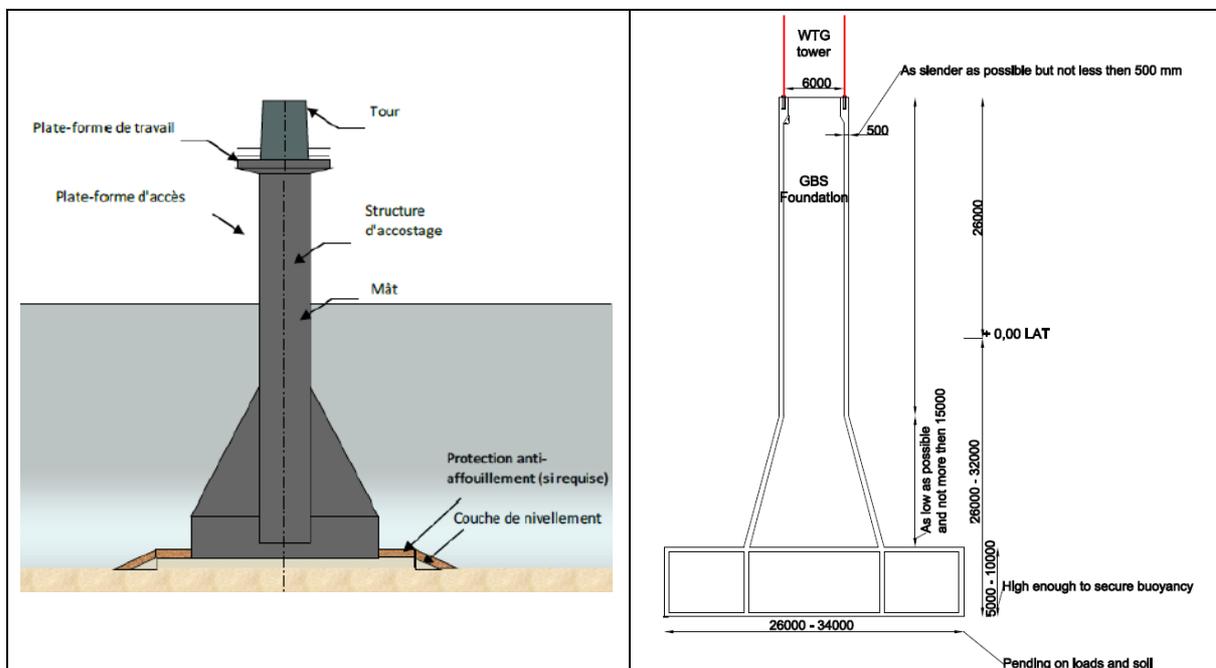


Figure 3-4 : Schémas de principe d'une fondation GBS.

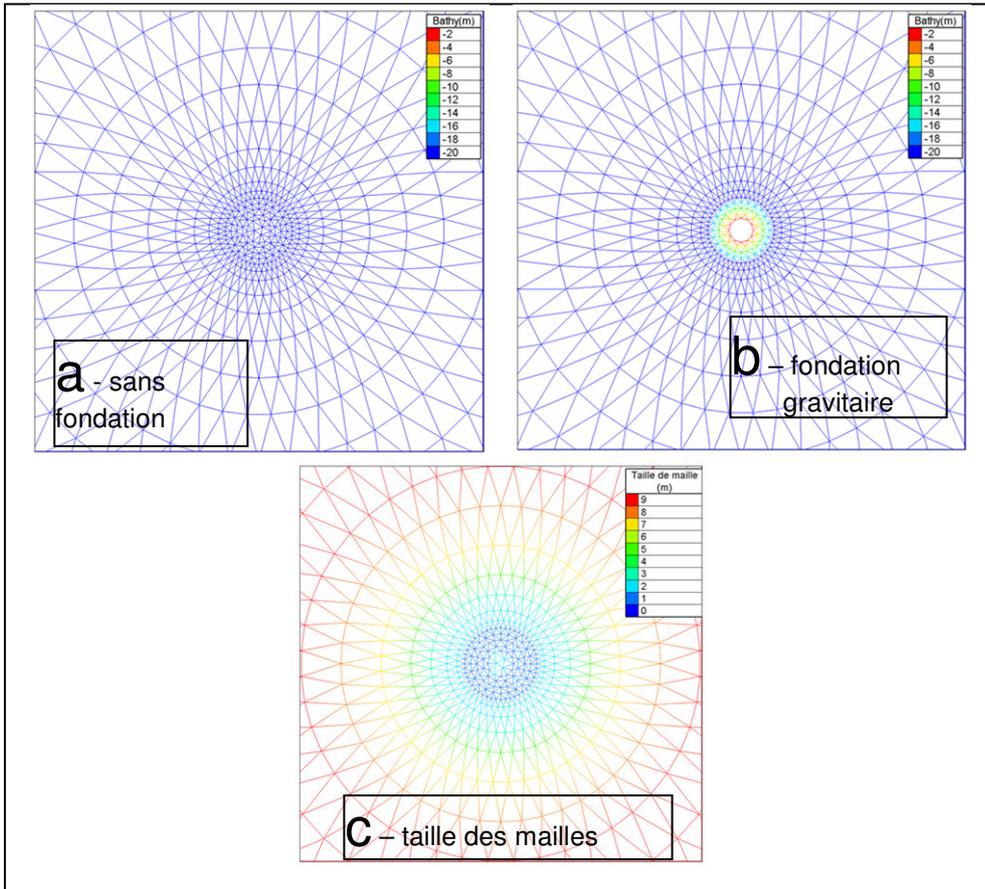


Figure 3-5 : Zoom sur les maillages à proximité des fondations. Exemple par 20 m de fond.

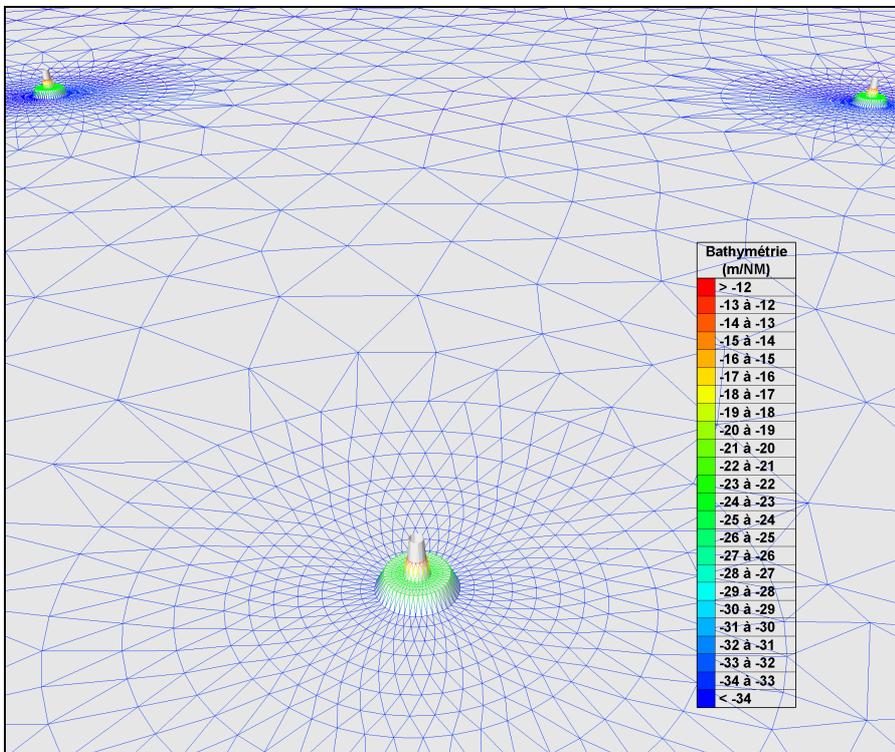


Figure 3-6 : Extrait du maillage à éléments finis à proximité de 3 des 83 fondations composant le parc éolien.

3.1.3 Conditions aux limites et paramétrage

3.1.3.1 Conditions aux limites

Pour chacune des deux configurations (en conditions naturelles et avec fondations gravitaires), deux simulations ont été réalisées pour deux conditions de marée type. La première correspond à une morte-eau moyenne (C 45) et la seconde à une vive-eau moyenne (C 95).

Les variations de la hauteur d'eau sont imposées comme conditions à la limite du modèle en chaque point de bord de la frontière maritime. Elles sont calculées par reconstitution des composantes harmoniques de la marée grâce à la base de constantes harmoniques du SHOM (CST France) pour les conditions moyennes de morte-eau (C 45) et de vive-eau (C 95). Les vitesses sont ainsi déduites à partir de ces hauteurs.

Pour les points constituant la frontière terrestre du modèle, une condition d'évolution libre de l'écoulement est spécifiée tout en gérant les bancs découvrants.

3.1.3.2 Paramétrage

La loi de frottement sur le fond imposée pour la modélisation est celle de Chézy. Le coefficient associé vaut $80 \text{ m}^{1/2}/\text{s}$ sur l'ensemble de la zone.

La formulation de Smagorinski est utilisée pour la turbulence horizontale.

Les simulations sont réalisées sans forçage atmosphérique.

Le pas de temps numérique est d'une demie seconde. Une simulation reproduit trois cycles de marée identiques de 12 heures et 30 minutes. Les résultats sont ensuite extraits sur le dernier cycle, de manière à s'affranchir des effets d'établissement du modèle.

3.2 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE EN CONDITIONS NATURELLES

Les champs de courants sont présentés en annexe A, à l'échelle du parc éolien, de la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**. Ces figures présentent les champs de courants horaires pour les deux coefficients de marée (C45 et C95). Dans ce document, l'abréviation PM signifie "Pleine Mer".

3.2.1 Validation par comparaison aux mesures SHOM

Le modèle hydrodynamique a été comparé aux données historiques du SHOM à des fins de validation. Les niveaux d'eau et les courants ont été analysés en différents points du domaine d'étude ; les résultats de ces comparaisons sont détaillés dans les paragraphes suivants.

3.2.1.1 Niveau d'eau

Les niveaux d'eau sont évalués en utilisant les composantes harmoniques de la marée établies en chaque port de référence (cf. Figure 3-7). Les niveaux correspondant aux marées de morte-eau moyenne (C45) et vive-eau moyenne (C95) ont été calculés par le programme de prédiction du SHOM.

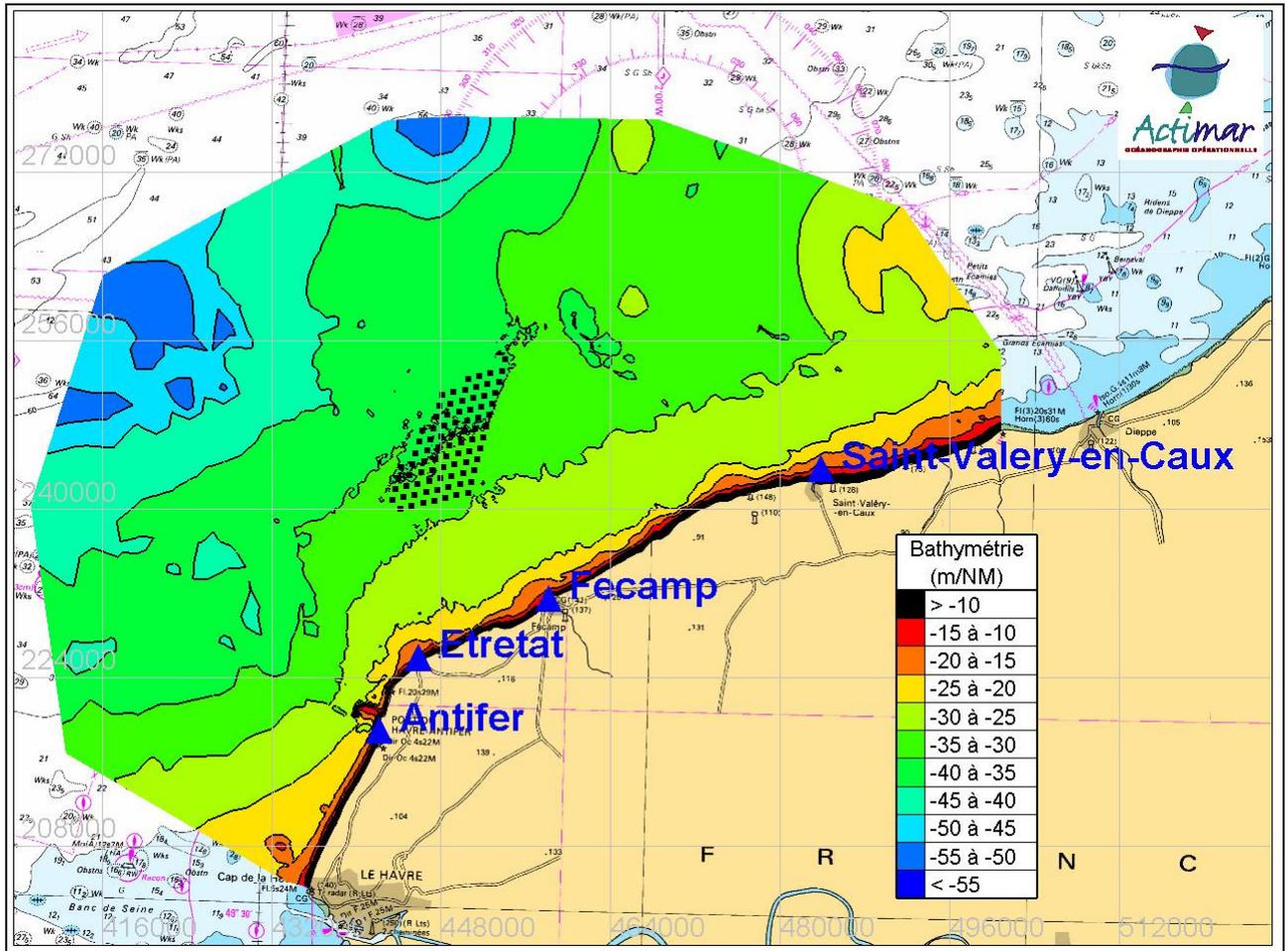


Figure 3-7 : Localisation des ports de référence du SHOM servant à la validation des niveaux d'eau du modèle.

Les écarts sur le niveau d'eau entre le modèle et les prédictions du SHOM sont inférieurs à 5% aux basses mers et pleines mers (Figure 3-8 pour un coefficient 95, **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour un coefficient 45), ce qui est considéré comme acceptable. La Figure 3-9 donne les valeurs des écarts entre les prédictions du SHOM et le modèle, pour le point le plus proche du site étudié : « Fécamp ». Les erreurs en ce point sont faibles.

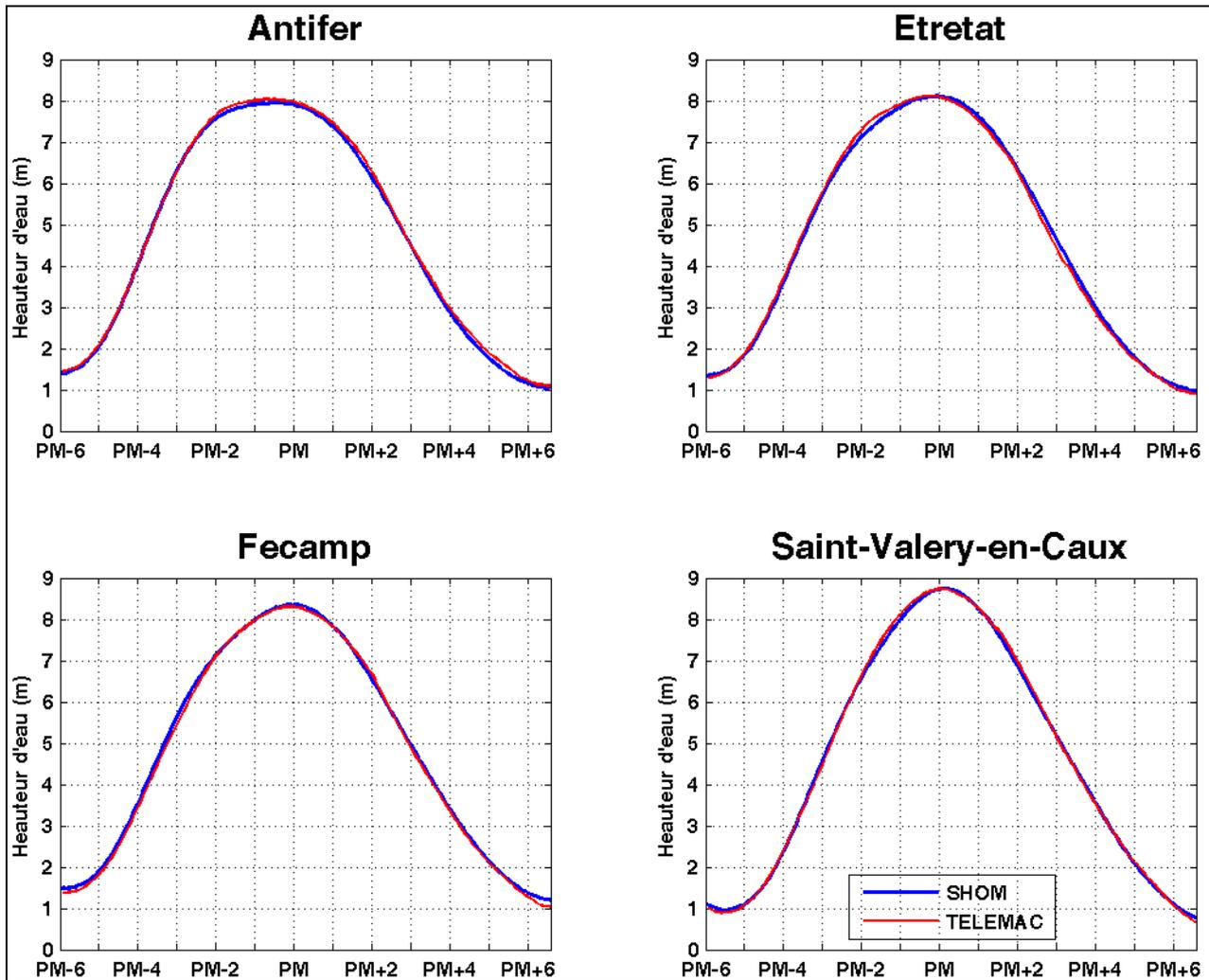


Figure 3-8 : Comparaison des niveaux d'eau entre le modèle hydrodynamique TELEMAC (en rouge) et les mesures du SHOM (en bleu), en condition de marée de vive-eau moyenne (C95).

Niveau d'eau	Ecart pour la pleine mer	Ecart pour la basse mer	Ecart sur le marnage	Moyenne quadratique des écarts	Déphasage pour la pleine mer
Vive-eau moyenne (95)	5,9 cm 1,7 %	16,3 cm 4,4 %	-10,4 cm -1,5 %	8,3 cm	6 min
Morte-eau moyenne (45)	5,1 cm 2,6 %	4,1 cm 1,8 %	1,1 cm 0,3 %	6,6 cm	-2 min

Figure 3-9 : Comparaison des niveaux d'eau entre le modèle hydrodynamique TELEMAC et les mesures du SHOM au point de comparaison « Fécamp ».

3.2.1.2 Courant

Les données de courant utilisées pour la validation du modèle sont issues des données du SHOM disponibles sur la zone d'étude. Elles proviennent des mesures historiques et de l'atlas numérique des courants de marée.

3 - Impact hydrodynamique

Pour un coefficient de marée donné, les courants de marée associés peuvent être calculés à partir des conditions de morte-eau moyenne (coefficient 45) et de vive-eau moyenne (coefficient 95) de la façon suivante :

- pour un coefficient de marée C, $VC = V45 + (C - 45) \times (V95 - V45) / 50$

Par exemple, pour une marée astronomique de coefficient 120 : $V120 = V45 + 1,5 \times (V95 - V45)$.

La Figure 3-10 présente la position des points de comparaison des courants de marée. Les comparaisons entre les courants simulés par Telemac et les courants du SHOM sont présentées sous forme de roses de courant sur la Figure 3-12 pour une marée de vive-eau moyenne (C95) et **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** pour une marée de morte-eau moyenne (C45). La Figure 3-11 présente également le calcul des erreurs pour les points 3 et 4 pour le maximum du flot et du jusant.

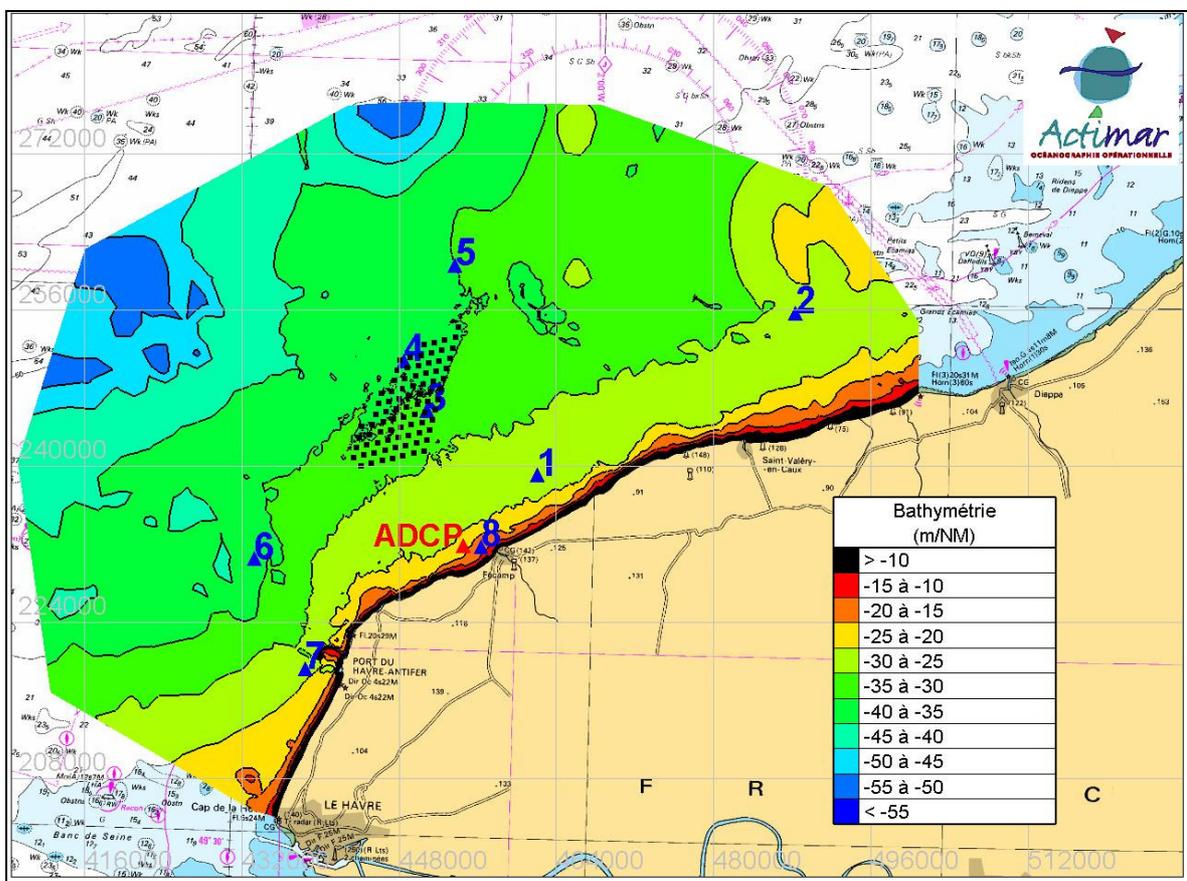


Figure 3-10 : Localisation des points de comparaison servant à la validation des courants de marée du modèle (8 points de données SHOM et 1 point de mesures ADCP¹). Les points noirs représentent le positionnement des fondations.

¹Acoustic Doppler Current Profiler: instrument qui permet d'enregistrer le profil des vitesses et directions du courant sur l'ensemble de la colonne d'eau

Les comparaisons montrent que les courants sont bien reproduits par le modèle. Les intensités et les directions des courants de flot et de jusant sont en très bon accord pour les huit points de comparaison. Pour la marée de vive-eau moyenne, le modèle sous-estime légèrement l'intensité des courants, de l'ordre de 5 à 10 %. Ces différences peuvent provenir d'une bathymétrie plus précise dans le modèle Actimar, et/ou d'une sur-estimation des courants dans l'atlas du SHOM pour assurer la sécurité de la navigation dans la zone.

Courants de marée		Ecart pour le flot	Ecart pour le jusant
Marée de vive-eau moyenne (C95)	Point 3	-6,2 cm/s -4,2 %	-10,3 cm/s -7,7 %
	Point 4	-6,5 cm/s -4,6 %	-9,2 cm/s -6,9 %
Marée de morte-eau moyenne (C45)	Point 3	0,6 cm/s 0,9 %	-2,9 cm/s -4,3 %
	Point 4	-0,9 cm/s -1,4 %	3,9 cm/s 5,8 %

Figure 3-11 : Comparaison des courants SHOM et ceux modélisés par Telemac aux points 3 et 4.

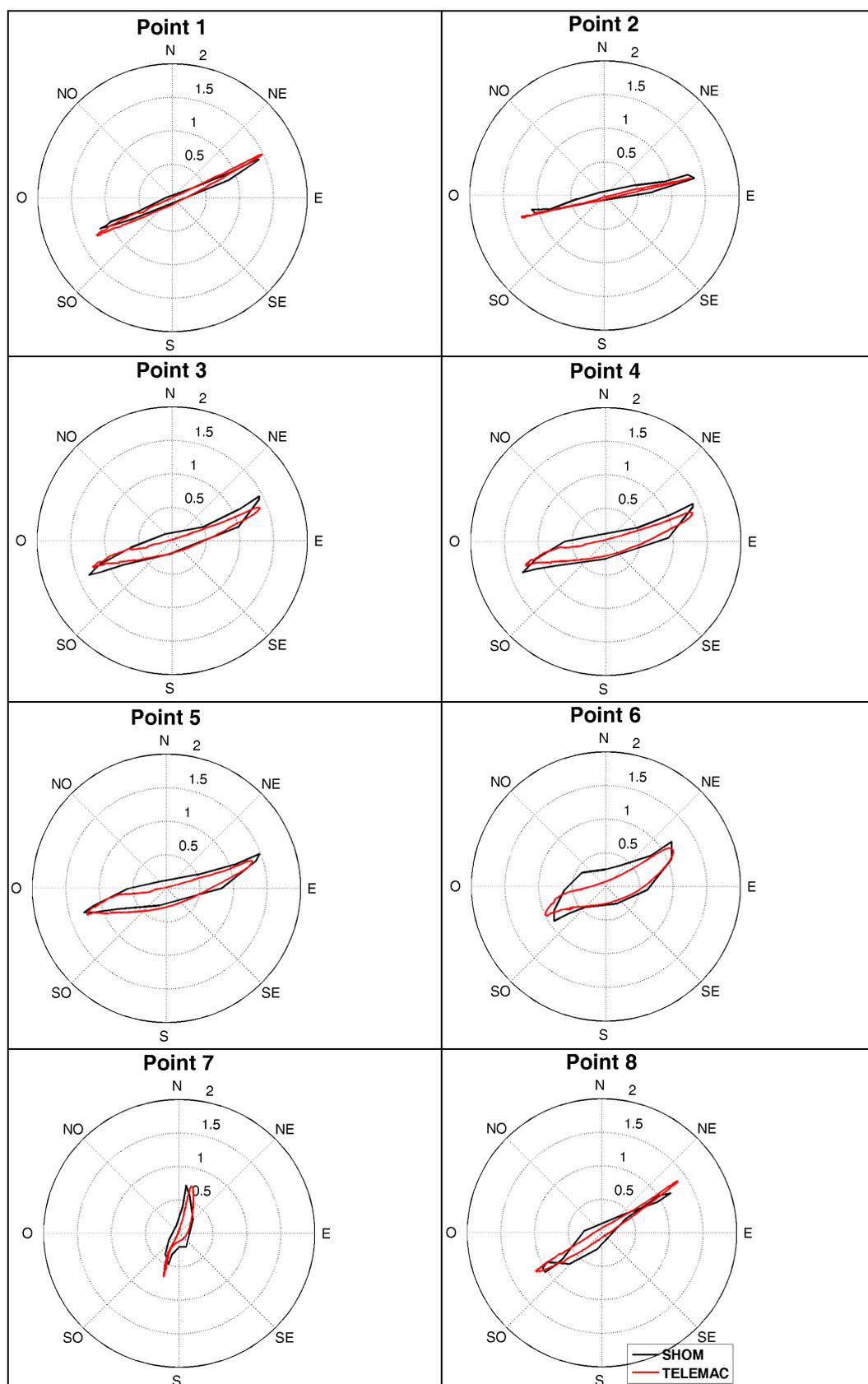


Figure 3-12 : Comparaison des courants de marée entre le modèle hydrodynamique TELEMAC (en rouge) et les courants du SHOM (en noir), pour une marée de vive-eau moyenne (C95).

3.2.2 Validation par comparaison aux mesures ADCP

3.2.2.1 Présentation des mesures ADCP

La CCI Bolbec dispose de données courantologiques acquises par ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) dans le cadre du projet de récifs artificiels mené en 2004 au large de Fécamp/Etretat. L'ADCP est un instrument qui permet d'enregistrer le profil des vitesses et directions du courant sur l'ensemble de la colonne d'eau. Les mesures acquises par la CCI Bolbec couvrent un cycle complet morte-eau/vive-eau, du 4 au 18 août 2004, toutes les 10 minutes, par environ 23 mètres de fond. Le courantomètre était situé au nord immédiat de Fécamp, sa position exacte est $49^{\circ}46'07''\text{N} - 0^{\circ}19'00''\text{E}$; elle est représentée sur la Figure 3-10. La discrétisation verticale comporte 24 cellules d'un mètre chacune.

La série temporelle du niveau d'eau, déduite du capteur de pression, est représentée sur la Figure 3-14 (courbe du bas). Sur la totalité de la période de mesure, on peut observer que le marnage varie entre 3 m et 7,5 m, pour une valeur moyenne d'environ 5,5 m. Sur cette même figure, les séries temporelles de l'intensité et de la direction du courant en fonction de la profondeur sont également représentées (graphiques du haut et du milieu). En période de vive-eau, le courant de flot atteint 1,5 m/s en sub-surface et porte à l'est-nord-est. Le courant de jusant est plus faible (environ 1 m/s en vive-eau) et porte dans la direction opposée, à l'ouest-sud-ouest. Ce comportement est clairement visible sur la Figure 3-13 qui représente la rose du courant barotrope pour la totalité de la période de mesure.

De manière à exploiter les informations sur la structure verticale du courant, la Figure 3-15 illustre chacun des profils verticaux instantanés (en bleu). Sur cette figure, sont également représentés la moyenne de ces profils instantanés (en rouge) et la valeur moyenne du courant barotrope (en vert). Les profils mesurés tendent à coïncider avec un profil théorique logarithmique, fortement atténué à proximité du fond. La vitesse moyenne barotrope est en accord avec le profil moyen, avec des valeurs plus faibles près du fond et plus fortes à proximité de la surface. Ce comportement est caractéristique d'un courant sous influence principale de la marée, dont la composante barotrope est largement dominante.

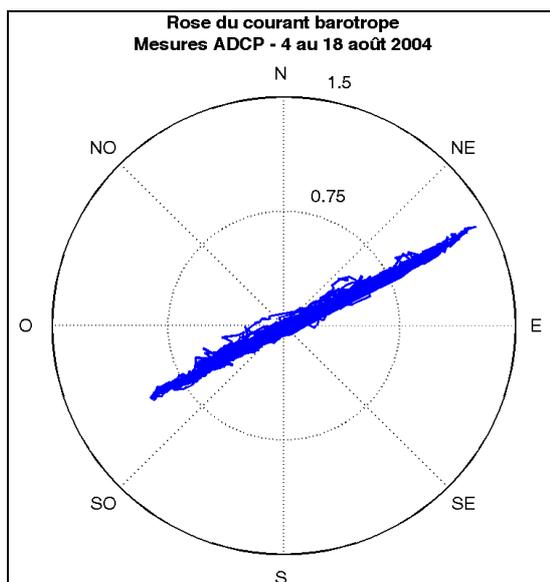


Figure 3-13 : Rose du courant barotrope mesuré sur la période de mesure.

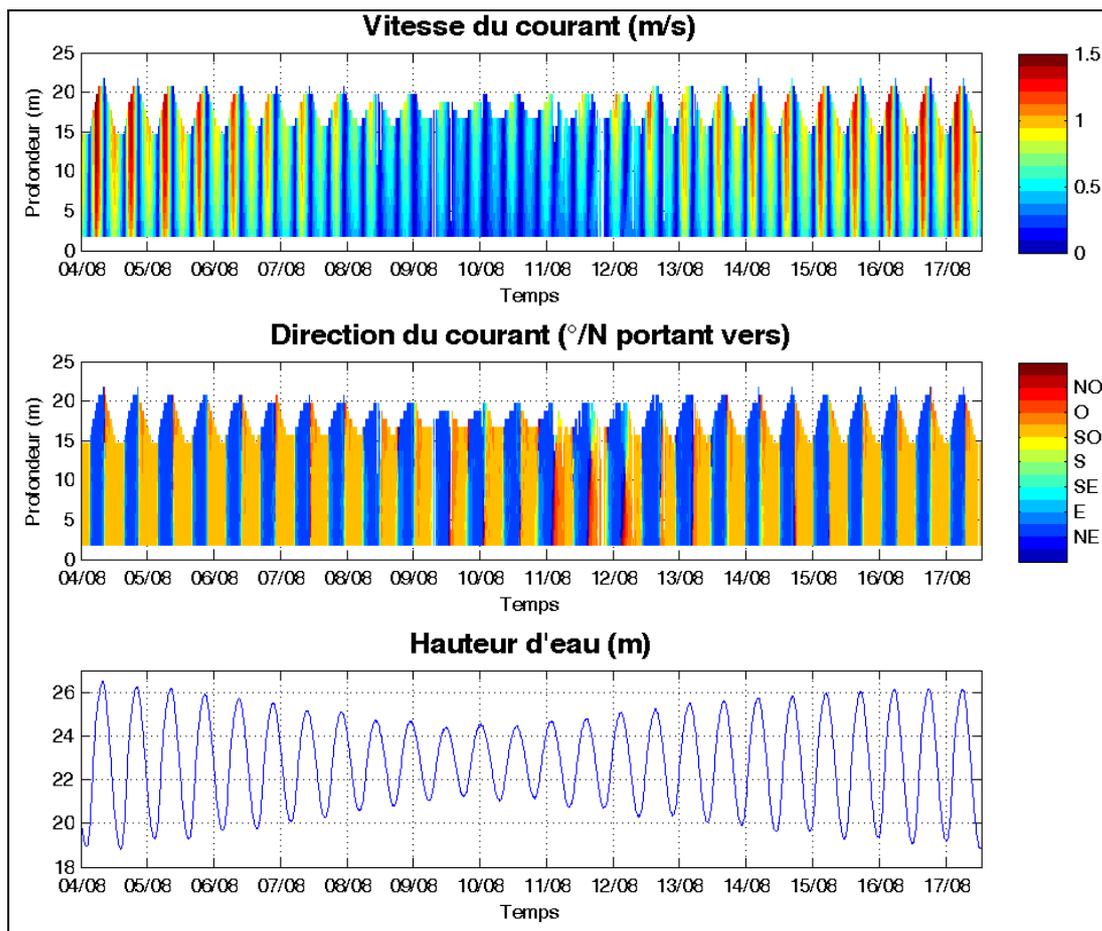


Figure 3-14 : Séries temporelles de l'intensité (en haut) et de la direction (au milieu) du courant instantané mesuré et niveau d'eau (en bas) pendant la période des mesures.

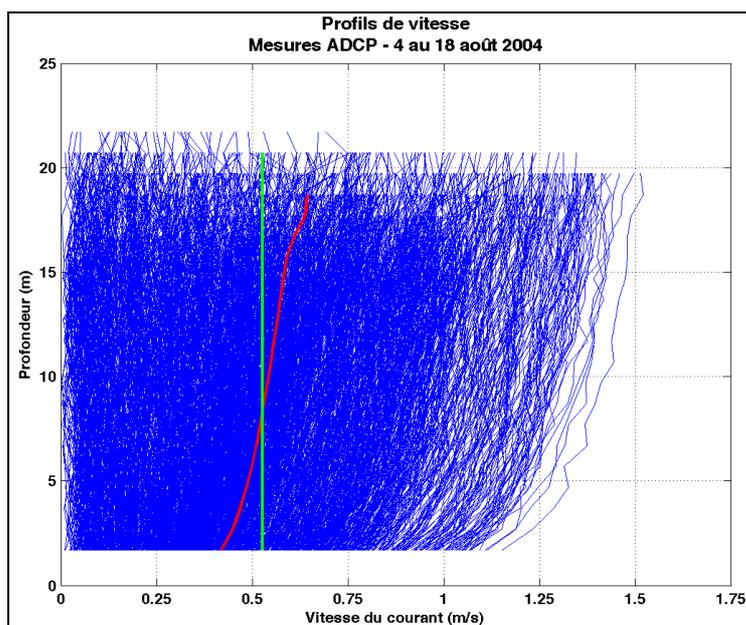


Figure 3-15 : Profils verticaux instantanés de l'intensité du courant mesuré pendant la période de mesure (en bleu) ; moyenne des profils instantanés (en rouge) ; et profil moyen du courant barotrope (en vert).

3.2.2.2 Comparaison avec le modèle 3D

Ce paragraphe présente le travail de validation réalisé sur les aspects tridimensionnels, et donc sur les profils verticaux de courant. Pour les deux conditions de marée schématisées simulées, les périodes de comparaison sont les suivantes :

- Morte-eau moyenne (C45) : le 8 août 2004, de 11h à minuit ;
- Vive-eau moyenne (C95) : dans la nuit du 4 au 5 août 2004, de 21h à 10h.

La Figure 3-17 présente les séries temporelles de l'intensité du courant en fonction de la profondeur pendant une marée de vive-eau moyenne (dans la nuit du 4 au 5 août 2004) pour les mesures ADCP (figure du haut) et pour les résultats Telemac-3D (figure du bas). La Figure 3-18 est une représentation équivalente pour la direction du courant. Bien que le capteur ADCP ne permet pas de mesurer les caractéristiques du courant à proximité de la surface et du fond à cause des zones d'ombre, ces deux illustrations montrent le très bon accord entre les courants mesurés et modélisés, à la fois en intensité et en direction. Au moment du maximum de flot, à environ 20 m du fond, les courants mesurés dépassent 1,4 m/s ; le modèle permet de s'affranchir des problèmes de zone d'ombre et simule des courants supérieurs à 1,5 m/s en surface. Le courant maximum de jusant est légèrement surestimé par le modèle. Les périodes d'étalement de basse et de pleine mer sont correctement représentées. Les directions du courant sont également très bien représentées par le modèle, avec un courant portant à l'est-nord-est durant le flot, puis à l'ouest-sud-ouest au cours du jusant. On peut également remarquer que la direction est homogène sur la verticale, il n'y a pas de cisaillement de courant significatif, ce qui confirme la prédominance du comportement barotrope de l'écoulement.

Les profils verticaux de l'intensité du courant mesurés par l'ADCP et reproduits par le modèle sont comparés sur la Figure 3-19 pour une marée vive-eau moyenne. La moyenne et le maximum des profils instantanés (respectivement en vert et rouge) ainsi que la moyenne du courant barotrope (en noir) sont également représentés. En dehors des zones d'ombre de fond et de surface, c'est-à-dire entre 2 et 20 m de profondeur, les résultats modélisés par Telemac-3D sont en bon accord avec les profils in-situ, avec une vitesse maximale de 1,5 m/s à 20 m du fond. Les résultats de la modélisation numérique permettent de simuler des informations complémentaires à proximité du fond et de la surface, aux endroits où l'instrument de mesure ne fournit pas de données. Le profil de vitesse logarithmique est fortement atténué à proximité du fond et à proximité de la surface, des valeurs légèrement plus fortes sont simulées (1,6 m/s). Le modèle reproduit également correctement le profil moyen (en vert) ainsi que la valeur moyenne barotrope (en noir), légèrement plus forte que la valeur mesurée.

Sur la Figure 3-16, sont superposées les roses de courant barotropes mesurés (en rouge) et modélisés (en bleu) pour les deux conditions de marée simulées. On retrouve les caractéristiques des courants décrites précédemment en intensité et en direction. Pour la marée moyenne de vive-eau, l'accord entre les mesures et le modèle est très bon tandis que pour une marée moyenne de morte-eau, le modèle sous-estime d'environ 20% le courant barotrope mesuré. Cet écart peut s'expliquer par des conditions météorologiques particulières, tel qu'un vent de nord-est ou bien des effets locaux de brise thermique associés à une stratification pouvant se produire au mois d'août ; ces conditions ne sont pas prises en compte par le modèle et pourraient avoir comme effet de réduire l'intensité du courant de flot, tel que le montrent les mesures.

3 - Impact hydrodynamique

Il est important de signaler que les courants modélisés résultent uniquement de la propagation de l'onde de marée, contrairement aux mesures ADCP qui incluent l'influence d'autres processus tels que les effets météorologiques, susceptibles d'avoir une influence significative sur les courants de surface, aussi bien en intensité qu'en direction.

Cette analyse montre que les caractéristiques de l'écoulement mesurées par l'instrument entre le 4 et le 18 août 2004 au nord immédiat de Fécamp, sont reproduites de façon très satisfaisante par le modèle numérique tridimensionnel. L'influence de la marée est largement dominante : le flot est plus intense que le jusant et la direction du courant est alternative, parallèle à la côte. Les profils verticaux de vitesse ont une forme logarithmique et les directions sont homogènes sur la verticale. Les comparaisons présentées dans ce paragraphe démontrent que le modèle reproduit correctement les différentes propriétés des courants.

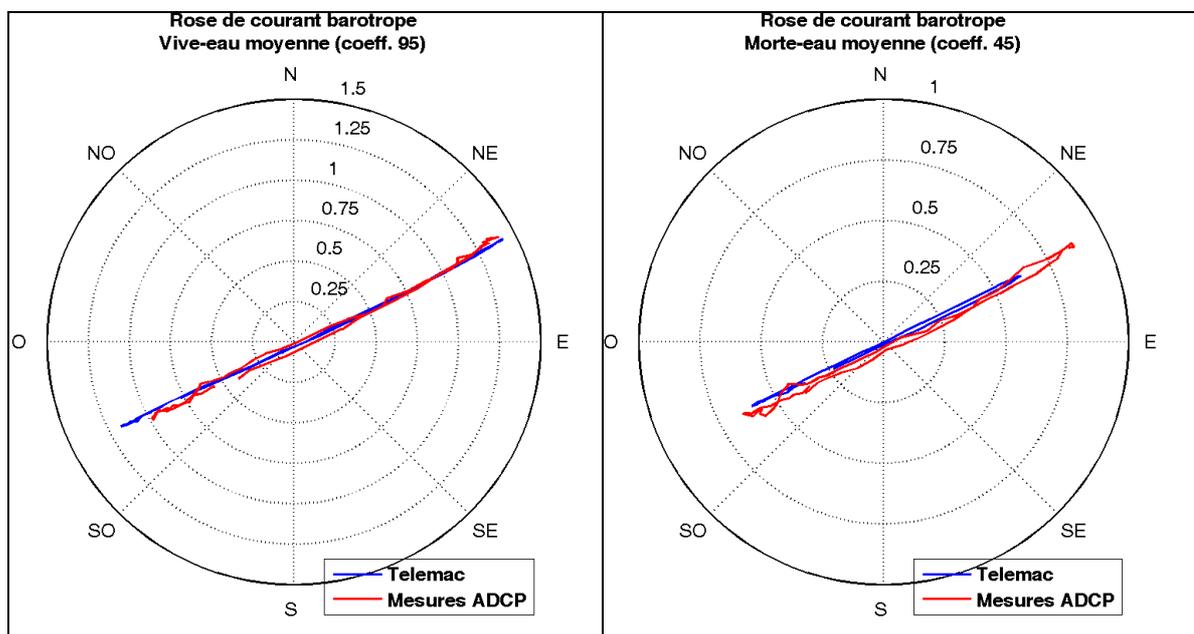


Figure 3-16 : Comparaison entre les roses de courant barotrope mesuré (en rouge) et modélisé (en bleu) pour une marée de vive-eau moyenne (à gauche, dans la nuit du 4 au 5 août 2004) et pour une marée de morte-eau moyenne (à droite, le 8 août 2004).

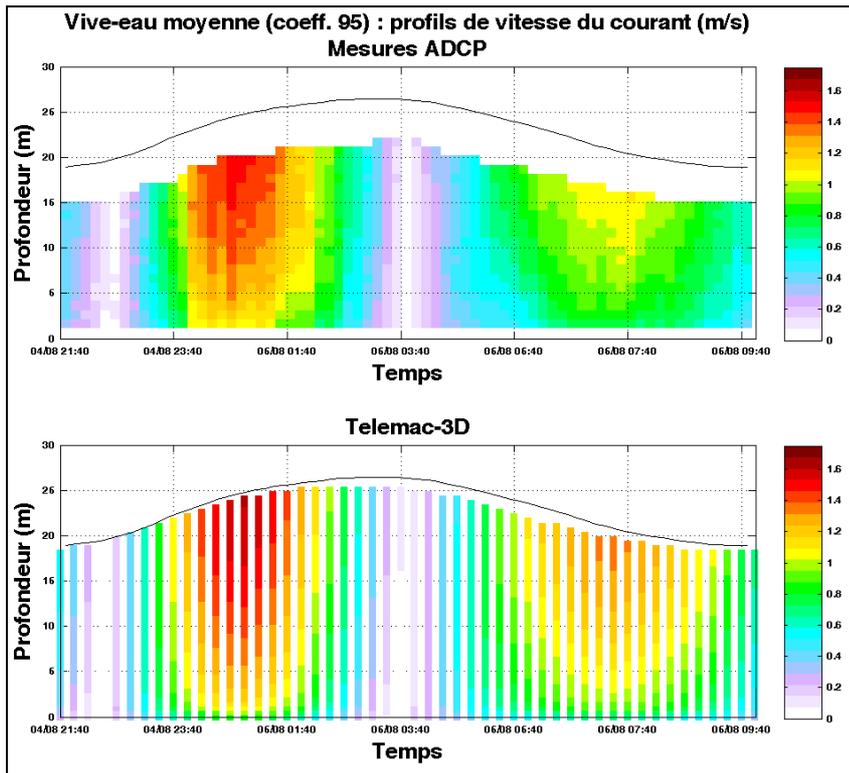


Figure 3-17 : Séries temporelles de l'intensité du courant en fonction de la profondeur pendant une marée de vive-eau moyenne (dans la nuit du 4 au 5 août 2004). Les mesures ADCP sont représentées sur la figure du haut et les résultats Telemac-3D sur celle du bas. Le niveau d'eau est également superposé (courbe noire).

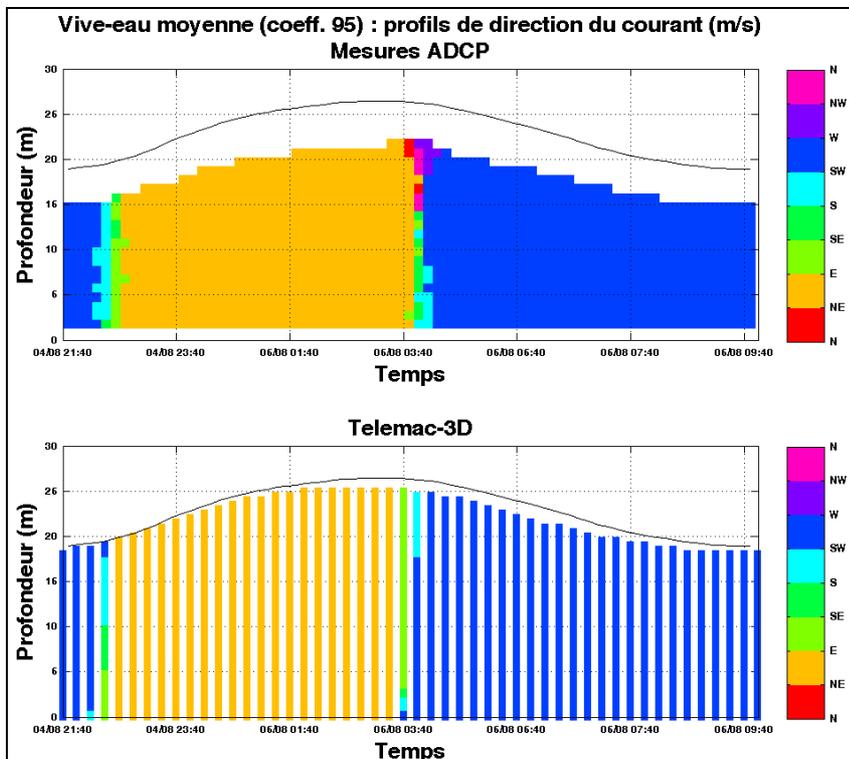


Figure 3-18 : Séries temporelles de la direction du courant en fonction de la profondeur pendant une marée de vive-eau moyenne (dans la nuit du 4 au 5 août 2004). Les mesures ADCP sont représentées sur la figure du haut et les résultats Telemac-3D sur celle du bas. Le niveau d'eau est également superposé (courbe noire).

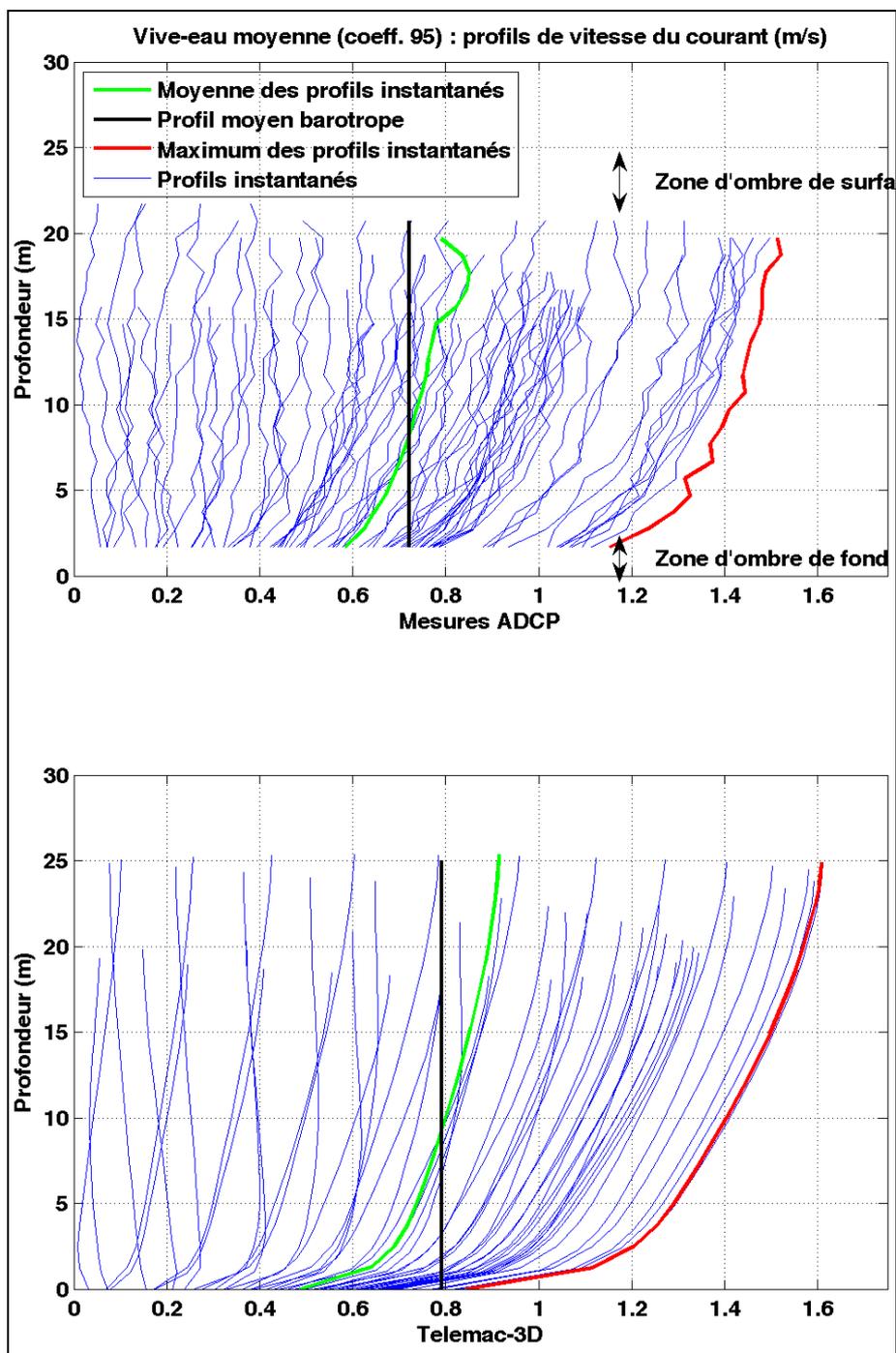


Figure 3-19 : Profils verticaux de l'intensité du courant pendant une marée de vive-eau moyenne (dans la nuit du 4 au 5 août 2004). En bleu : profils instantanés ; en vert : moyenne des profils instantanés ; en rouge : profil maximum ; en noir : moyenne du courant barotrope. Les mesures ADCP sont représentées sur la figure du haut et les résultats Telemac-3D sur celle du bas.

3.2.3 Courant maximum

La Figure 3-20 présente les champs de courant maximum rencontrés au cours des marées moyennes de morte-eau (C45) et de vive-eau (C95). Pour une marée moyenne de morte-eau (Figure 3-20, à gauche), la valeur maximale du courant simulée évolue entre 0,66 et 0,72 m/s, respectivement du sud-ouest au nord-est du parc éolien. Pour une marée moyenne de vive-eau (Figure 3-20, à droite), la valeur maximale du courant est comprise entre 1,3 et 1,4 m/s, respectivement du nord-ouest au sud-est du parc.

La Figure 3-21 présente les courants de marée au maximum du flot et du jusant pour les deux conditions de marée modélisées. Les maxima de vitesse instantanée sont rencontrés à :

- ➡ PM – 1h50 (flot) et PM + 4h40 (jusant) pour une vive-eau moyenne (C 95) ;
- ➡ PM – 2h20 et PM + 3h55 pour une morte-eau moyenne (C 45).

L'absence d'accidents bathymétriques dans la zone du parc éolien confère à l'hydrodynamique de la zone d'implantation un aspect régulier et relativement homogène spatialement à chaque instant de la marée. Plus au sud, en dehors de la zone d'intérêt, les abords d'Etretat et de Fécamp provoquent une intensification des courants du fait de la variation brutale du relief marin.

Les courants sont alternatifs, globalement orientés parallèlement au trait de côte, c'est-à-dire vers l'est-nord-est pendant le flot (70°N en vive eau moyenne et 75°N en morte eau moyenne) et vers l'ouest-sud-ouest pendant le jusant (250°N en vive eau moyenne et 255°N en morte eau moyenne).

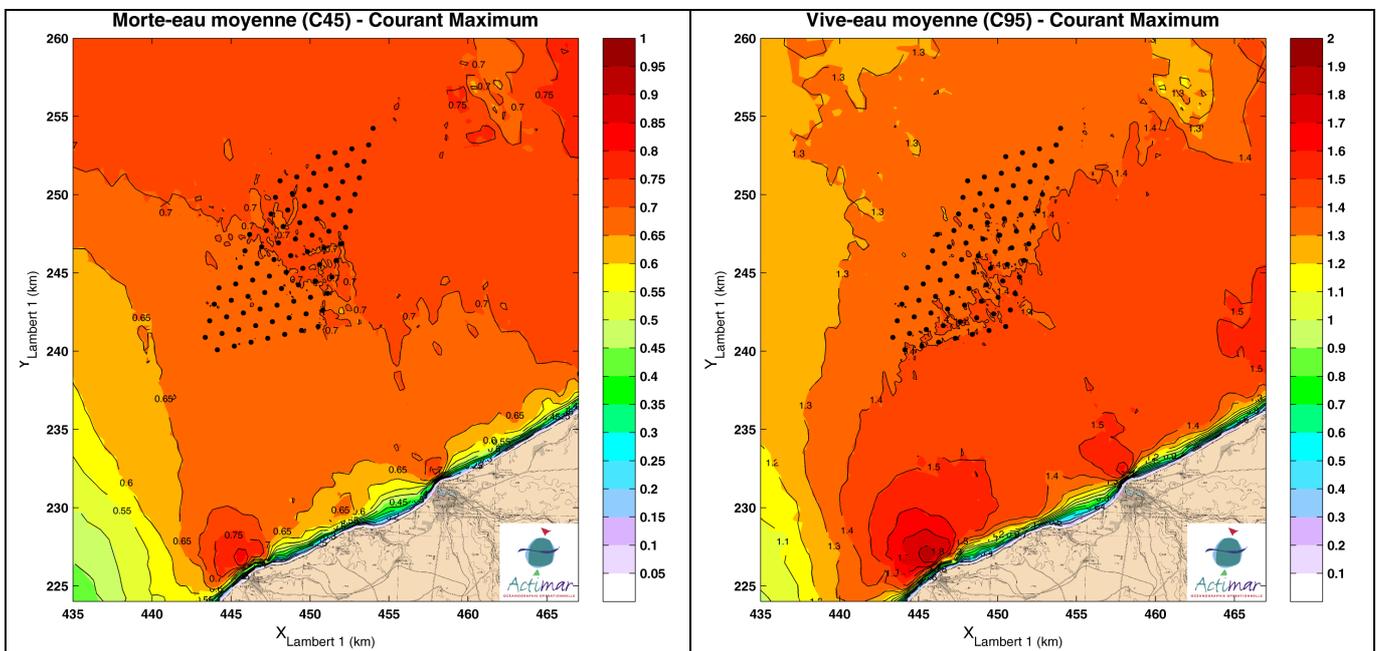


Figure 3-20 : Intensité maximale du courant de marée dans le parc éolien en morte-eau moyenne C45 (à gauche) et en vive-eau moyenne C95 (à droite), d'après les simulations Telemac.

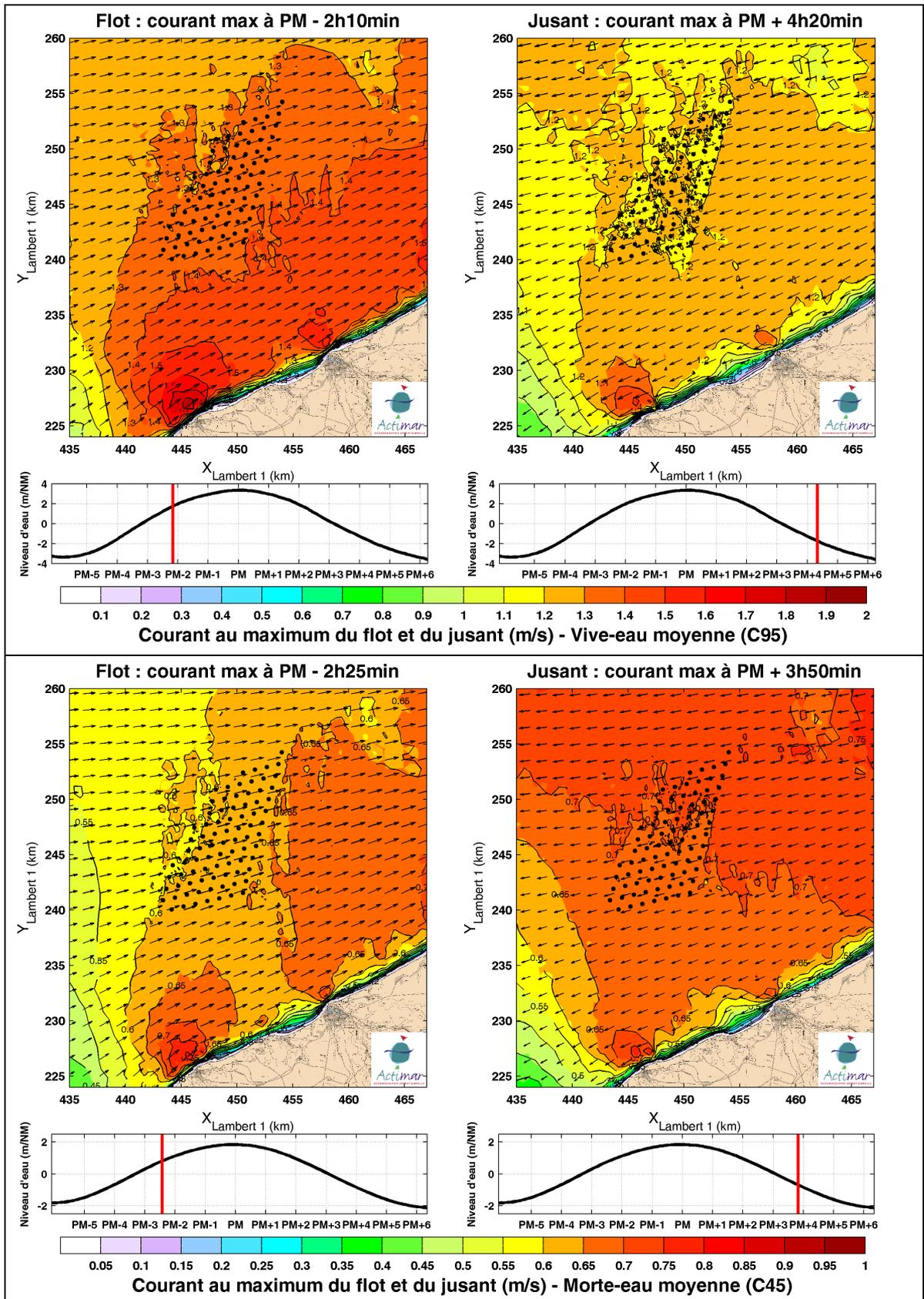


Figure 3-21 : Intensité du courant de marée dans le parc éolien au maximum du flot et du jusant, en vive-eau moyenne C95 (en haut) et morte-eau moyenne C45 (en bas), d'après les simulations Telemac.

3.3 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE AVEC LES FONDATIONS GRAVITAIRES

Dans cette section, l'incidence des fondations gravitaires sur l'hydrodynamique est étudié sur deux échelles spatiales :

- A l'échelle régionale, pour examiner l'étendue de la zone perturbée par le parc éolien.
- A l'échelle du parc éolien, pour évaluer les perturbations de l'écoulement autour des fondations et évaluer la zone de sillage.

Pour évaluer l'incidence des fondations sur l'hydrodynamique, on confronte les modélisations avec fondations à la modélisation en « conditions naturelles ». Pour cela, on établit des surfaces colorées des écarts de vitesse. Les maillages correspondant aux différentes configurations du projet étant identiques en tout point extérieur aux fondations, on s'est affranchi d'éventuel biais ou effet de lissage pouvant résulter des interpolations entre les grilles de calcul. Les écarts sont évalués en soustrayant les quantités sans fondation, aux quantités avec fondations. Cela signifie qu'un écart négatif de courant correspond à un ralentissement de l'écoulement en présence des fondations. Réciproquement, un écart positif de courant équivaut à une accélération de l'écoulement en présence des fondations.

3.3.1 Incidence à l'échelle régionale

Les figures de l'annexe 3 présentent l'incidence du parc éolien sur l'hydrodynamique régionale pour les deux conditions de marée simulées. Les surfaces colorées représentent les différences horaires instantanées de l'intensité du courant moyen (sur la tranche d'eau). Les écarts sur les vitesses sont plus forts pour une marée de vive-eau moyenne, au moment du maximum de flot et de jusant, lorsque la vitesse du courant est élevée.

Pour mettre en avant les endroits où le courant est le plus fortement modifié, les zones où les écarts de courant sont inférieurs à 6 cm/s sont laissées blanches sur les surfaces colorées. Ce seuil à 6 cm/s représente moins de 5 % du courant maximum de jusant à C95 (1,2 m/s) et 4,3 % du courant maximum de flot (1,4 m/s) à C95.

3.3.1.1 Courant barotrope

La présence des fondations affecte les courants barotropes principalement dans la zone d'implantation. On note toutefois des écarts faibles (inférieurs à 10 cm/s) en périphérie de la zone projet, principalement au sud-ouest et au nord-est, et aux heures de renverse de la marée.

L'hydrodynamique est homogène dans la zone du parc éolien. L'incidence des fondations gravitaires sur l'hydrodynamisme est relativement similaire pour chacune des fondations.

3 - Impact hydrodynamique

La Figure 3-22 montre les différences maximales de l'intensité du courant sur la totalité du cycle de marée et précise ainsi l'emprise de la zone impactée par les fondations gravitaires. Pour une marée de vive-eau moyenne (Figure 3-22, à droite), elle est d'environ 20 km dans la direction NE-SO et 13 km dans la direction N-S ; environ 2.5 km au-delà des limites du parc éolien. Des écarts supérieurs à ceux présentés sur la Figure 3-22 sont susceptibles d'être rencontrés :

- à proximité immédiate de chaque fondation ; comme il sera expliqué plus loin dans la partie 3.3.2 ;
- pour des coefficients de marée plus importants qu'une marée de vive-eau moyenne ;
- pour des conditions météorologiques intenses ou dans certaines conditions atmosphériques pouvant induire une intensification des courants essentiellement au voisinage de la surface.

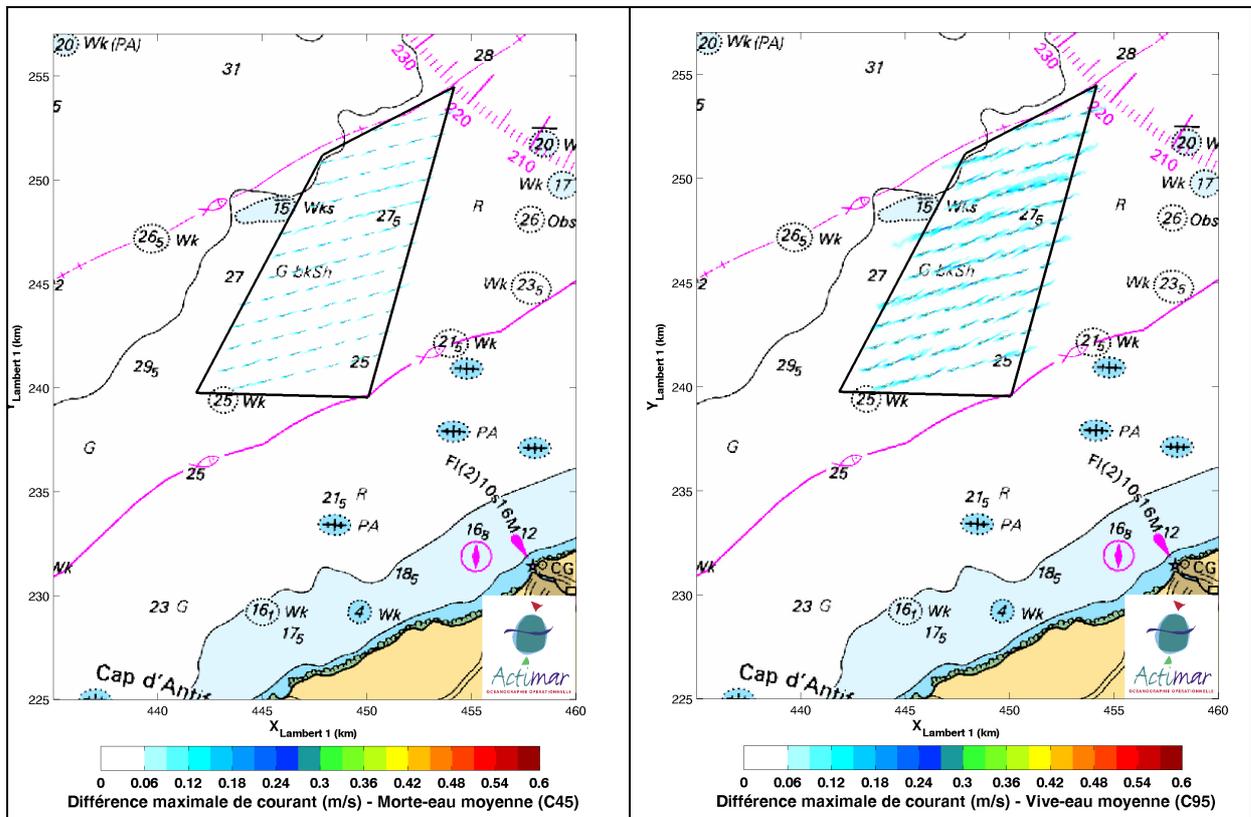


Figure 3-22 : Différences maximales d'intensité du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne (à gauche) et de vive-eau moyenne (à droite). Courant barotrope maximum sur l'état naturel : 1,4 m/s à C95 et 0,7 m/s à C45.

La Figure 3-23 présente les différences absolues (en haut) et relatives (en bas) d'intensité du courant barotrope au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95). L'équivalent de cette figure pour une marée de morte-eau moyenne (C45) est présenté en annexe (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Au maximum du flot et du jusant, les écarts sur l'intensité du courant n'excèdent pas 5 % en dehors de la zone d'implantation (si cette zone est définie à 2 km des fondations extérieures). A proximité des fondations, ces différences sont plus importantes (cf. paragraphe 3.3.2).

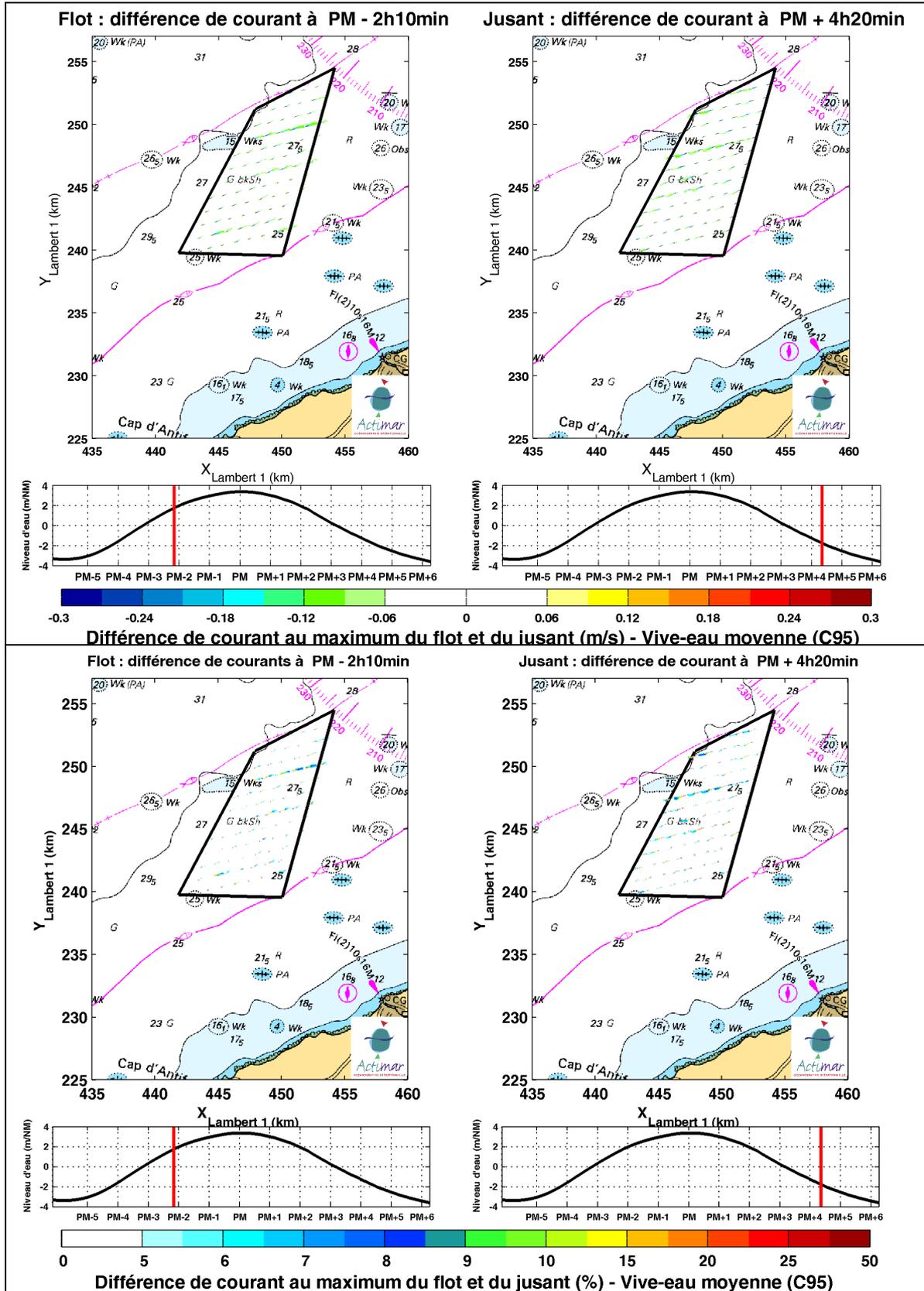


Figure 3-23 : Différences absolues (en m/s, en haut) et relatives (en %, en bas) d'intensité du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95).

3.3.1.2 Courant de surface

De la même façon que pour le courant barotrope, les figures de l'annexe 3 présentent également l'incidence du parc éolien sur les courants en surface pour les deux conditions de marée simulées.

La présence des fondations affecte les courants principalement dans la zone d'implantation. A cette échelle, les écarts maxima, présentés sur la Figure 3-24, restent inférieurs à 10 cm/s en périphérie de la zone projet, toujours au sud-ouest et au nord-est. L'emprise de la zone impactée en surface par les fondations gravitaires est légèrement plus importante que pour le courant barotrope, du fait de la forme du profil vertical de courant qui implique des courants plus forts en surface et plus faibles au fond. Pour une marée de vive-eau moyenne (Figure 3-24, à droite), elle est d'environ 23 km dans la direction NE-SO et 13 km dans la direction N-S ; environ 4 km au-delà des limites du parc éolien. Des écarts supérieurs à ceux présentés sur la Figure 3-24 sont rencontrés à proximité immédiate de chaque fondation ; comme il l'est expliqué au paragraphe 3.3.2 ; pour des coefficients de marée plus importants qu'une marée de vive-eau moyenne ; ainsi que pour des conditions météorologiques intenses ou dans certaines conditions atmosphériques pouvant induire une intensification des courants essentiellement au voisinage de la surface.

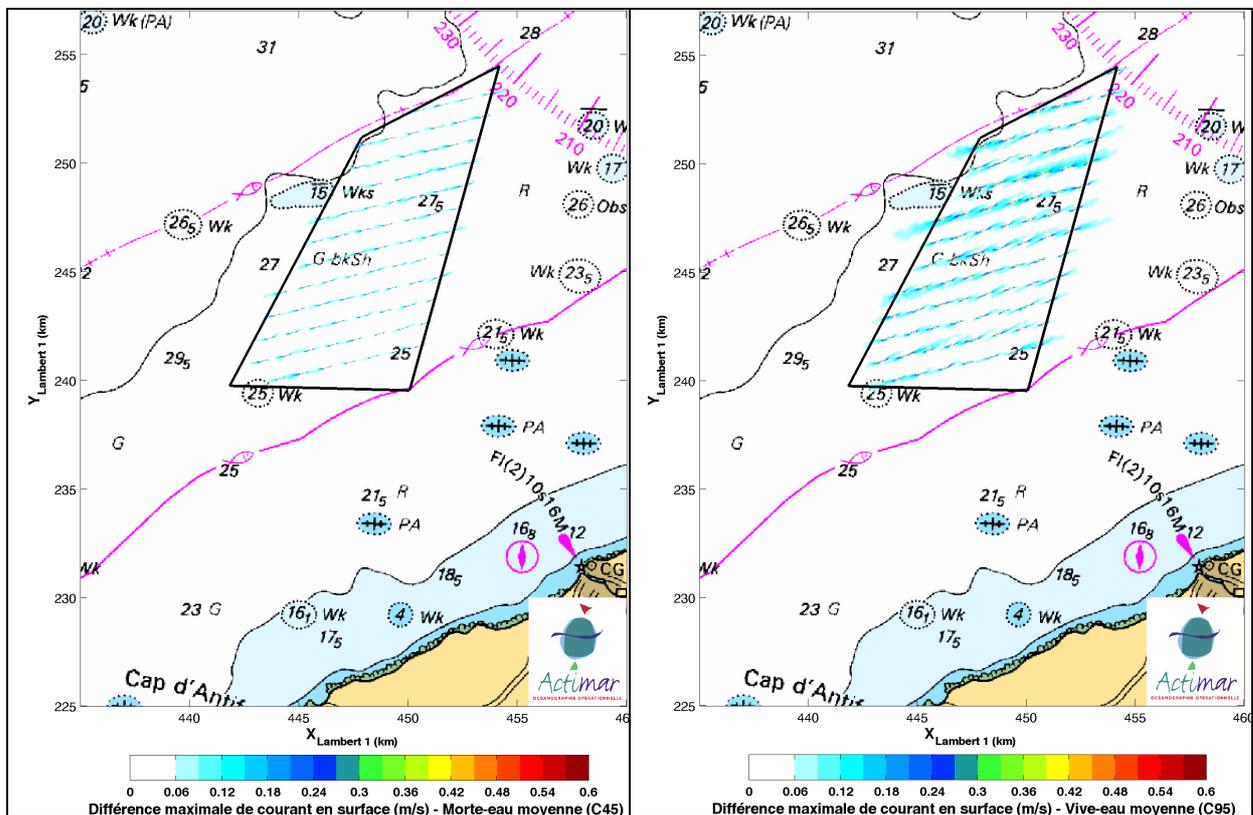


Figure 3-24 : Différences maximales d'intensité du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne (gauche) et de vive-eau moyenne (droite). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 1,6 m/s à C95 et 0,9 m/s à C45.

La Figure 3-25 présente les différences absolues d'intensité du courant de surface au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95). L'équivalent de cette figure pour une marée de morte-eau moyenne (C45) est présenté en annexe (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Au maximum du flot et du jusant, les écarts sur l'intensité du courant n'excèdent pas 5% en dehors de la zone d'implantation (si cette zone est définie à 2,5 km des fondations extérieures). A proximité des fondations, ces différences sont plus importantes (cf. paragraphe 3.3.2).

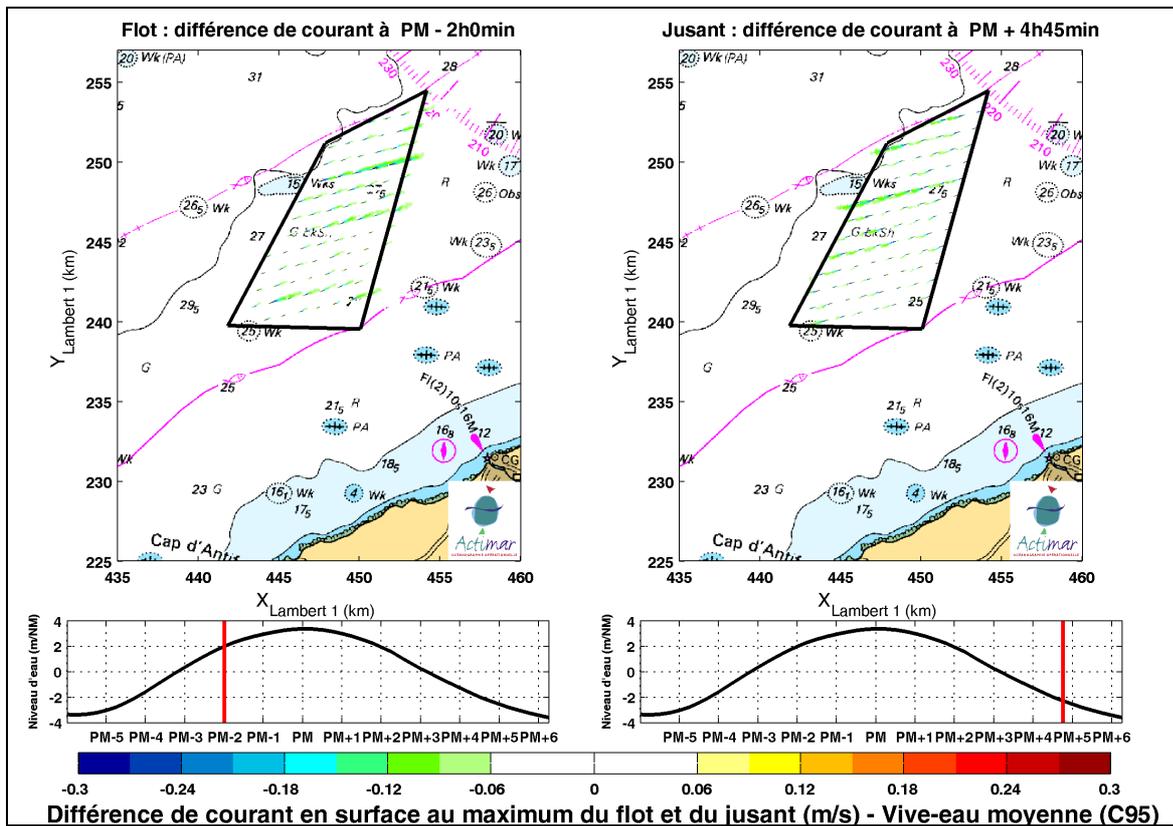


Figure 3-25 : Différences absolues (en m/s) d'intensité du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 1,6 m/s à C95 et 0,9 m/s à C45.

3.3.1.3 Courant de fond

L'incidence du parc éolien sur le courant de fond pour les deux conditions de marée simulées est présenté sur les figures de l'annexe 3.

La Figure 3-26 présente les écarts maxima absolus affectant les courants de fond à l'échelle du parc éolien et pour les deux conditions schématisiques de marée simulées. Ces écarts sont plus faibles que ceux présentés précédemment pour les composantes barotrope et de surface du courant. Ils restent inférieurs à 5 cm/s en périphérie de la zone projet. L'emprise de la zone impactée au fond par les fondations gravitaires est plus restreinte, car la forme logarithmique du profil de vitesse atténue fortement les courants à proximité du fond. Pour une marée de vive-eau moyenne (Figure 3-26, à droite), elle est d'environ 17 km dans la direction NE-SO et 13 km dans la direction N-S ; environ 1 km au-delà des limites du parc éolien. Des écarts supérieurs à ceux présentés sur la Figure 3-26 sont rencontrés à proximité immédiate de chaque fondation ; comme il l'est expliqué au paragraphe 3.3.2 ; pour des coefficients de marée plus importants qu'une marée de vive-eau moyenne ; ainsi que pour des conditions météorologiques intenses ou dans certaines conditions atmosphériques pouvant induire une intensification des courants essentiellement au voisinage de la surface.

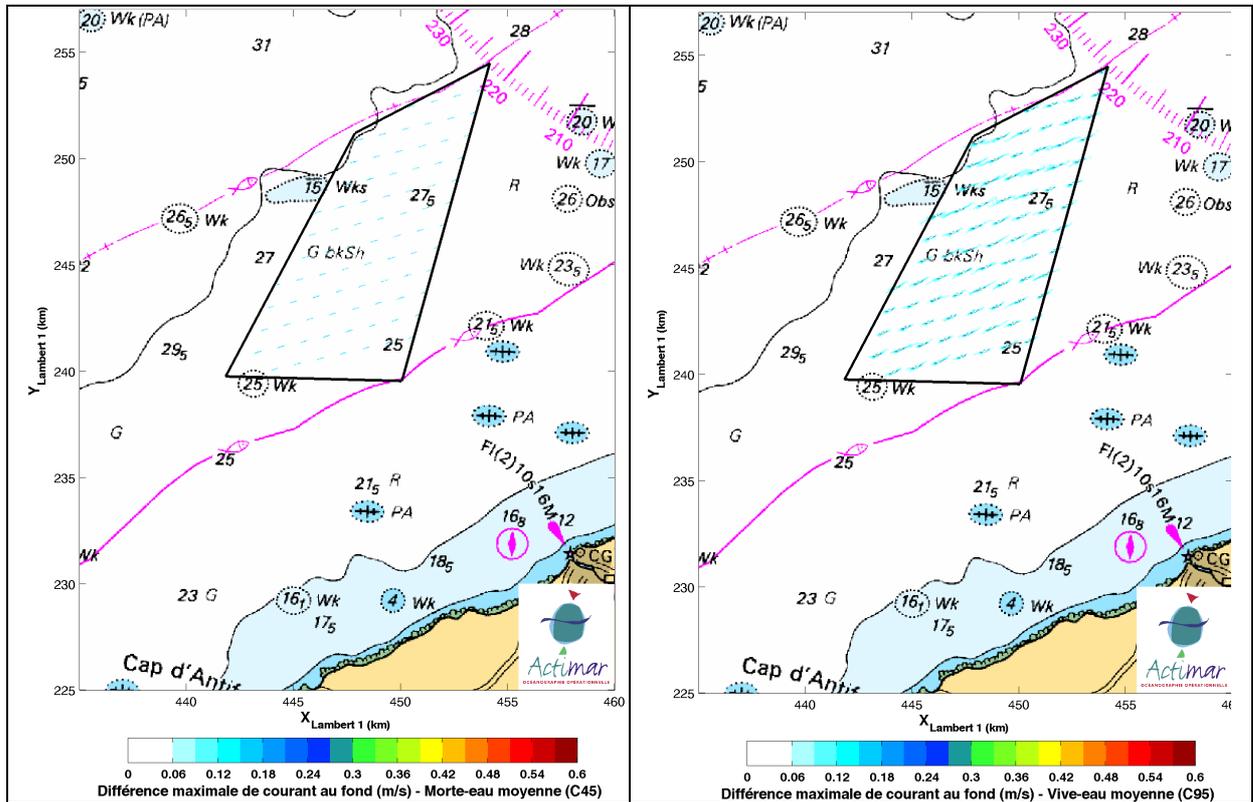


Figure 3-26 : Différences maximales d'intensité du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne (à gauche) et de vive-eau moyenne (à droite). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C95 et 0,3 m/s à C45.

La Figure 3-27 présente les différences absolues d'intensité du courant au fond au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95). L'équivalent de cette figure pour une marée de morte-eau moyenne (C45) est présenté en annexe (cf. **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Au maximum du flot et du jusant, les écarts sur l'intensité du courant n'excèdent pas 5% en dehors de la zone d'implantation (si cette zone est définie à 1 km des fondations extérieures). A proximité des fondations, ces différences sont plus importantes (cf. paragraphe 3.3.2).

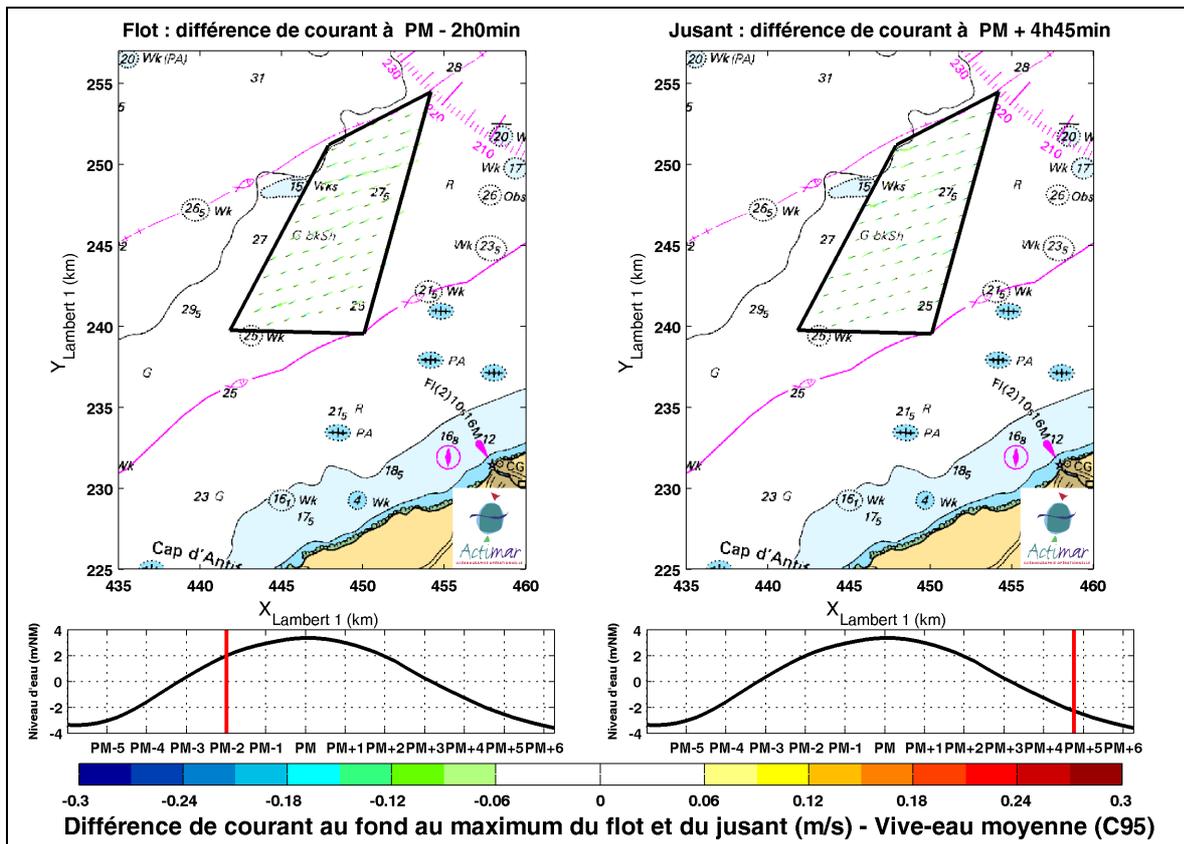


Figure 3-27: Différences absolues (en m/s) d'intensité du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne (C95). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C95 et 0,3 m/s à C45.

3.3.2 Incidence à l'échelle locale

Les résultats des modélisations numériques montrent la présence d'effets de sillages au voisinage des fondations. L'impact local est plus fort au moment du maximum de flot et de jusant, lorsque la vitesse du courant est élevée.

Pour des fondations situées à l'extrême sud-ouest et à l'extrême nord-est du parc, les écarts de vitesse du courant induits par la présence des fondations gravitaires sont représentés :

- au maximum du flot et du jusant, pour des marées de vive-eau moyenne et de morte-eau moyenne ;
- sur la totalité des deux conditions schématiques de marée simulées, les écarts maxima atteints sont présentés.

3.3.2.1 Courant barotrope

De manière générale, la Figure 3-30 montre que le courant ralentit en amont et principalement en aval de la fondation. Sur les côtés, les vitesses accélèrent. A l'arrière de la fondation, l'écoulement se décolle et des tourbillons cylindriques se forment et finissent par occuper toute la face aval du cylindre. En aval du cylindre se crée une zone de sillage. Le sillage est évanescent avec l'éloignement de la fondation. Pour les fondations gravitaires considérées (cf. paragraphe 3.1.2.2), l'écart de vitesse au maximum de flot et de jusant est inférieur à 10 % au-delà de 500 m de la fondation ; il est inférieur à 5 % au-delà de 2000 m.

Sur l'ensemble du parc, les différences obtenues à proximité des fondations ne sont pas tout à fait homogènes, en fonction de la position de la fondation dans le parc. Cela est induit par un léger déphasage de la marée. Comme on peut le constater sur la Figure 3-30, au cours du flot (figures de gauche), les survitesses créées de part et d'autre des fondations parallèlement à l'écoulement sont plus importantes dans la partie sud-ouest du parc que dans la partie nord-est ; tandis que le sillage de réduction du courant en aval des fondations est plus étendu au nord-est qu'au sud-ouest. On retrouve un comportement similaire au cours du jusant. Cependant, la Figure 3-29 présentant les différences maximales d'intensités du courant sur tout le cycle de marée, montre que ces écarts maxima sont très similaires pour les deux régions du parc considérées.

	Fondations gravitaires
Incidence sur le courant barotrope < 10 %	Au-delà de 500 m
Incidence sur le courant barotrope < 5 %	Au-delà de 2 000 m

Figure 3-28 : Récapitulatif des distances d'impact sur le courant barotrope au maximum du flot et du jusant.

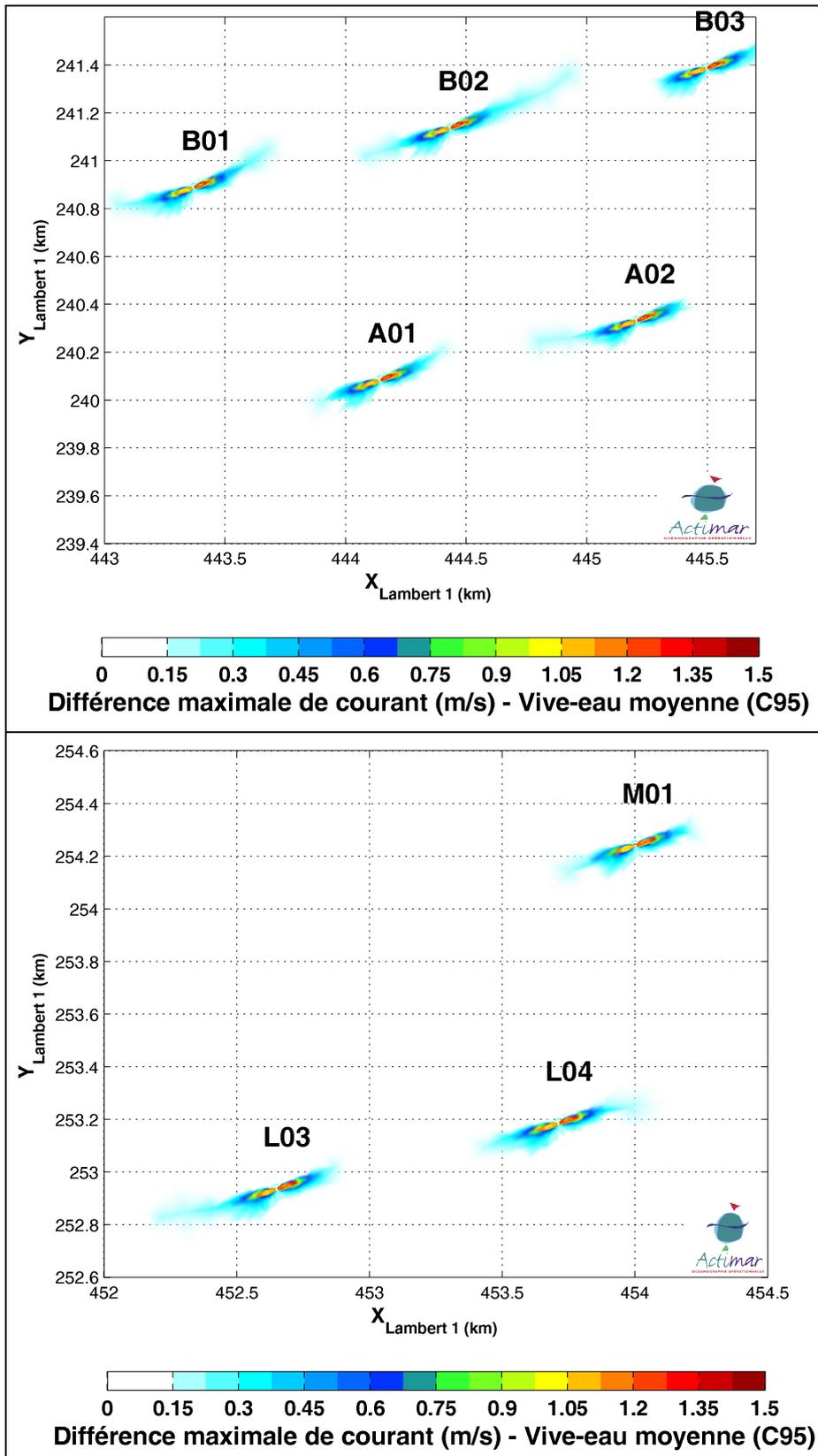


Figure 3-29 : Différences maximales d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de vive-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

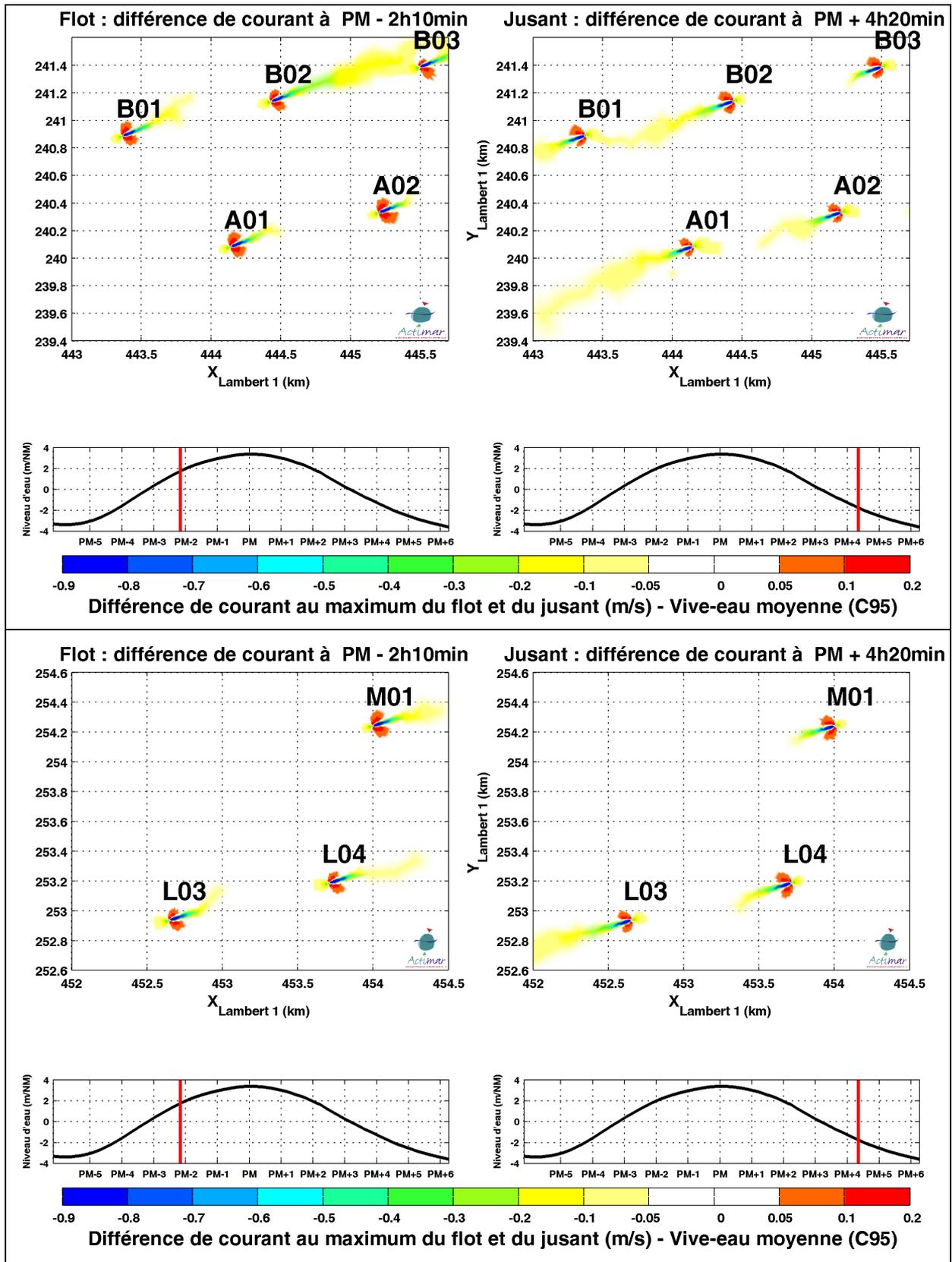


Figure 3-30 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

3.3.2.2 Courant de surface

De même que pour la composante barotrope, la Figure 3-33 montre que le courant en surface ralentit en amont et principalement en aval de la fondation ; sur les côtés, les vitesses accélèrent. L'écart de vitesse en surface au maximum de flot et de jusant est inférieur à 10 % au-delà de 600 m de la fondation ; il est inférieur à 5 % au-delà de 2500m. Ces résultats peuvent servir de données d'entrée pour la spécification des périmètres de sécurité pour la navigation.

La Figure 3-33 présente les différences absolues d'intensités du courant en surface au maximum du flot et du jusant pour une marée de vive-eau moyenne, pour la partie sud ouest du parc et nord est. Ces différences sur les courants de surface sont légèrement plus importantes que sur la composante barotrope du courant.

Le déphasage sur les courants de marée induit également une inhomogénéité entre les instants où l'on rencontre les écarts maxima dans les différents endroits du parc. Cependant, comme le montre la Figure 3-32, les différences maximales obtenues sur tout le cycle de marée sont très similaires pour toutes les fondations.

	Fondations gravitaires
Impact sur le courant en surface < 10 %	Au-delà de 600 m
Impact sur le courant en surface < 5 %	Au-delà de 2 500 m

Figure 3-31 : Récapitulatif des distances d'impact sur le courant en surface au maximum du flot et du jusant..

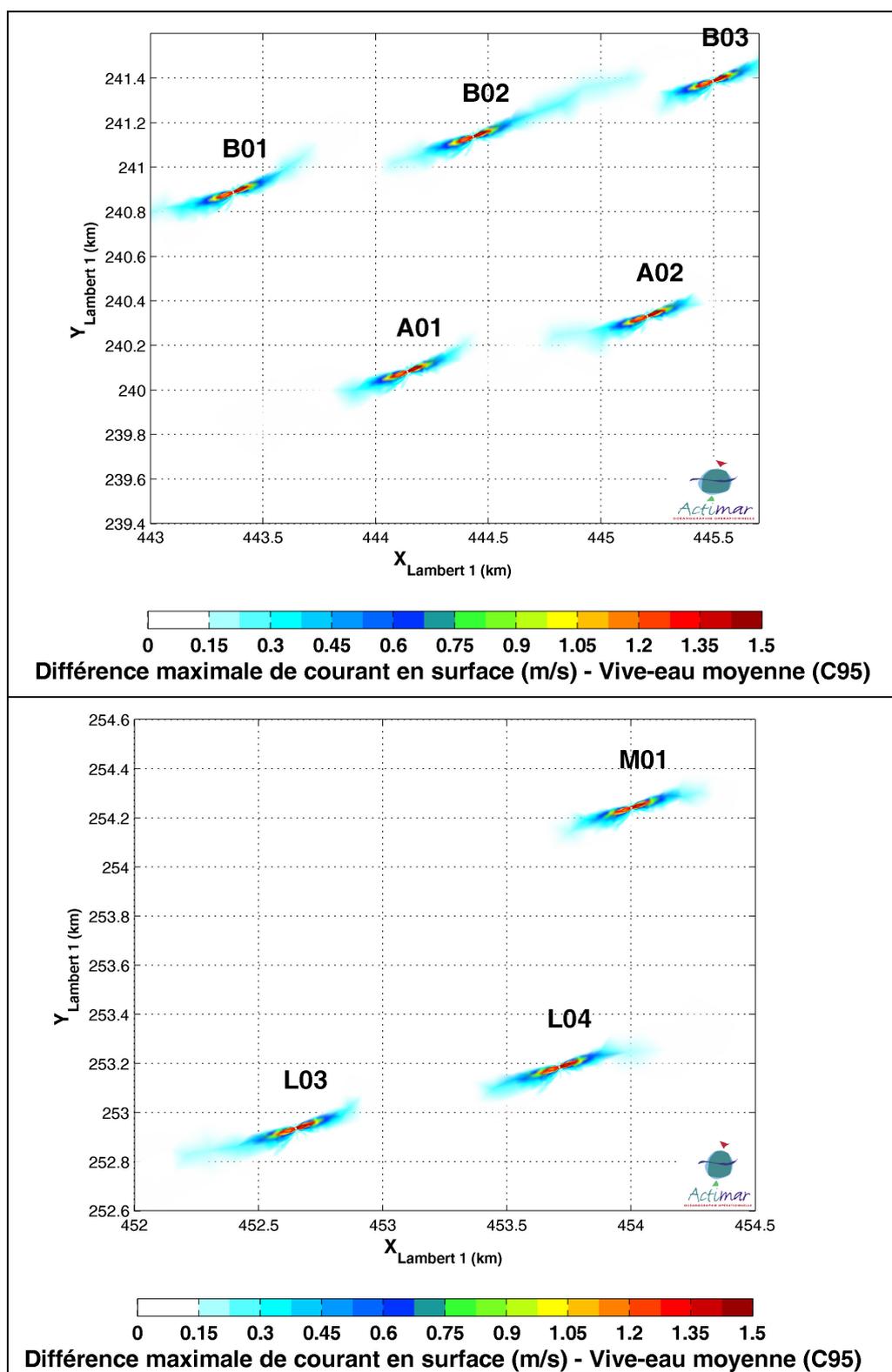


Figure 3-32 : Différences maximales d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de vive-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

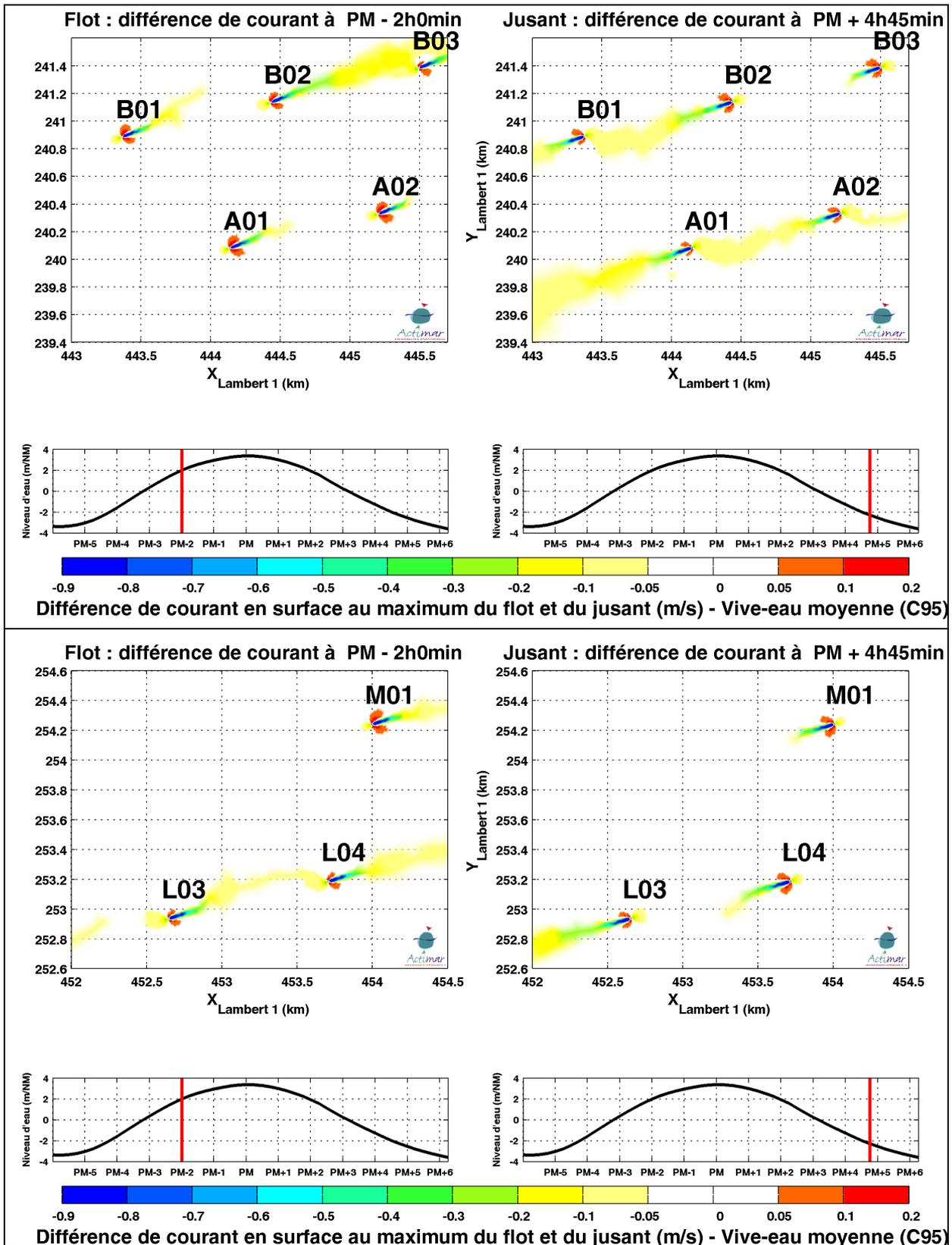


Figure 3-33 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

3.3.2.3 Courant de fond

L'écart de vitesse au fond au maximum de flot et de jusant est inférieur à 10 % au-delà de 400 m de la fondation ; il est inférieur à 5 % au-delà de 1000m.

La Figure 3-36 présente les différences absolues d'intensités du courant au fond au maximum du flot et du jusant pour une marée de vive-eau moyenne, pour la partie sud ouest du parc et nord est. Ces différences sur les courants de fond sont légèrement plus importantes que sur la composante barotrope du courant.

Le déphasage induit sur les courants de marée est non significatif sur les courants au fond et les différences constatées sont similaires suivant les positions des fondations au sein du parc, comme on peut le constater sur la Figure 3-35 qui présente les différences maximales obtenues sur tout le cycle de marée.

	Fondations gravitaires
Impact sur le courant au fond < 10 %	Au-delà de 400 m
Impact sur le courant au fond < 1 %	Au-delà de 1 000 m

Figure 3-34 : Récapitulatif des distances d'impact sur le courant au fond au maximum du flot et du jusant..

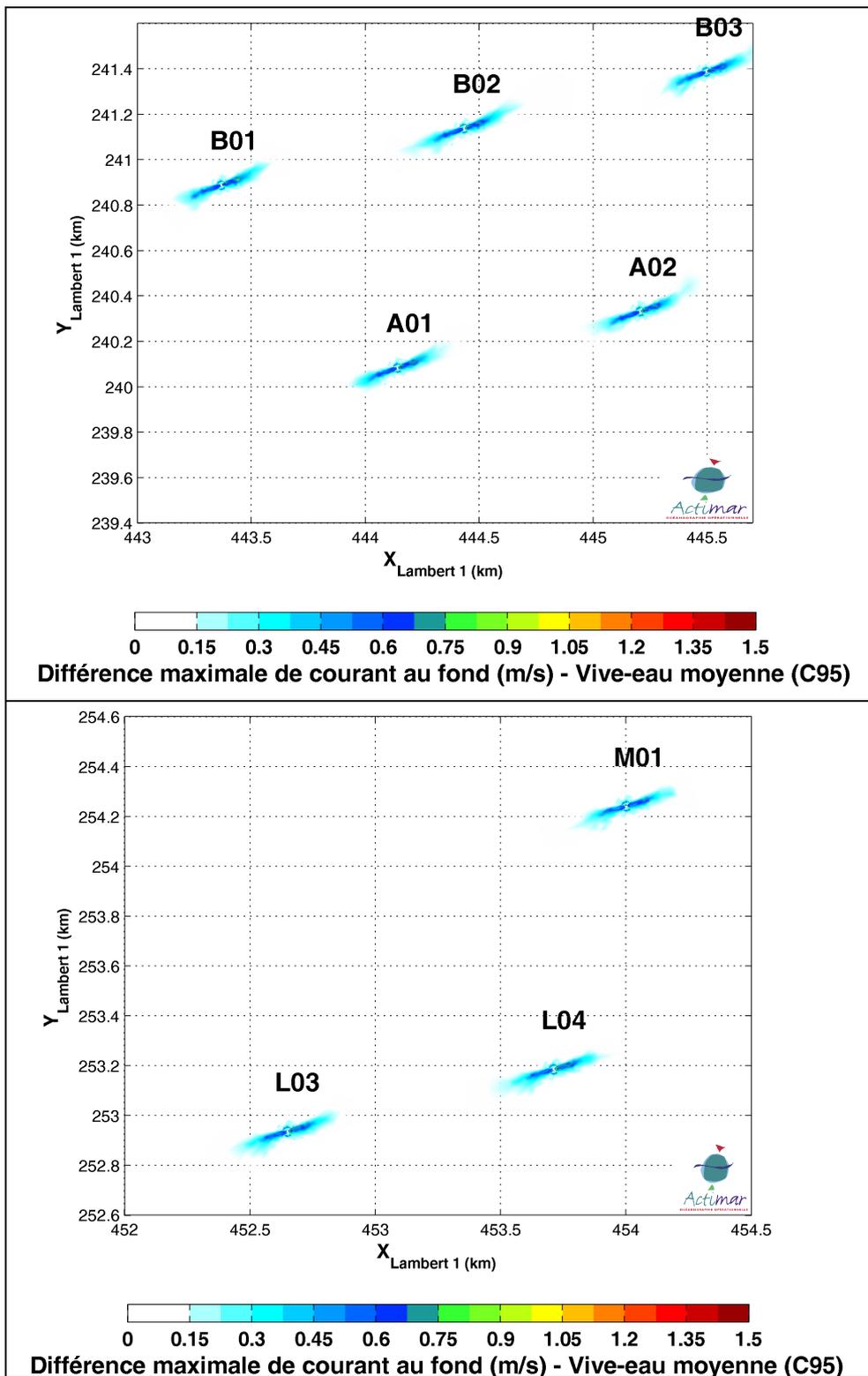


Figure 3-35 : Différences maximales d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de vive-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

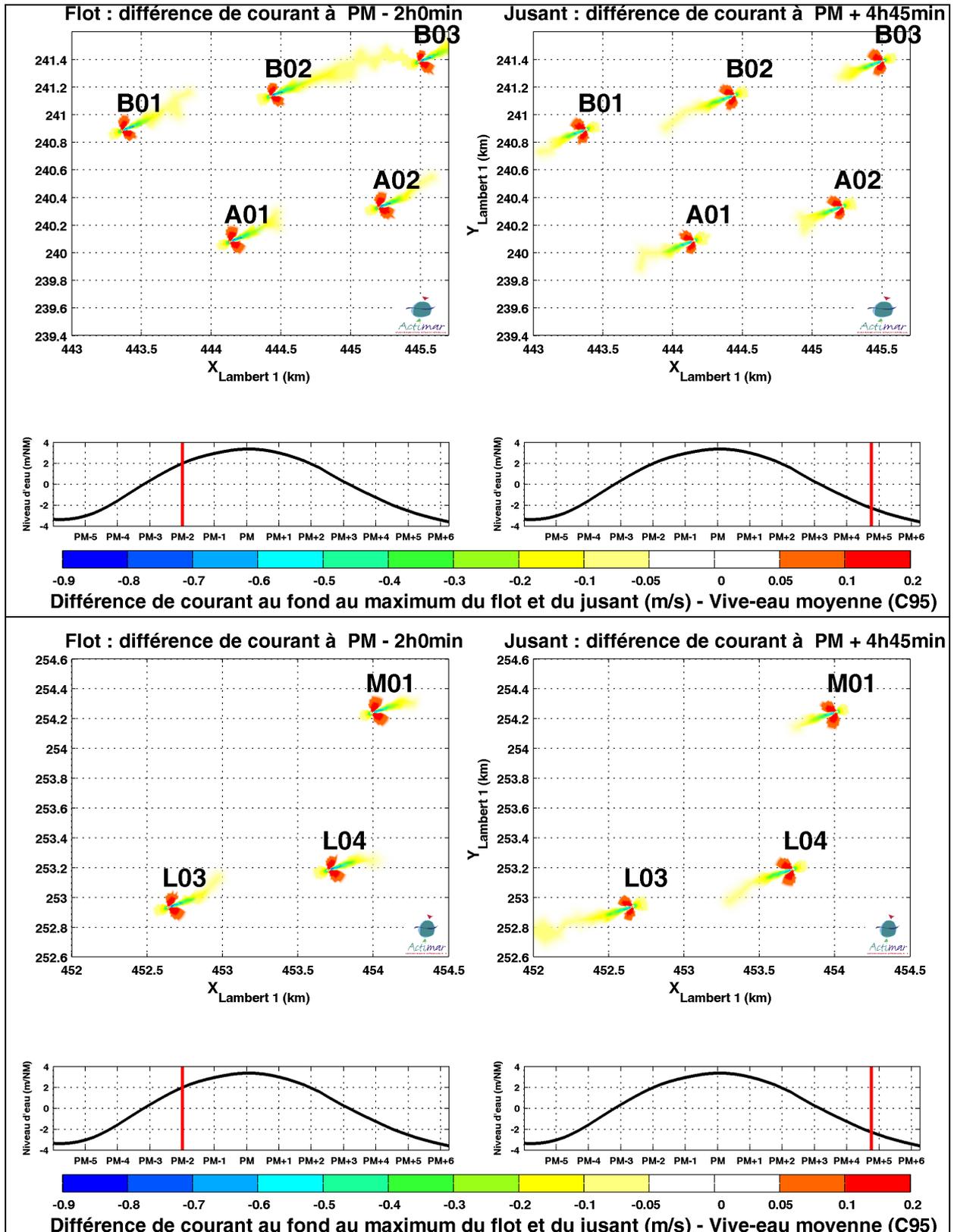


Figure 3-36 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de vive-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

3.3.2.4 Sections longitudinales et transverses aux fondations

Afin d'estimer l'influence des fondations gravitaires sur la circulation tridimensionnelle au voisinage immédiat des ouvrages, des sections ont été définies selon la direction principale de l'écoulement (est-nord-est / ouest-sud-ouest) ainsi que dans le sens transverse pour deux éoliennes du parc : la fondation M01 (au nord-est) et la fondation A01 (au sud-ouest). La Figure 3-37 présente la définition de ces sections. Les paragraphes suivants présentent les valeurs de courant modélisées en présence des ouvrages et pour une marée de vive-eau moyenne (C95).

Les surfaces colorées représentent l'intensité du courant total tandis que les vecteurs sont associés aux composantes tangentielle et verticale du courant.

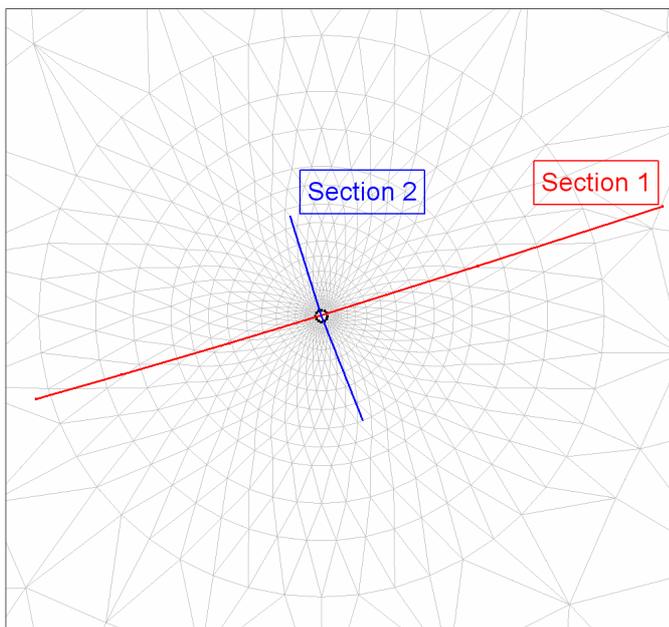


Figure 3-37 : Définition des sections longitudinale (section 1, en rouge) et transversale (section 2, en bleu)

3.3.2.4.1 Section longitudinale

Les sections longitudinales du courant au maximum du flot et du jusant pour une marée moyenne de vive-eau sont présentées pour la fondation M01 (nord-est du parc, Figure 3-38) et pour la fondation A01 (sud-ouest du parc, Figure 3-39). Pour les deux fondations considérées, ces illustrations mettent en évidence le même comportement du courant à proximité de l'ouvrage. De plus ce comportement est symétrique par rapport à la fondation selon que l'on se situe au flot ou bien au jusant.

On remarque une forte réduction de l'intensité du courant en aval dérive de la structure avec des vitesses faibles, inférieures à 0,3 m/s dans le sillage de la fondation. En amont dérive, le courant s'atténue progressivement. Le profil vertical des vitesses commence à être perturbé par les effets locaux de turbulence à l'approche de la fondation : la composante verticale devient significative, le courant plonge avant de remonter le long de la structure pour accélérer en la contournant par les côtés. En surface, une zone de courant plus forte se crée une vingtaine de mètres en amont, avant d'être fortement réduite dans les dix derniers mètres avant la fondation.

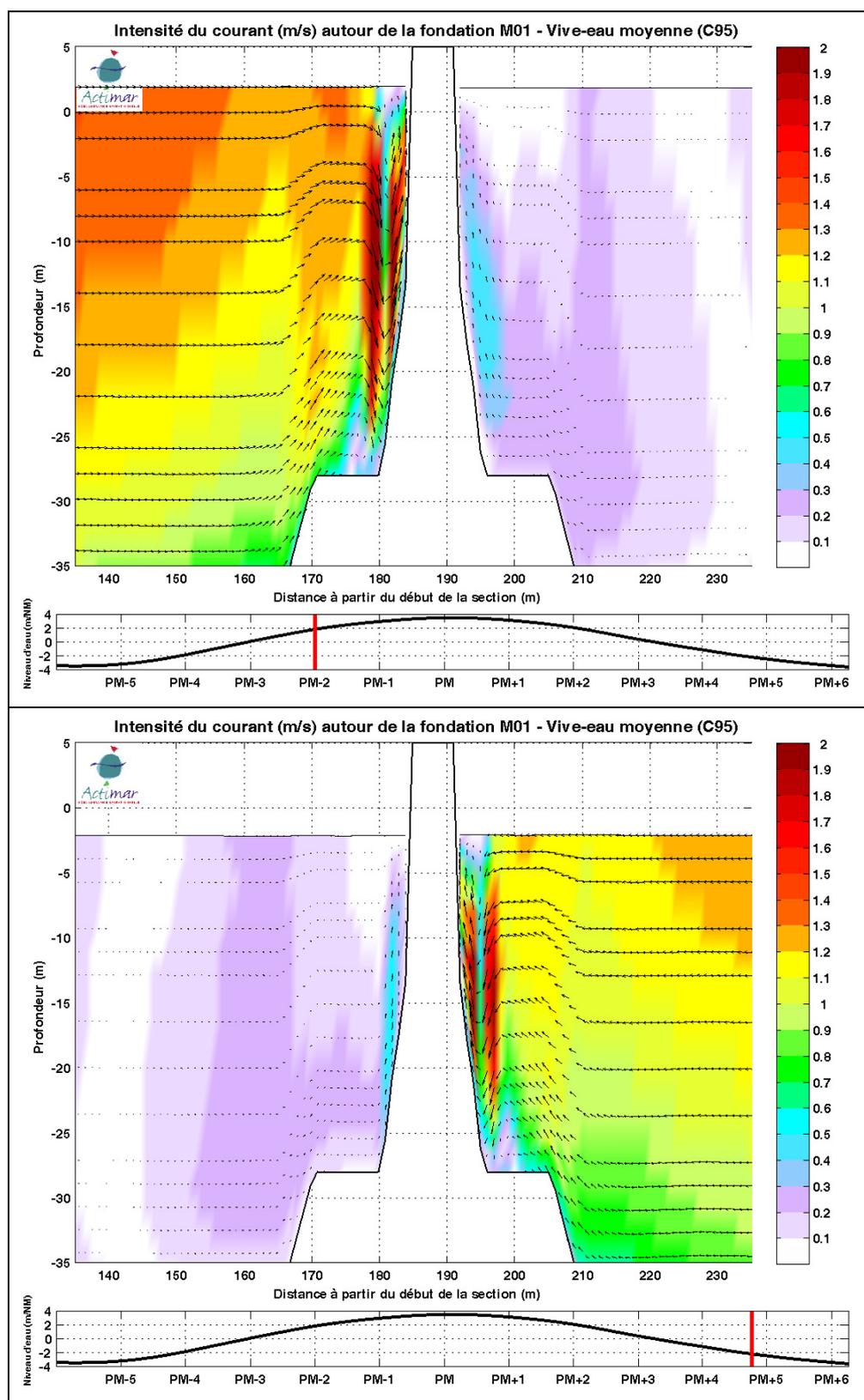


Figure 3-38 : Sections longitudinales du courant au maximum du flot (en haut) et du jusant (en bas) pour une marée moyenne de vive-eau et pour la fondation M01 (nord-est du parc).

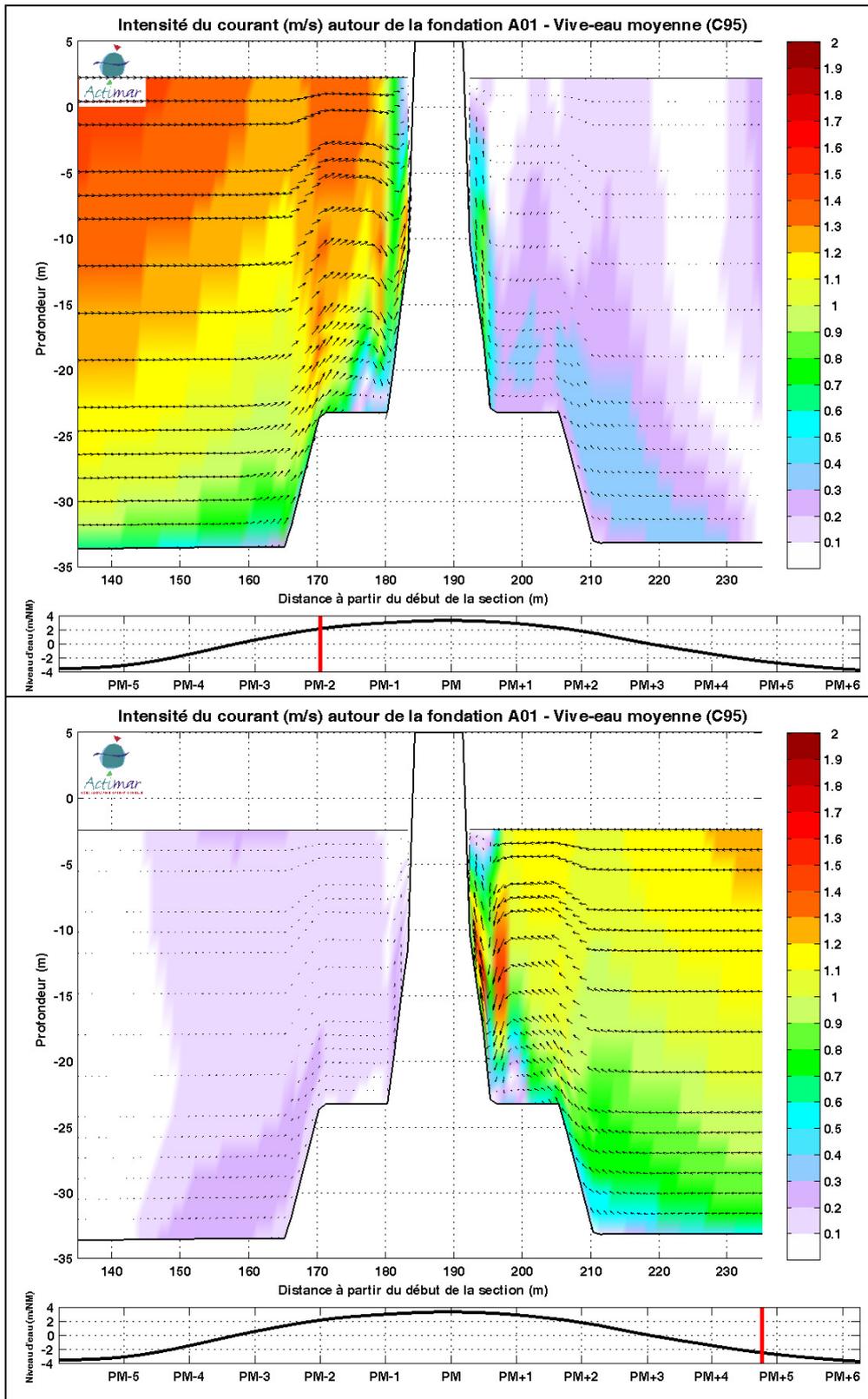


Figure 3-39 : Sections longitudinales du courant au maximum du flot (en haut) et du jusant (en bas) pour une marée moyenne de vive-eau et pour la fondation A01 (sud-ouest du parc).

3.3.2.4.2 Section transversale

Les sections transversales du courant au maximum du flot et du jusant pour une marée moyenne de vive-eau sont présentées pour la fondation M01 (nord-est du parc, Figure 3-40) et pour la fondation A01 (sud-ouest du parc, Figure 3-41). Pour les deux fondations considérées, le comportement de l'écoulement est très similaire et se caractérise par une accélération significative de part et d'autre de la structure. Pour une marée de vive-eau moyenne, des vitesses comprises entre 1,8 et 2 m/s sont modélisées au cours du flot, le long de l'embase conique. Ces survitesses sont plus faibles durant le maximum du jusant : entre 1,2 et 1,5 m/s selon la position de la fondation dans le parc. Plus on s'éloigne de la fondation, plus ces survitesses s'atténuent : à une distance de 20 mètres de la structure, les survitesses valent environ 0,5 m/s et il faut se placer à une cinquantaine de mètres de l'ouvrage pour rencontrer des survitesses négligeables.

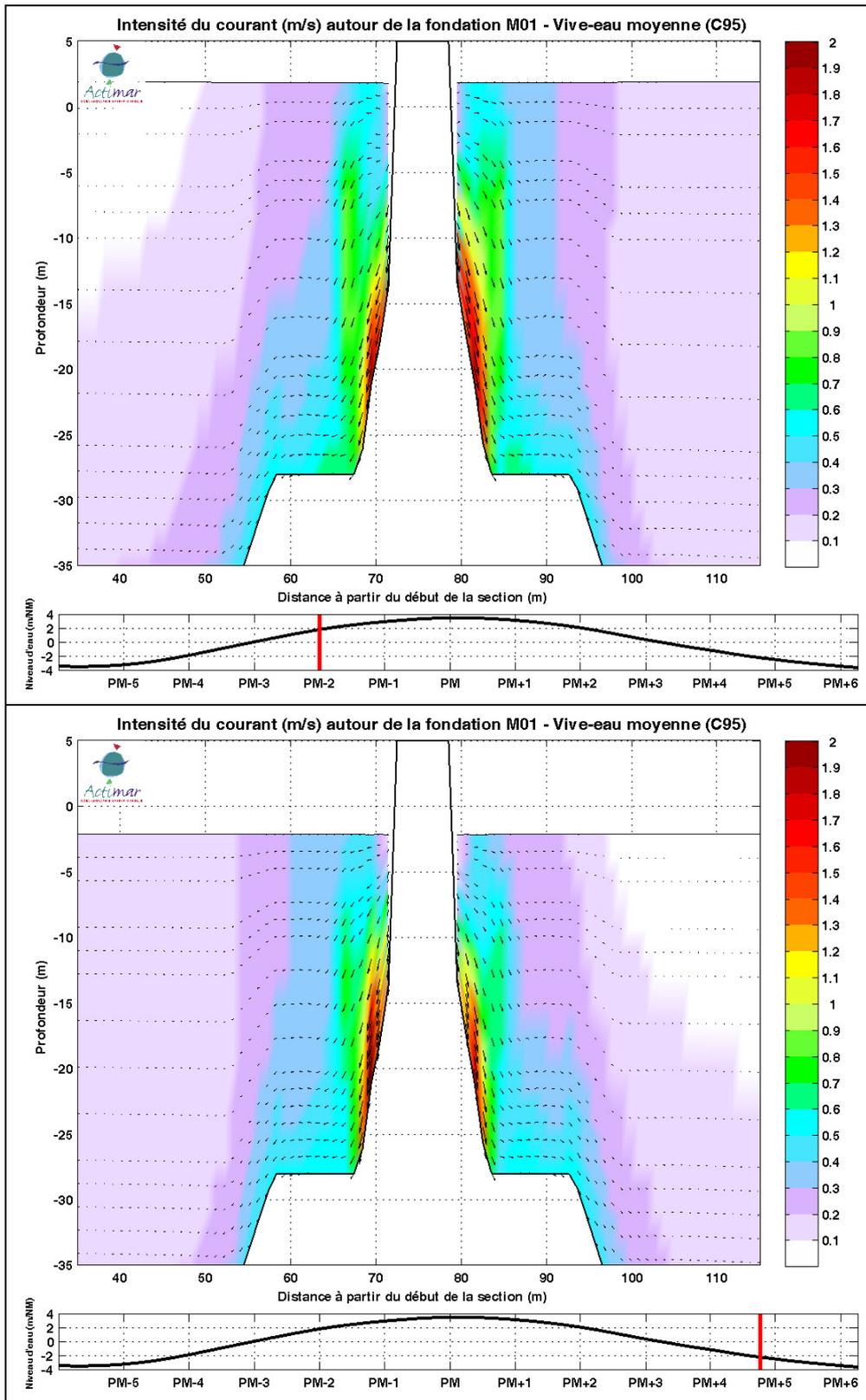


Figure 3-40 : Sections transversales du courant au maximum du flot (en haut) et du jusant (en bas) pour une marée moyenne de vive-eau et pour la fondation M01 (nord-est du parc).

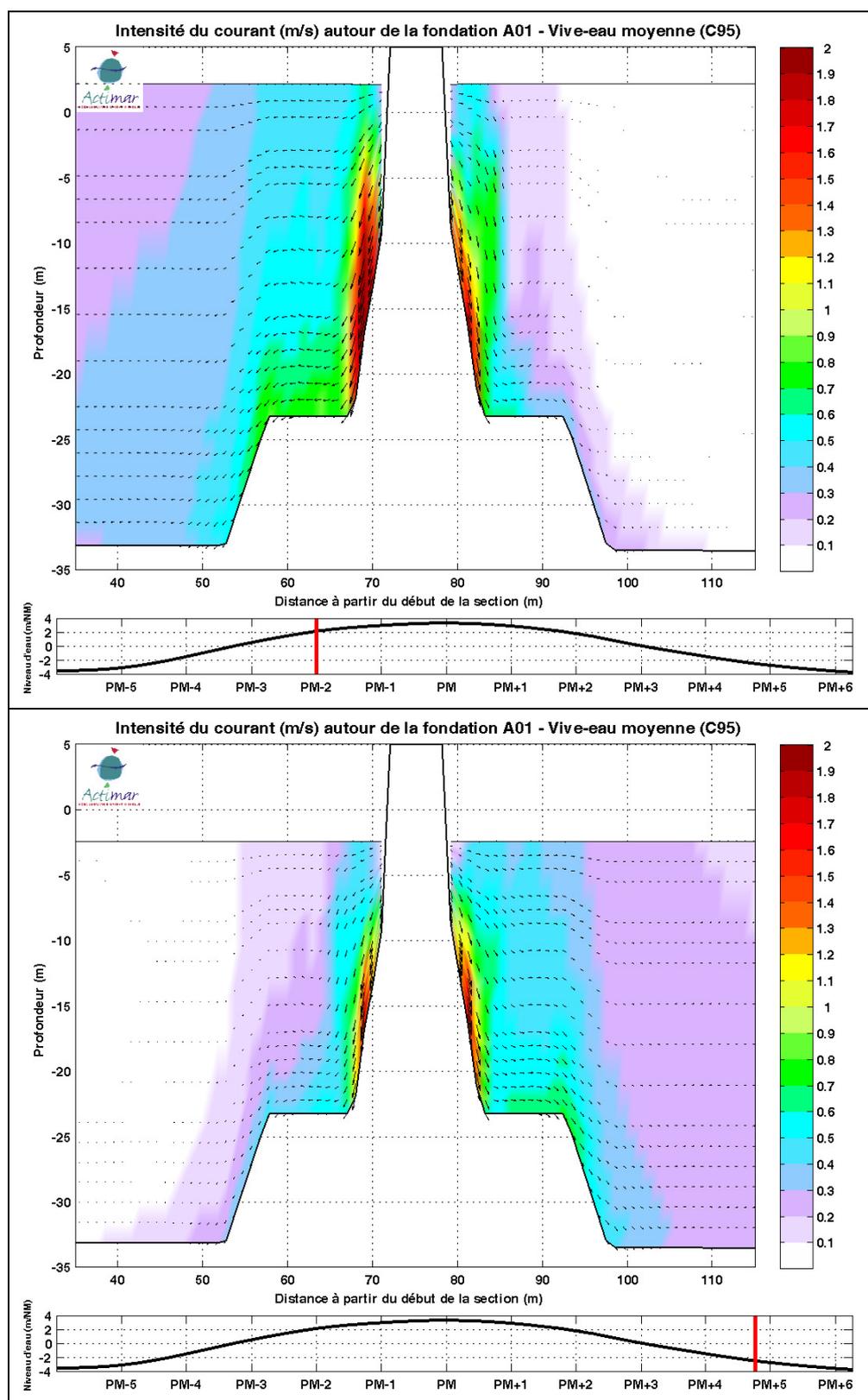


Figure 3-41 : Sections transversales du courant au maximum du flot (en haut) et du jusant (en bas) pour une marée moyenne de vive-eau et pour la fondation A01 (sud-ouest du parc).

4 - IMPACT SUR LES ETATS DE MER

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'influence du projet de parc éolien au large de Fécamp sur le comportement des états de mer à l'échelle locale et régionale. Les interactions entre les vagues et les fondations à l'échelle locale sont abordés par analyse bibliographique tandis que les effets du projet de parc éolien sur la génération et la propagation des états de mer à l'échelle régionale sont abordés par modélisation numérique.

4.1 INTERACTIONS ENTRE LES VAGUES INCIDENTES ET LES FONDATIONS

4.1.1 Processus hydrodynamiques

Toute construction placée sur la trajectoire des vagues ou du courant entrave l'écoulement des particules d'eau. Il se crée alors des différences de pression, les lignes de courant se resserrent et les particules d'eau accélèrent. Selon la forme et la taille de la construction, d'autres perturbations peuvent se produire comme des turbulences ou la réflexion des vagues. Dans le cadre de cette étude, seules les fondations de formes circulaires et coniques sont étudiées ; le comportement de l'écoulement dépend alors du diamètre du cylindre.

- Autour d'une pile mince, l'écoulement se sépare en aval de la pile, des tourbillons se forment et la couche limite de fond forme des rouleaux tout en contournant le bas de la pile. Ces tourbillons (en forme de fer à cheval, d'où leur nom de 'Horseshoe vortices') sont la cause principale de l'affouillement autour des piles minces (cf. Figure 4-1, à gauche).
- Pour les piles de diamètre plus large, l'écoulement ne se sépare pas (cf. Figure 4-1, à droite). Contrairement aux piles minces, les piles larges influencent les vagues incidentes qui se réfléchissent sur celui-ci vers l'extérieur. Sur le côté abrité du cylindre, il y a une zone d'ombre où les fronts des vagues sont courbés autour du cylindre, ce sont les vagues diffractées. Le cylindre perturbe donc les vagues incidentes en générant des vagues réfléchies et diffractées. La surface prend alors un aspect gaufré (« scattered waves »).

Les phénomènes de réflexion et de diffraction, et la présence de vagues stationnaires en face des cylindres qui en résultent, entraînent une modification du courant près du fond : une circulation constante se met en place avec un courant ascendant sous les nœuds qui provoque l'affouillement tandis qu'un dépôt se forme sous les ventres (cf. Figure 4-2).

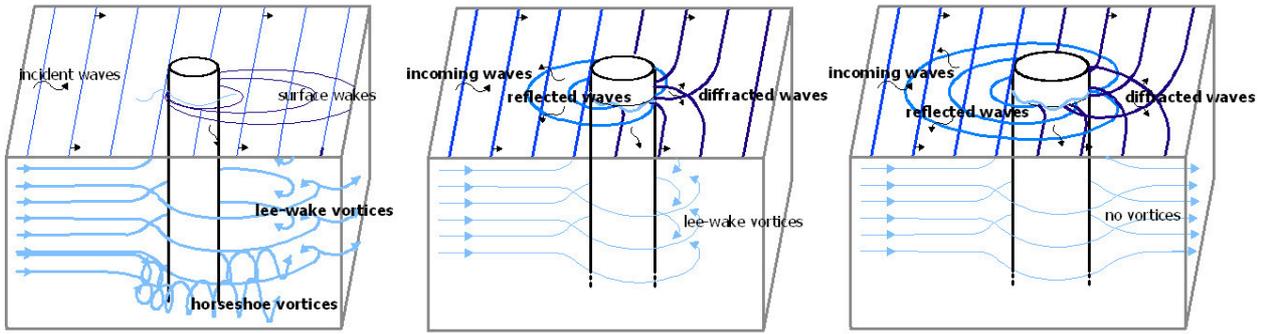


Figure 4-1 : Effet de la largeur des piles sur l'agitation en surface et le régime de l'écoulement : de gauche à droite : pile mince, intermédiaire et large (selon Haddorp, 2005, Réf. 27).

Pour les écoulements oscillatoires que sont les vagues, les régimes d'écoulement autour des fondations circulaires sont caractérisés principalement par deux valeurs adimensionnelles :

- le paramètre de diffraction, qui est le rapport entre le diamètre du cylindre et la longueur d'onde des vagues. Pour des valeurs supérieures à 0,2 (Isaacson (1979, Réf. 30), voire 0,1 (Hoffmans et Verheij (1997, Réf. 28), les vagues seront diffractées autour de la fondation,
- le nombre de Keulegan-Carpenter (KC), qui caractérise l'amplitude du mouvement orbital des particules d'eau par rapport à la largeur du cylindre et qui indique si l'écoulement autour du cylindre se séparera et expulsera des tourbillons dans le sillage. Le régime de pile mince est atteint pour les fortes valeurs de KC, typiquement $KC > 6$. Egalement, KC est borné par la limite de stabilité des vagues (cambrure limite).

La Figure 4-3 synthétise la classification des régimes d'écoulement par rapport aux paramètres de diffraction et de Keulegan-Carpenter, et la limite de stabilité des vagues.

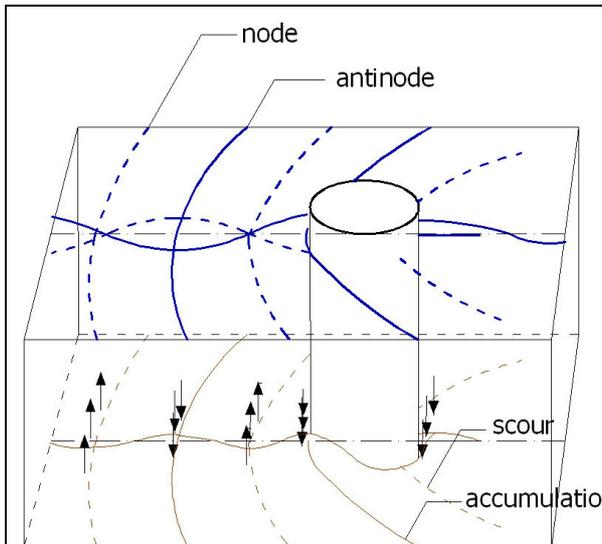


Figure 4-2 : Courants verticaux et champ des vagues diffractées. (Haddorp, 2005)

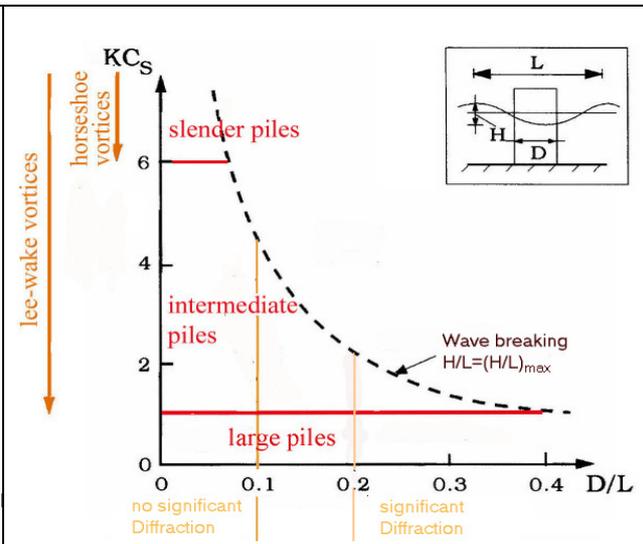


Figure 4-3 : Régimes d'écoulement représentés dans le plan (KC,D/L). (Adapté de Haddorp, 2005 et Sumer et Fredsøe, 2006)

4.1.2 Effets non linéaires au sein des interactions houle/structure, run-up

Le run-up est une forte élévation de la surface libre le long de la structure. Ce n'est que très récemment (Molin et al., 2005, Réf. 42) que le rôle des interactions tertiaires entre houle incidente et houle réfléchi par la structure a été mis en avant sur les effets de "run-up" et d'envahissement.

La Figure 4-4 présente le run-up sur une des piles du parc éolien de Horns Rev, au large des côtes du Danemark en Mer du Nord. Le parc éolien de Horns Rev est situé en eau très peu profonde et les fondations sont souvent exposées à des vagues déferlantes ou en situation proche du déferlement. Associé au run-up, on a un large éclaboussement (splash) lié à l'impact de la vague déferlante sur la structure.

Le run-up est influencé par la cambrure des vagues incidentes et par la forme de la fondation. De Vos et al. (2007, Réf. 17) ont montré que le run-up est plus important sur les fondations de type conique que de type monopieu et qu'il dépend de la forme du cône et/ou du diamètre de la fondation. Seules des mesures en bassin d'essai permettent d'évaluer finement le run-up sur une fondation conique spécifique : l'étude de la diffraction au troisième ordre est particulièrement complexe et jusqu'à présent appliquée à des géométries simples (cas d'une plaque verticale, Molin et al., 2005, Réf. 42).



Figure 4-4 : Exemple de run-up sévère sur une éolienne du parc Horns Rev (Vattenfall and DONG Energy).

4.1.3 Influence du déferlement des vagues sur les risques d'affouillement

Quelques expériences permettant l'analyse de l'impact du déferlement des vagues sur l'affouillement autour des cylindres sont répertoriées dans la littérature. Récemment, le 'Offshore Denmark Center' a réalisé une étude pour synthétiser les connaissances et les méthodes utilisées pour estimer les profondeurs d'affouillement local pour les fondations de type monopieu offshore Réf. 43. Au cours de ce projet, des tests physiques ont été réalisés pour étudier l'interaction entre des vagues régulières et irrégulières, déferlantes et non déferlantes sur un cylindre. Tous les essais ont été menés avec $D/L < 0,1$ (pas de diffraction significative – cf. Figure 4-3) et KC compris entre 3,1 et 12,4 (régimes de cylindres minces et intermédiaires).

Les résultats des expériences montrent que l'amplification de la contrainte sur le fond près du cylindre sont comparables pour des vagues déferlantes ou non. L'augmentation de la turbulence et de la vitesse des particules due au déferlement des vagues reste approximativement limitée aux deux tiers supérieurs de la colonne d'eau. Cela signifie que l'influence du déferlement n'atteint pas le fond.

4.2 APPLICATION AU SITE DU PARC EOLIEN OFFSHORE DES HAUTES FALAISES

4.2.1 Incidence sur les vagues au voisinage des fondations

Le comportement hydrodynamique autour des fondations se caractérise à partir du paramètre de diffraction et du nombre de Keulegan-Carpenter (cf. paragraphe 4.1.1). Comme ces deux paramètres nécessitent de connaître l'amplitude et la longueur d'onde des vagues, une analyse du tableau des corrélations statistiques (H_s/T_p) (cf. Tableau 2-3) et des conditions extrêmes des vagues a été réalisée.

Dans cette analyse, on distingue d'une part l'embase plane circulaire d'un diamètre de 34 m et, d'autre part, l'ensemble continu formé par la section conique et le fût cylindrique émergeant qui a un diamètre moyen de 10,2 m sur la profondeur d'eau moyenne du parc (34 m).

Les nombres de Keulegan-Carpenter (KC) et de diffraction (D/L) calculés pour les deux sections sont présentés dans le Tableau 4-1 et le Tableau 4-2. La couleur verte signifie que la diffraction est négligeable tandis que la couleur rose montre que la diffraction devient significative.

		Hs (m)													
		D/L	0<<0,5	0,5<<1	1<<1,5	1,5<<2	2<<2,5	2,5<<3	3<<3,5	3,5<<4	4<<4,5	4,5<<5	5<<5,5	5,5<<6	Pbb
Tp (s)	2<<3	1,05	0,1	0,2											5,04
	3<<4	0,53	0,1	0,2	0,4										61,66
	4<<5	0,32	0,1	0,2	0,4	0,5									159,7
	5<<6	0,22	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7								208,9
	6<<7	0,16	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,8	1,0						176,6
	7<<8	0,12	0,1	0,2	0,4	0,5	0,7	0,9	1,0	1,2	1,3				124,1
	8<<9	0,09	0,1	0,2	0,4	0,6	0,7	0,9	1,0	1,2	1,4	1,5	1,7		95,94
	9<<10	0,08	0,1	0,2	0,4		0,7	0,9	1,1	1,2	1,4	1,6	1,7	1,9	78,53
	10<<11	0,07	0,1	0,3	0,4						1,5	1,7	1,8	2,0	49,74
	11<<12	0,06	0,1	0,3	0,5									2,1	23,32
	12<<13	0,05	0,1	0,3											9,90
	13<<14	0,05	0,1	0,3	0,5										3,11
	14<<15	0,04	0,1	0,3											1,99
	15<<16	0,04	0,1	0,3											0,83
	16<<17	0,04	0,1	0,4											0,44
	17<<18	0,03	0,1	0,4											0,24
	18<<19	0,03	0,1	0,4											0,07
19<<20	0,03	0,1	0,4											0,07	
Pbb			421,3	287,7	141,3	76,01	36,88	20,65	9,58	3,89	1,48	0,77	0,23	0,13	1000

Tableau 4-1 : KC et D/L associés au diagramme (H_s/T_p) pour une fondation cylindrique de 10,2 m de diamètre.

		Hs (m)													
		D/L	0<<0,5	0,5<<1	1<<1,5	1,5<<2	2<<2,5	2,5<<3	3<<3,5	3,5<<4	4<<4,5	4,5<<5	5<<5,5	5,5<<6	Pbb
Tp (s)	2<<3	3,48	0,0	0,1											5,04
	3<<4	1,78	0,0	0,1	0,1										61,66
	4<<5	1,08	0,0	0,1	0,1	0,2									159,7
	5<<6	0,72	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2								208,9
	6<<7	0,52	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3						176,6
	7<<8	0,39	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4				124,1
	8<<9	0,31	0,0	0,1	0,1	0,2	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5		95,94
	9<<10	0,26	0,0	0,1	0,1		0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,5	0,5	0,6	78,53
	10<<11	0,22	0,0	0,1	0,1						0,4	0,5	0,5	0,6	49,74
	11<<12	0,20	0,0	0,1	0,1									0,6	23,32
	12<<13	0,17	0,0	0,1											9,90
	13<<14	0,16	0,0	0,1	0,2										3,11
	14<<15	0,14	0,0	0,1											1,99
	15<<16	0,13	0,0	0,1											0,83
	16<<17	0,12	0,0	0,1											0,44
	17<<18	0,11	0,0	0,1											0,24
	18<<19	0,11	0,0	0,1											0,07
19<<20	0,10	0,0	0,1											0,07	
Pbb			421,3	287,7	141,3	76,01	36,88	20,65	9,58	3,89	1,48	0,77	0,23	0,13	1000

Tableau 4-2 : KC et D/L associés au diagramme (Hs/Tp) pour une embase gravitaire circulaire de 34 m.

Dans le Tableau 4-1, les valeurs de KC évoluent de 0,1 à 2,1. Selon la classification présentée sur la Figure 4-3, plus de 98% des états de mer sont sous le régime de cylindres larges ($KC < 1$). Les vagues pour lesquelles la diffraction devient significative ($D/L > 0,1$ selon Verheij et Hoffmans (1997) et $D/L > 0,2$ selon Isaacson (1979)) sont de relativement courte période ($T_p < 8$ s et $T_p < 6$ s respectivement). 73,5% des vagues se situent dans la zone $D/L > 0,1$. Les effets de la diffraction et des non-linéarités vagues / structure perturbent la surface libre essentiellement sur la première longueur d'onde (~100 m pour une période de 8 s, 60 m pour une mer du vent de période 6 s).

La séparation de l'écoulement s'intensifie avec l'augmentation de KC et donc, avec Hs et Tp. Le Tableau 4-1 indique que des tourbillons de sillage sont susceptibles de se former en aval de la fondation pour des états de mer forts ($H_s > 3,0$ m), ce qui représente moins de 2% des occurrences.

Au fond, autour de l'embase plane circulaire de 34 m de diamètre et 10 m de hauteur, les valeurs de KC sont plus faibles. Elles restent inférieures à 1.

4.2.2 Incidence du parc éolien sur les états de mer à l'échelle régionale

L'incidence du parc éolien sur le climat des vagues à l'échelle régionale est abordé dans cette étude par modélisation numérique, en considérant deux aspects :

- ✓ L'effet de masquage des fondations sur la propagation des vagues.
- ✓ L'effet de sillage des turbines sur les échanges océan-atmosphère.

Nous avons retenu d'utiliser un modèle spectral d'états de mer car cela permet de prendre en les processus de réfraction, shoaling, dissipation par frottement sur le fond et déferlement bathymétrique ainsi que les échanges océan-atmosphère qui ne sont plus négligeables à une échelle régionale.

Le modèle numérique d'états de mer retenu pour l'étude est le code Tomawac, développé par EDF-LNHE dans le système Telemac, car il repose sur l'utilisation de maillages non-structurés qui eux seuls permettent de bien représenter les géométries complexes et, pour notre étude, d'inclure les fondations dans le maillage.

Le modèle bathymétrique utilisé ici est le même que celui construit pour le modèle hydrodynamique (cf. paragraphe 3.1.2).

4.2.2.1 Le code Tomawac

Au sein de la chaîne TELEMAC, le module de simulation TOMAWAC est dédié à la propagation spectrale des états de mer. Ce modèle repose sur l'équation d'évolution de la densité d'action d'onde (la densité d'action d'onde étant définie comme la densité d'énergie divisée par la pulsation). TOMAWAC est un modèle de "troisième génération", c'est-à-dire qu'il n'impose aucune paramétrisation sur la répartition spectrale ou directionnelle de l'énergie (ou de l'action d'onde) de la houle.

Le spectre des vagues donne la répartition de l'énergie des vagues en fréquences et en directions. Il constitue une quantité très utile pour les applications en ingénierie car il contient une information condensée des propriétés statistiques du champ des vagues. Il permet le calcul, en chaque point du maillage, de la hauteur spectrale significative, H_m0 , de la période de pic, T_p , de la direction moyenne et de bien d'autres paramètres (AIRH).

Tomawac trouve ses principales applications dans les études météo océaniques car il est capable de générer et de propager les états de mer à l'échelle régionale et d'étudier le comportement de la houle le long du littoral.

TOMAWAC inclut les processus suivants :

- Interaction houle-fond. TOMAWAC modélise la transformation des propriétés des ondes de surface sous les effets combinés de la réfraction, du shoaling (gonflement de la houle sous l'effet de la variation de la profondeur d'eau) et des processus de dissipation d'énergie tels que le frottement sur le fond et le déferlement bathymétrique.
- Interaction houle – atmosphère. L'interaction houle - atmosphère est modélisée dans TOMAWAC grâce à trois termes sources prenant respectivement en compte les effets de l'apport dû au vent, du moutonnement et des interactions non-linéaires entre quadruplets de fréquences.
- Interaction houle – courant. Les courants peuvent modifier le champ des vagues en fonction de leur intensité et de leur gradient spatial. Ils modifient la direction des vagues par réfraction (pour un courant spatialement non-homogène) et leur amplitude par shoaling.
- Interaction houle – marée. La variation temporelle des courants et de la profondeur d'eau affecte l'évolution des vagues en domaine littoral.

4.2.2.2 Conditions aux limites et paramétrages

Peu d'articles font référence à des études d'incidence de parc éolien sur les états de mer ; et le plus souvent, ils traitent uniquement de l'entrave que provoquent les fondations sur la propagation des vagues.

Concernant le sillage du vent provoqué par les turbines, la documentation est plus riche et diversifiée. Les travaux de Christiansen et Hasager (2005), Réf. 11, ont l'intérêt de présenter une quantification de l'atténuation du vent à l'arrière des parcs éoliens à partir de l'analyse des données radars satellitaires (ERS-2 SAR, ENVISAT, ASAR) et aéroportées (E-SAR) à synthèse d'ouverture. L'analyse des données radar montre que le vent est perturbé sur une distance de l'ordre de 10 km en aval des turbines avec un déficit sur la vitesse du vent pouvant atteindre 10% et qu'au-delà le déficit sur la vitesse du vent est inférieur à 4%.

Pour traiter la problématique de l'entrave que provoquent les fondations sur la propagation des vagues, des simulations d'états de mer dans les conditions naturelles (absence des fondations) sont réalisées dans une première phase du projet. Elles permettent vérifier le comportement du modèle mis en place. Puis, les fondations des turbines sont insérées dans la grille de calcul et les résultats obtenus sont comparés à la situation de référence (conditions naturelles). Cette méthodologie permet d'évaluer l'incidence des fondations du projet éolien à l'échelle régionale.

L'analyse des effets du déventement provoqué par le fonctionnement du parc sur la génération et la propagation des états de mer s'inspire des travaux de Gandara et Harris récemment publiés en 2012 (Réf. 21). Une troisième série de simulations est réalisée dans laquelle le forçage atmosphérique intègre le sillage du vent provoqué par les turbines. Ce dernier est calculé à partir des formules empiriques du modèle de sillage de N.O. Jensen (Réf. 40). Ces formules permettent de calculer le déficit du vent à l'arrière des turbines, à une hauteur de 100 m. Les formules ont été adaptées pour calculer le déficit du vent à une hauteur de 10 m, près de la surface. Notamment, il faut une certaine distance à l'arrière des turbines pour que le sillage affecte les conditions à la surface de la mer. Les données recueillies par Christiansen et Hasager (2005) sur le site de Horns Rev 1 ont permis de valider la représentation du vent à l'arrière des turbines (cf. Figure 4-5).

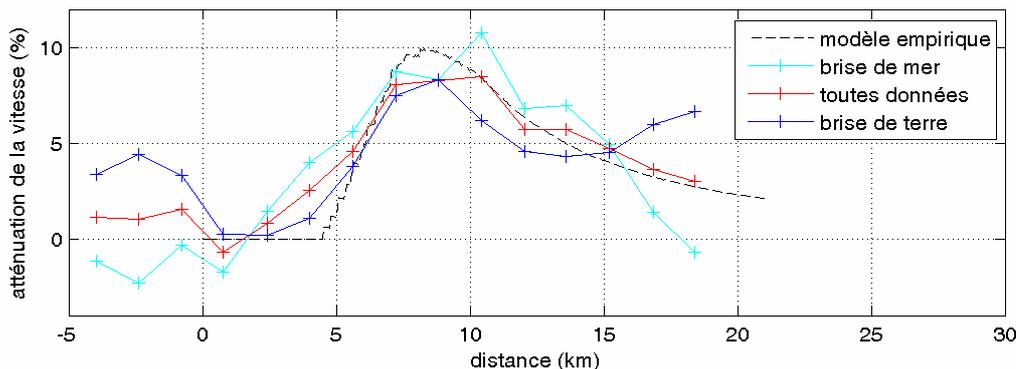


Figure 4-5 : Comparaison du déficit du vent entre les observations SAR ERS-2 et le modèle empirique développé. Application au site de Horns Rev.

Cinq conditions types ont été retenues pour les simulations numériques :

- Une condition moyenne d'états de mer d'ouest ($H_s=1\text{m}/T_p=5\text{s}$), associée à un forçage atmosphérique d'ouest-sud-ouest ($V_m=9\text{m/s}$) ;

- Une condition moyenne d'états de mer d'ouest ($H_s=1\text{m}/T_p=5\text{s}$), associée à un forçage atmosphérique dans le même secteur d'incidence, d'ouest ($V_m=9\text{m/s}$) ;
- Une condition de mer forte ($H_s=3,5\text{ m}/T_p=8,5\text{s}$) d'ouest, associée à un forçage atmosphérique d'ouest ($V_m=15\text{ m/s}$) ;
- Une condition moyenne de houle de nord-est ($H_s=1\text{m}/T_p=5\text{s}$), associée à un vent en incidence de nord-est ($V_m=9\text{m/s}$)
- Une condition moyenne de houle d'ouest ($H_s=1\text{m}/T_p=5\text{s}$), associée à un vent en incidence de nord-est ($V_m=7\text{m/s}$)

Les simulations numériques sont répétées pour les configurations suivantes :

- La configuration naturelle actuelle.
- La configuration aménagée, sans fonctionnement des turbines.
- La configuration aménagée, avec les turbines en fonctionnement.

4.2.2.3 Analyse des résultats

Les résultats obtenus pour les deux configurations aménagées sont comparés à la situation de référence (conditions naturelles). Cette méthodologie permet d'évaluer l'incidence du projet éolien.

A partir des résultats obtenus, on établit des surfaces colorées des écarts relatifs de la hauteur significative des vagues (H_s). Pour mettre en avant les endroits où les états de mer sont modifiés, les zones où les écarts relatifs de H_s sont inférieurs à 5% sont laissées blanches sur les surfaces colorées.

Pour qualifier l'impact par rapport à la variabilité naturelle des états de mer, nous avons calculé, à partir des données Anemoc (cf. § 2.3.2), la dispersion de la moyenne annuelle de H_s sur les 22 ans d'hindcast. On obtient une dispersion de 7,1% autour de la valeur moyenne sur 22 ans.

Le parc éolien (fondation et turbines) contribue à atténuer les états de mer par l'effet de masquage des fondations et l'effet de sillage des turbines (cf. Figure 4-6 et Figure 4-7).

La présence des fondations affecte les états de mer dans la zone d'implantation, sur une distance de l'ordre de 150 à 200 m autour des fondations. Sous les seuls effets de masquage, l'écart relatif calculé sur le paramètre H_s est inférieur à 10% à 50 m en aval, il est inférieur à 5% à 150 m.

L'effet des sillages des turbines est beaucoup plus diffus que l'effet des fondations. Lorsque le vent et la houle sont dans la même direction les effets se cumulent. Sur l'ensemble des simulations, l'écart relatif maximal calculé sur la hauteur spectrale significative est de 5,3 %. Cet écart reste inférieur à la variabilité naturelle des états de mer, estimée à 7,1% sur le site à partir des données Anemoc.

Dans cette zone de la Manche, les états de mer sont généralement composés de différents systèmes de vagues (houle / mer de vent) de différentes incidences. Pour ces états de mer complexes, l'incidence du parc éolien est plus diffus.

C'est donc autour des fondations que la surface est la plus perturbée, sur une distance de 150 à 200 m. La surface y est rendue plus irrégulière par la combinaison de différents effets : réflexion, diffraction, non-linéarités vagues / structure, masquage. Ces résultats peuvent servir de données d'entrée pour la spécification des périmètres de sécurité pour la navigation.

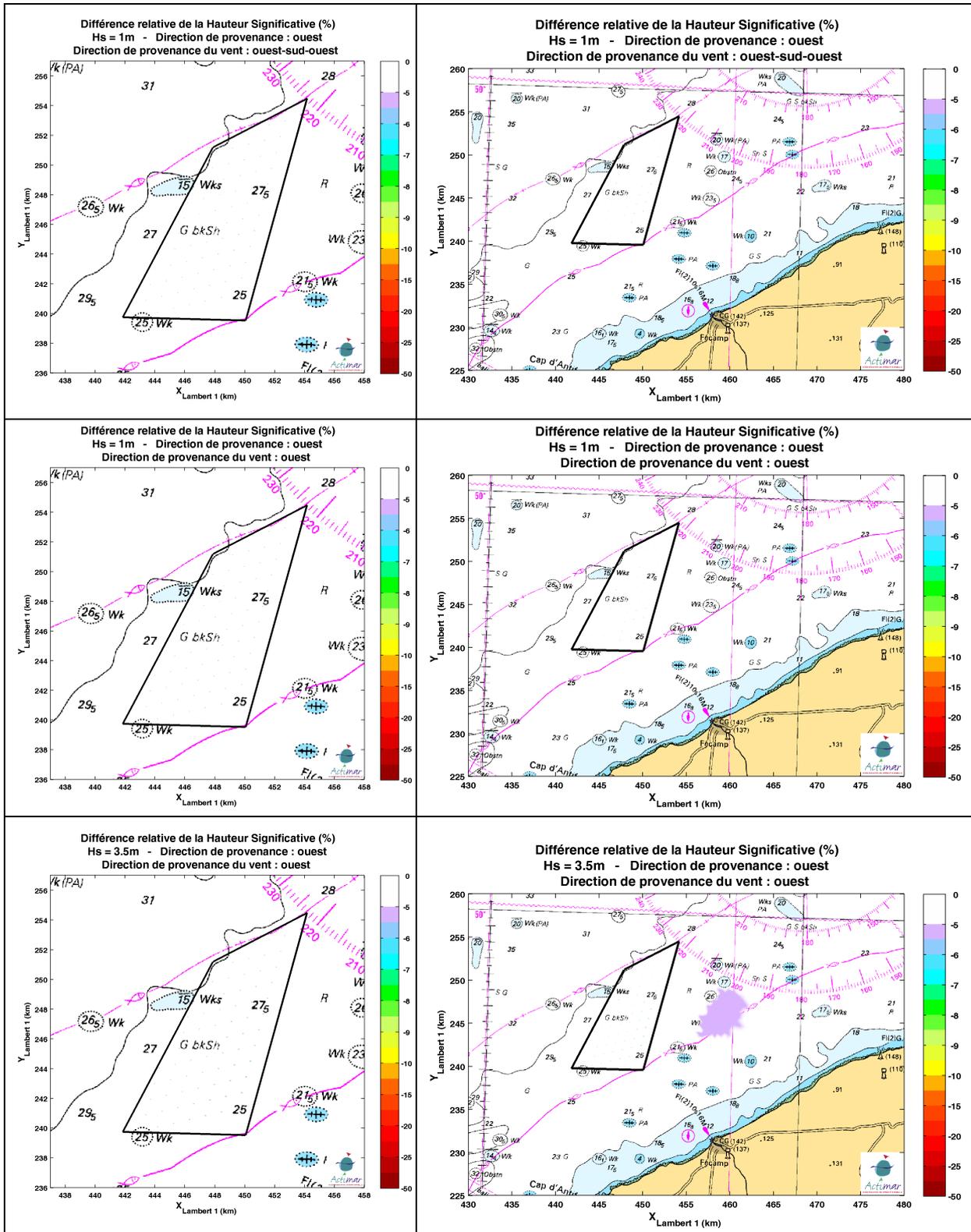


Figure 4-6 : Ecart relatif sur la hauteur significative (Hs) pour deux conditions types. Prise en compte des effets de masquage des fondations (gauche) et des effets combinés du sillage des turbines (droite).

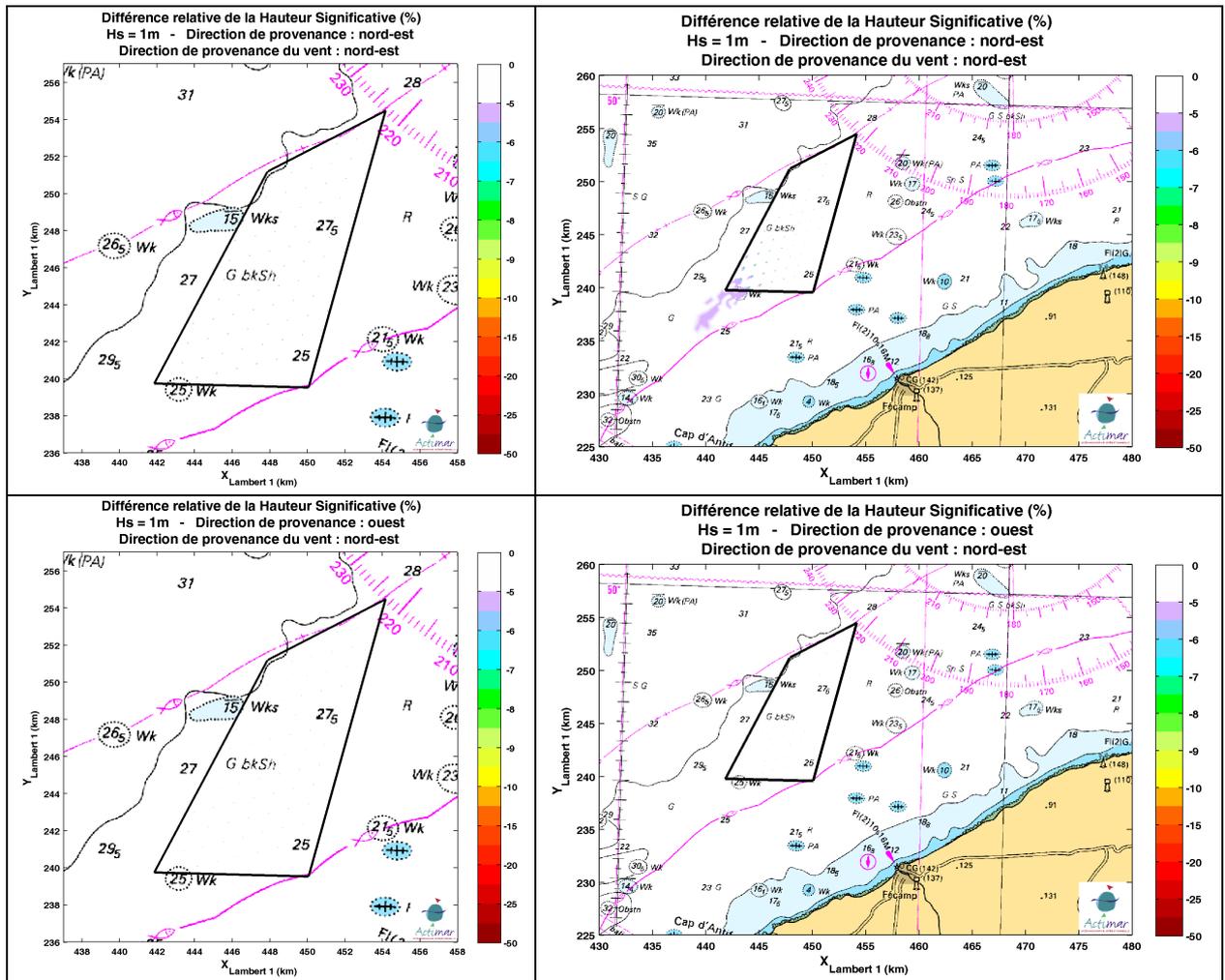


Figure 4-7 : Ecart relatif sur la hauteur significative (Hs) pour deux conditions types. Prise en compte des effets de masque des fondations (gauche) et des effets combinés du sillage des turbines (droite).

5 - IMPACT SEDIMENTAIRE

5.1 MODELISATION NUMERIQUE SEDIMENTAIRE

5.1.1 Présentation de la modélisation sédimentaire

5.1.1.1 Le code Sisyphé

Le code de transport sédimentaire et de morphodynamique SISYPHE est développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de EDF. Il s'agit de l'un des codes de calcul du système TELEMAC, un ensemble de logiciels aux éléments finis particulièrement adaptés aux écoulements à surface libre, pour une meilleure représentation de la morphologie des côtes et des géométries complexes (zones portuaires, ouvrages de protection, structures,...) ainsi qu'un allègement des temps de calculs. De plus, faisant partie du même système de modélisation, les pré-processeurs et les post-processeurs ainsi que les systèmes de fichiers sont identiques, ce qui permet des chaînages de calculs simplifiés.

SISYPHE résout les équations de transport des sédiments cohésifs (vases, limons, fines,...) et non cohésifs (sables, graviers) ainsi que des substances dissoutes (rejet d'émissaire, pollution accidentelle,...) sous l'effet combiné de la houle et des courants.

Lorsque le flux de sédiments transportés ne dépend que des caractéristiques locales de l'écoulement, le transport à l'équilibre par charriage sur le fond et par suspension dans la colonne d'eau sont pris en compte simultanément. Lorsque ces conditions de transport à l'équilibre ne sont plus remplies (variations brusque de la bathymétrie et/ou de l'écoulement, sédiments cohésifs,...), la résolution additionnelle des processus d'advection/diffusion permet de représenter le retard de concentration lié aux faibles vitesses de chute des sédiments.

Le dépôt des sédiments sur le fond, la consolidation de ces dépôts et leur remise en suspension par érosion sont représentés. A l'interface eau/sédiment, un bilan des flux sédimentaires permet d'évaluer les évolutions des fonds (équation d'Exner). Les zones non érodables (roches, ouvrages,...) peuvent être incluses dans la simulation.

L'hétérogénéité sédimentaire d'une zone peut être représentée par une approche multi-classes de la granulométrie des sédiments.

Les principaux processus physiques modélisés sont :

- Transport total par charriage et suspension (plusieurs formulations),
- Advection/Diffusion des sédiments fins,
- Erosion/Dépôt,
- Evolution des fonds,

- Effet de pente,
- Rugosité de fond (grain, forme),
- Tassement des couches de fond sédimentaires,
- Effet de masquage en présence de plusieurs classes granulométriques.

SISYPHE utilise les calculs hydrodynamiques réalisés au préalable par TELEMAC-2D ou 3D pour les courants et par TOMAWAC pour la houle. Un mode de couplage interne est également disponible lorsque les évolutions des fonds influent de manière significative sur l'écoulement : les différents modules s'échangent alors directement les informations nécessaires et réactualisent l'écoulement au cours du temps. Les interactions houle/courants peuvent être prises en compte par l'intermédiaire des tensions de radiation (ou forces motrices).

Les principaux résultats obtenus sont l'évolution des fonds et les composantes vectorielles du débit solide. Dans le cas d'une approche multi classes, les variations des différentes proportions sédimentaires est également un résultat de calcul.

5.1.1.2 Dynamique des sédiments sableux

Les comportements des sédiments non cohésifs – de type sables – et des sédiments cohésifs – de type vase - sont fondamentalement différents : les sédiments non cohésifs chargent rapidement l'écoulement et ont de plus une vitesse de chute relativement importante, si bien que les conditions de transport sédimentaire ne dépendent généralement – en première approche - que des conditions locales de l'écoulement (hypothèse de transport saturé) ; ils ne sont pas affectés par les phénomènes de floculation, tassement, cohésion qui caractérisent les sédiments cohésifs. En conséquence, l'approche numérique utilisée par SISYPHE permet la simulation des mouvements de sable par charriage et suspension des sédiments non cohésifs sur le fond. Elle utilise l'écoulement barotrope calculé par TELEMAC-3D et peut également prendre en compte les contraintes dues à la houle, calculées par TOMAWAC.

Prise en compte de la houle

Les sables sont entraînés par l'action combinée de la houle et des courants (essentiellement courants de marée).

De manière générale, l'action de la houle s'effectue de trois manières complémentaires :

- ➡ action directe des vitesses orbitales de la houle sur le fond, qui provoque des mouvements oscillatoires des sédiments selon la direction de propagation de la houle ; c'est notamment ce mode de transport qui est responsable des évolutions saisonnières de profil de plage ;
- ➡ génération du courant littoral, engendré lors du déferlement des houles arrivant en oblique sur le rivage ; ce courant littoral provoque un transport de sédiment dénommé transport littoral ;
- ➡ amplification de la capacité de transport lié au courant, par renforcement à la fois de la contrainte sur le fond et de la turbulence dans la colonne d'eau.

Pour le premier mode d'action (transport dans le profil), la modélisation numérique n'est pas encore véritablement opérationnelle, sur le plan quantitatif, pour des applications pratiques complexes. Ce mode d'action n'est donc pas pris en compte par la modélisation – ce qui est légitime dans la mesure où les secteurs où ce mécanisme devient dominant sont très éloignés des ouvrages.

Le second mode d'action (transport littoral) nécessite, en mer à marée, de très gros efforts de calcul (la zone de déferlement, qui migre constamment au cours de la marée, doit être discrétisée très finement) ; d'autre part, bon nombre de processus impliqués dans ce transport sont encore mal connus et mal reproduits (hydrodynamique dans le déferlement, génération et transport des quantités turbulentes, filtrage des processus à très court terme, à l'échelle de temps des variations dans la houle, ..). Dans la mesure où ce mode est assez similaire au troisième (renforcement de l'action des courants), il apparaît préférable de ne simuler que ce troisième mode – le plus important dans le secteur des éoliennes.

Pour simuler cette action, les variations des conditions de houle au cours de la marée, dues aux variations du plan d'eau, doivent être prises en compte : ceci a été réalisé en procédant à des simulations de propagation de la houle intégrant les évolutions spatiales de la hauteur d'eau et du courant calculées avec TELEMAC-3D.

5.1.1.3 Transport solide

La formulation du transport solide utilisée est celle de Bijker (1968, **Réf. 6**). Elle se base sur des concepts théoriques classiques (Frijlink (1952), formulation par courant constant, **Réf. 20**) plutôt que sur des ajustements empiriques pour estimer le taux de transport des sédiments. L'effet des vagues y est introduit, ainsi que la possibilité de calculer le transport par charriage et par suspension de manière séparée.

En courant seul, la contrainte sur le fond s'exprime de la manière suivante :

$$\tau_c = \frac{1}{2} \rho C_D \bar{U}^2$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau, C_D le coefficient de frottement quadratique et U le courant moyen sur la verticale.

Les vagues apportent leur contribution au transport des sédiments par la prise en compte des vitesses orbitales (pour des vagues supposées sinusoïdales selon la théorie d'Airy).

En houle seule, la contrainte sur le fond est exprimée par :

$$\tau_w = \frac{1}{2} \rho f_w U_w^2$$

Où f_w est un coefficient de frottement pour les vagues et U_w est la vitesse orbitale, dépendant des paramètres d'état de mer utilisés.

Dans le cas d'un courant et d'une houle combinés, Bijker exprime la contrainte totale sur le fond par :

$$\tau_{cw} = \tau_c + \frac{1}{2} \tau_w$$

La prise en compte de la houle a pour effet d'intensifier la contrainte sur le fond et par conséquent, le taux transport de sédiment augmente.

On introduit alors la contrainte adimensionnelle ou paramètre de Shields : $\theta = \frac{\tau_{cw}}{(\rho_s - \rho)gD_{50}}$

Où ρ_s et D_{50} sont respectivement la masse volumique et le diamètre moyen du sédiment.

La relation semi empirique proposée par Van Rijn (1993, **Réf. 57**) permet de calculer le paramètre de Shields critique θ_{cr} , définissant la limite d'entraînement du sédiment. Dans le cas présent, les deux types de sédiments de 10 mm et de 1 mm (cf. § 5.1.2.1) correspondent respectivement à des paramètres de Shields critiques de 0,055 et 0,033, utilisés pour la modélisation.

Le taux de transport par charriage Q_b est obtenu comme le produit de deux termes : l'un représentant la contribution du courant θ_c ; et l'autre, celle de la houle θ_{cw} .

$$Q_b = b\theta_c^{0.5} \exp(-0.27(\mu\theta_{cw}))$$

Où b est un coefficient empirique compris entre 2 et 5 et μ un facteur de correction.

Par intégration sur la verticale et en supposant un profil de Rouse pour la concentration et un profil logarithmique pour la vitesse moyenne, le taux de transport par suspension Q_s peut être exprimé comme proportionnel au transport par charriage Q_b , le facteur de proportionnalité étant l'intégrale dite d'Einstein. Le transport total Q_t est la somme du transport par charriage Q_b et par suspension Q_s .

Etant données les deux classes granulométriques considérées pour ces simulations (1 et 10 mm), un facteur d'entravement, calculé d'après Karim, Holly & Yang (**Réf. 32**), est utilisé pour moduler les quantités de transport de façon à tenir compte du masquage des éléments plus fins (1 mm) par les éléments grossiers (10 mm).

L'évolution des fonds s'obtient alors en considérant la conservation de la masse du sédiment :

$$(1 - p) \frac{\partial Z_f}{\partial t} + Div(\vec{Q}_t) = 0$$

Où p est la porosité du sédiment et Z_f la côte du fond.

5.1.1.4 Paramètres numériques

Les valeurs des paramètres de calcul utilisés sont les suivants :

- porosité des dépôts : 40 %,
- masse volumique de l'eau : 1025 kg/m³,
- masse volumique du sable et du gravier : 2650 kg/m³,
- coefficient de frottement sur le fond identique à celui utilisé pour les simulations hydrodynamiques,
- utilisation des bancs découvrants.

5.1.2 Méthodologie de modélisation

5.1.2.1 Répartition granulométrique

Sur l'ensemble de la zone du projet, les prélèvements réalisés par le GEMEL (2011, **Réf. 23**) indiquent que le diamètre médian des sédiments de la zone varie entre 5 et 15 mm, pour un diamètre médian moyen d'environ 9 mm. Les sédiments fins sont en proportion négligeable et correspondent à une fraction de sédiment masquée par des éléments plus grossiers. Seules deux catégories peuvent être considérées : graviers et graviers ensablés.

Le modèle étant capable de prendre en compte plusieurs classes granulométriques, nous avons réalisé des simulations initialisées avec deux classes granulométriques distinctes : 10 mm représentant 75 % de la fraction totale et 1 mm comptant pour 25 % de la proportion totale. Cette répartition est représentative des analyses granulométriques réalisées sur le site.

5.1.2.2 Epaisseur de la couche superficielle et protection anti-affouillement

D'après la campagne de mesures réalisée dans le secteur du parc éolien par ID SCOPE MONACO en 2011 (cf. Figure 2-5, **Réf. 29**), la cartographie de la couche meuble de sédiments a été établie. Les données ponctuelles associées ont été utilisées pour fournir un état initial d'épaisseur sédimentaire pour la modélisation numérique, par interpolation des données sur le maillage de calcul (cf. Figure 5-1). En dehors de la zone d'étude, l'épaisseur est arbitrairement supposée constante et égale à 2,5 m.

Pour tenir compte des protections anti-affouillements (donnée de l'étude), dont l'utilisation est envisagée pour prévenir les risques d'érosion à l'embase des fondations, une zone d'épaisseur sédimentaire nulle est appliquée autour de chacune des 83 fondations. Il s'agit d'une couronne qui s'étend sur 20 m au-delà de l'embase. La procédure de fond non érodable disponible dans le code Sisyphe a également été activée pour ces zones du maillage ; elle consiste à minimiser le débit solide et donc à annuler l'érosion résultante.

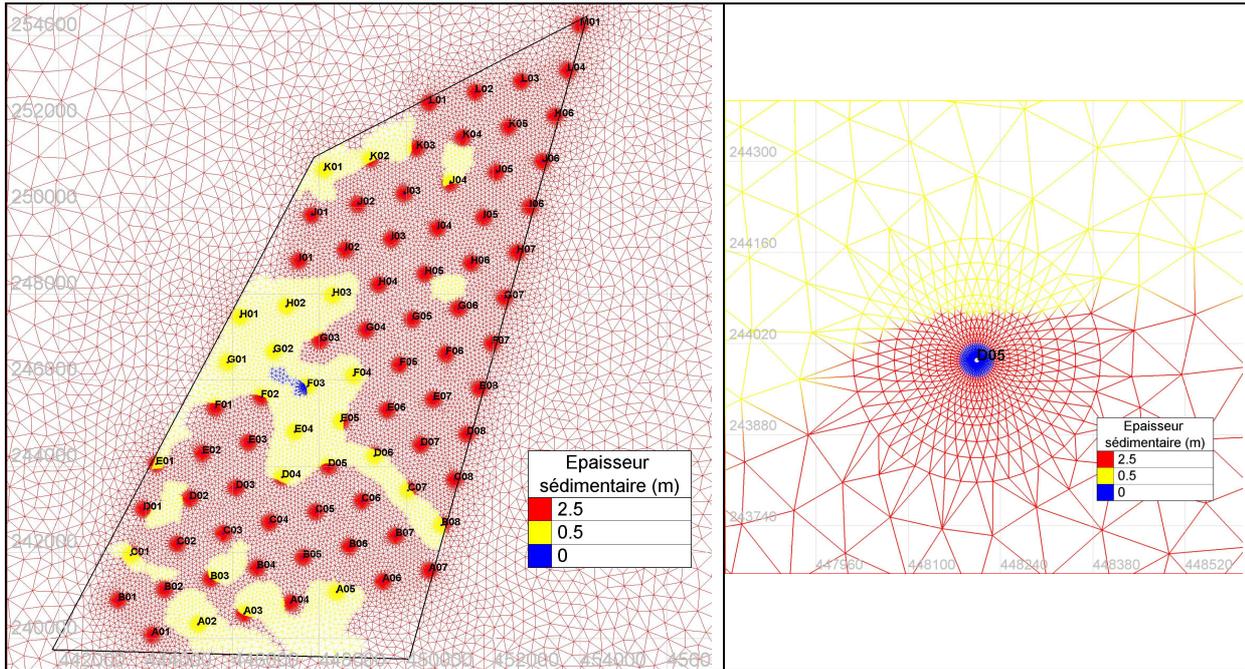


Figure 5-1 : Epaisseur sédimentaire initiale (en mètre) pour la modélisation numérique (Données ID SCOPE MONACO 2011, Réf. 29), dans la zone du parc (à gauche) et autour de la fondation D05 (à droite) avec une épaisseur nulle pour schématiser la protection anti-affouillement.

5.1.2.3 Schématisation du cycle annuel des conditions hydrodynamiques

Deux facteurs importants sur la dynamique sédimentaire : les conditions de marée et l'état de mer.

- Pour les conditions de marée, deux marées schématisées de morte-eau moyenne (C45) et de vive-eau moyenne (C95) sont retenues à proportion égale. On utilise pour cela les courants de marée barotropes et les hauteurs d'eau issues de la modélisation hydrodynamique (cf. paragraphe 3.2).
- En ce qui concerne les conditions d'agitation, les statistiques saisonnières du point ANEMOC 1778 ($0^{\circ}1,98'O - 50^{\circ}10,26'N$) ont été utilisées car il se situe à proximité des frontières du modèle. Cela conduit à considérer deux conditions moyennes d'agitation représentatives du climat de houle estival et hivernal. Il convient alors de retenir une hauteur significative caractéristique pour chacune des deux saisons. Pour ce faire, nous avons considéré que la relation entre transport solide et hauteur de houle n'est pas linéaire. D'après Soulsby (1997), la hauteur représentative de houle correspond à la moyenne d'ordre 3 de la hauteur significative s'il s'agit de transport par charriage uniquement, et d'ordre compris entre 3 et 5 s'il s'agit de transport total (charriage + suspension). Nous avons par conséquent retenu une moyenne d'ordre 4, ce qui donne une hauteur caractéristique de houle de 1,20 m en été et 2,15 m en hiver. D'après les distributions saisonnières conjointes H_s / T_p , nous avons associé à ces hauteurs la période pic la plus occurrente. On obtient donc une période pic de 6 s en été et de 8 s en hiver. Les deux conditions schématisées ainsi retenues résultent d'un compromis **conservatif** tenant compte à la fois des climats de houle et de mer du vent présents sur le site. La provenance retenue est celle correspondant aux provenances des houles les plus occurrentes au point étudié, c'est-à-dire la direction ouest ($N+270^{\circ}$).

Pour résumer les conditions d'agitation :

5 - Impact sédimentaire

- 6 mois : Hs = 1,2 m - Tp = 6 s - Dir = 270°
- 6 mois : Hs = 2,15 m - Tp = 8 s - Dir = 270°

Finalement, l'année est discrétisée de la façon suivante :

- 1 marée de morte-eau moyenne et d'agitation estivale ;
- 1 marée de vive-eau moyenne et d'agitation estivale ;
- 1 marée de morte-eau moyenne et d'agitation hivernale ;
- 1 marée de vive-eau moyenne et d'agitation hivernale.

Ce cycle de 4 marées est répété à l'identique sur une période de 30 ans.

5.1.3 Résultats des simulations

Si l'évaluation précise des évolutions naturelles des fonds est quasiment hors de portée de la modélisation numérique, il n'en va pas de même pour l'appréciation des impacts d'ouvrages qui résultent d'une rupture de l'équilibre dynamique entre l'hydrodynamique et la topographie des fonds. Cet impact est évalué par différences entre évolutions calculées dans l'état naturel et évolutions calculées en présence d'ouvrages, de telle sorte que toutes les erreurs et incertitudes communes aux deux simulations disparaissent, et que seule la part spécifique liée aux ouvrages demeure.

5.1.3.1 Modélisation sédimentaire en conditions naturelles

Les résultats des simulations sédimentaires réalisées dans les conditions naturelles peuvent difficilement être confrontés quantitativement à des évolutions réelles, résultant d'ajustements extrêmement subtiles entre écoulement et fonds marins. De plus, la précision des levés anciens ne permet pas d'accéder à une évaluation correcte et précise de ces évolutions naturelles (cf. paragraphe 2.4.2).

En revanche, les simulations réalisées en conditions naturelles servent de référence pour les simulations réalisées avec ouvrages.

La Figure 5-2 illustre le principe de la schématisation adoptée pour reproduire les variations des conditions naturelles de courant et d'agitation au cours des trente années, que nous avons décrit précédemment dans le paragraphe 5.1.2.3. On peut voir sur cette figure que les périodes de vive-eau apportent une contribution significative aux transports sédimentaires calculés et que le houle a pour effet de renforcer les flux sédimentaires modélisés.

La Figure 5-3 présente les champs de transport solide résultant, évalués sur l'ensemble des deux cycles de marée (ME et VE) pour les deux conditions d'agitation hivernale et estivale. Ces résultats correspondent à la capacité de transport de sédiment soumis à l'action des courants et de la houle combinés, en supposant qu'un sédiment sablo-graveleux composé à 75 % de matériau à 10 mm et de 25 % de matériau à 1 mm couvre les fonds de la baie de Seine. Ces cartes ont notamment pour intérêt d'illustrer le cheminement des sédiments, en décrivant la vigueur, la direction et le sens du transit (dominance du flot ou du jusant).

- Sur une marée de morte-eau, on constate que le transport résultant est dominé par la période de jusant, où les courants sont plus intenses que ceux de flot (cf. paragraphes 2.3.3 et 3.2.3). Leur intensité et leur orientation vers l'ouest-sud-ouest se répercutent de manière significative sur le transport des sédiments sableux. Cette analyse est à nuancer pour une marée de vive-eau moyenne, où l'agitation joue également un rôle important. On peut alors remarquer que pour des conditions d'agitation estivale, le transport sédimentaire est orienté vers le nord-est le long de la frange littorale tandis que plus au large, il s'oriente dans la direction opposée. L'intensité du transport solide s'avère très faible : dans les conditions les plus sévères, elle atteint tout au plus quelques $m^3/m/an$.

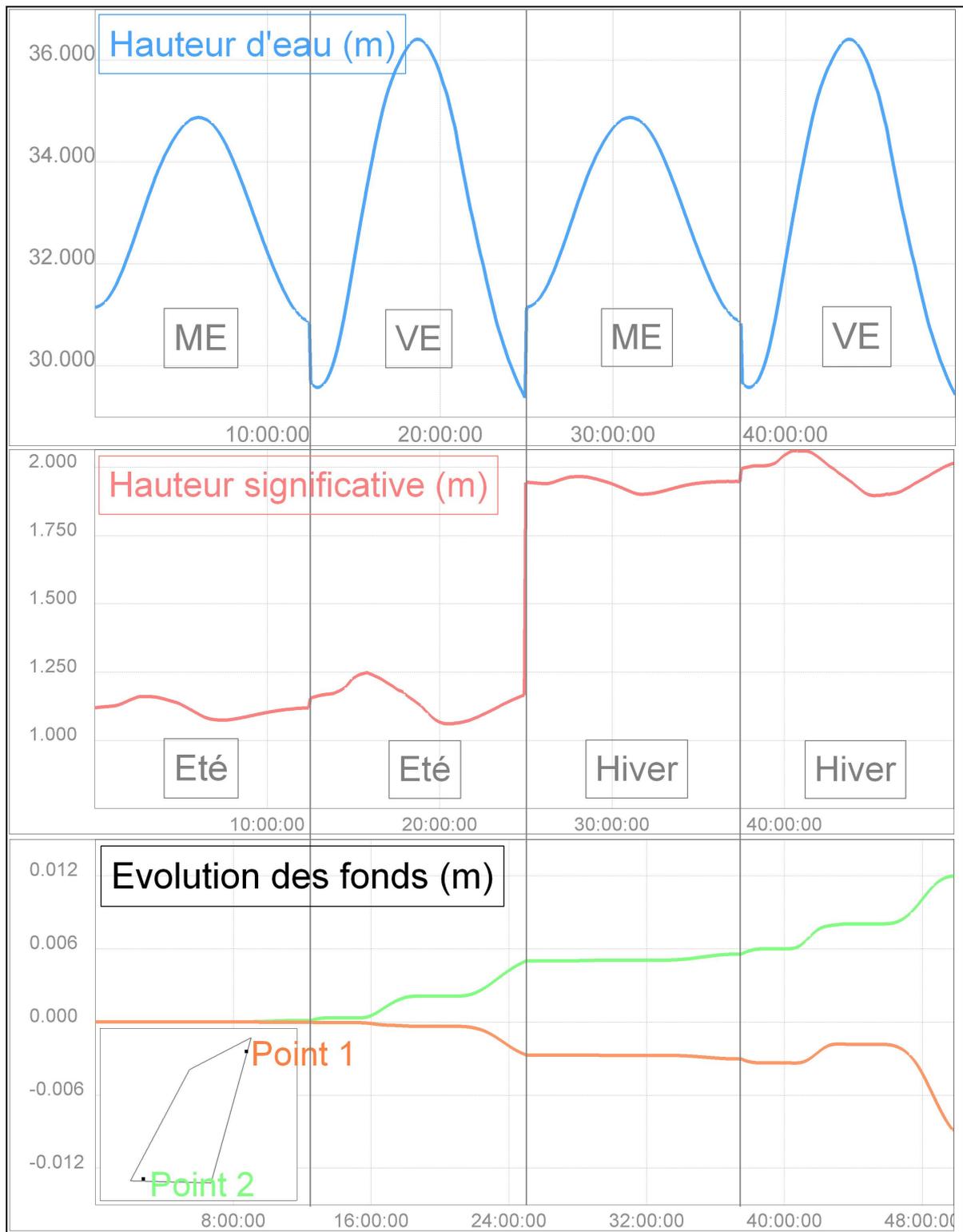


Figure 5-2 : Décomposition des conditions hydrodynamiques et d'agitation sur deux jours pour deux points situés dans la zone du parc éolien (Point 1 : érosion et Point 2 : sédimentation).

- Les secteurs où le transport potentiel est le plus intense se situent dans la frange littorale, aux abords du port de Fécamp, au niveau des roches d'Ailly, ainsi qu'au nord-ouest du parc éolien mais dans une moindre mesure. Ces zones correspondent d'ailleurs à des secteurs où les sédiments sableux ont été découpés, et où ne subsistent que des éléments bien plus grossiers, moins mobiles sous l'action des courants, voire des affleurements rocheux (de ce fait, l'évaluation du transport solide ne correspond pas à la réalité – le sédiment n'a pas la bonne dimension – mais le découpage des sables est tout à fait cohérent avec la très forte capacité de transport potentiel de sable que l'on y constate).

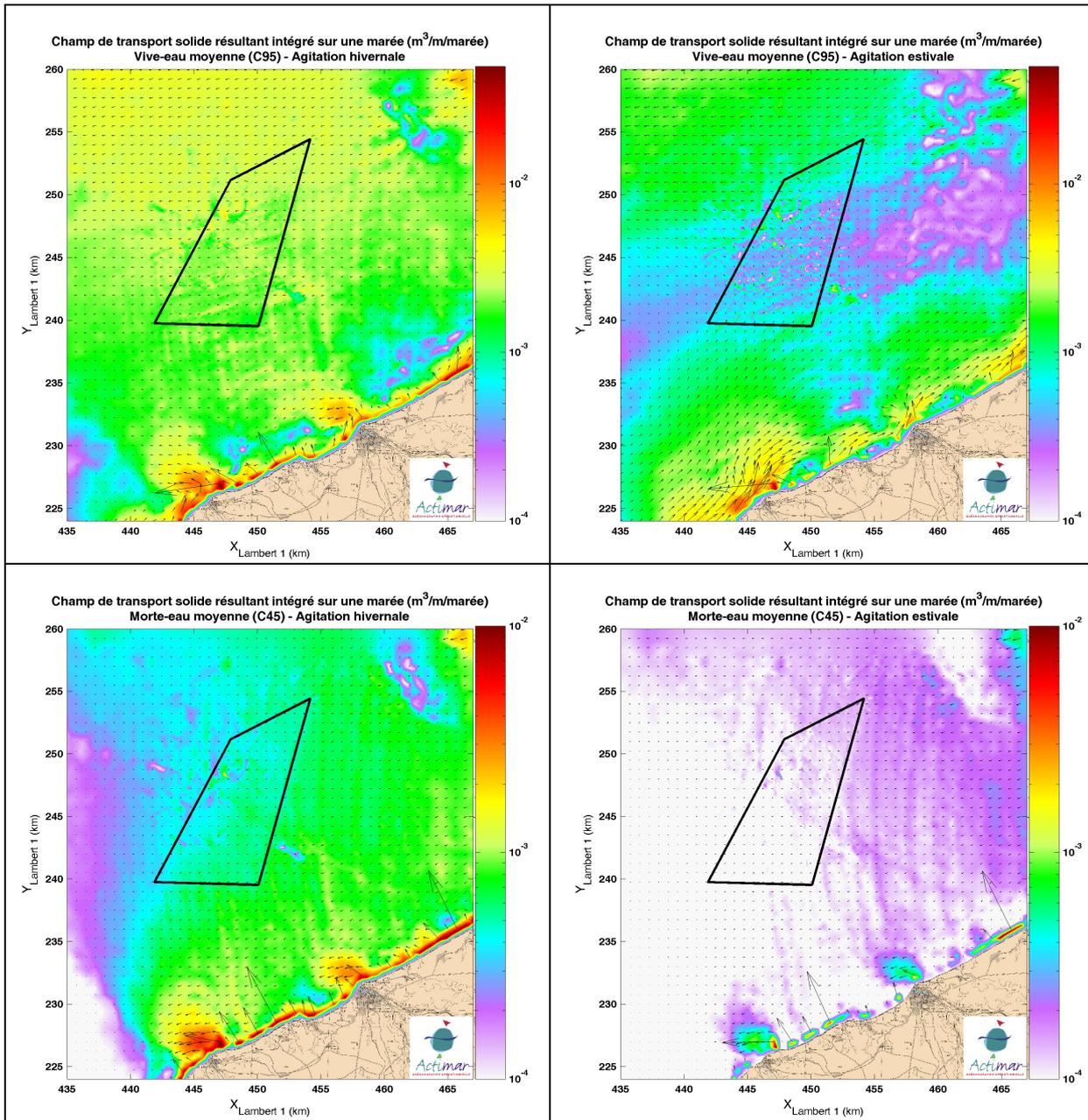


Figure 5-3 : Transport solide intégré sur une marée moyenne de vive-eau (en haut) et de morte-eau (en bas) dans l'état actuel (sans fondation), pour des conditions d'agitation estivale (à droite) et hivernale (à gauche).

5.1.3.2 Modélisation sédimentaire avec les fondations gravitaires

L'incidence des fondations gravitaires sur la dynamique sédimentaire est étudiée par modélisation numérique à plusieurs échelles spatiales :

- A l'échelle régionale, pour examiner l'incidence du parc éolien sur le littoral ;
- A l'échelle du parc éolien, pour évaluer les perturbations de la topographie des fonds marins autour des fondations ;
- A l'échelle des fondations pour analyser la dynamique des évolutions morphologiques et les risques d'affouillement aux pieds des embases.

Pour évaluer l'incidence des fondations sur les évolutions des fonds, on confronte les résultats des modélisations avec fondations à ceux obtenus en conditions naturelles (sans fondations). Pour cela, on établit la cartographie des écarts d'évolution des fonds. Les maillages correspondant aux différentes configurations du projet étant identiques en tout point extérieur aux fondations, on s'est affranchi d'éventuels biais ou effets de lissage pouvant résulter des interpolations entre les grilles de calcul.

5.1.3.2.1 Dynamique des évolutions

La Figure 5-4 illustre la dynamique des évolutions des fonds à la base de la fondation M01 (nord-est du parc) sur les trente années de simulation, et pour deux points situés à des endroits où le sédiment s'érode (point 1, en bleu) et où il se dépose (point 2, en rouge).

Les séries temporelles des évolutions et des proportions granulométriques atteignent un état de quasi-équilibre au bout d'environ 13 années de simulation. Deux raisons peuvent expliquer cet équilibre : l'épaisseur de la couche superficielle de sédiments qui peut être complètement érodée sur cette période, ou bien la proportion de l'une des deux classes granulométriques tombe à zéro. En effet, on constate qu'à cet instant, pour le point 1 où l'érosion domine, la proportion en sédiments grossiers (10 mm) atteint 100 % et donc celle des sédiments fins (1 mm) chute à 0 %. Cela signifie que la totalité des sédiments les plus fins a été entraînée et que les conditions hydrodynamiques locales ne sont pas suffisamment intenses pour mobiliser les sédiments grossiers restants : d'où un ralentissement de l'érosion et l'atteinte d'un état quasi-stationnaire. Au point 2, le comportement est différent ; les sédiments fins s'accumulent (leur proportion augmente) car le courant perd de sa vigueur dans le sillage de la fondation et les sédiments les plus fins peuvent se déposer.

La Figure 5-5 illustre les écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation, pour la fondation M01, et pour différents points situés à des endroits où le sédiment s'érode (points 1 et 2) et où il se dépose (points 3 et 4). On retrouve la même dynamique où un état quasi-stationnaire est atteint au bout d'environ 13 ans, excepté pour le point 3 où les dépôts continuent à augmenter. La différence d'érosion avec l'état naturel ne dépasse pas 100 cm et le dépôt à l'ouest de la fondation se stabilise autour de 60 cm. A l'est, les dépôts sont plus importants et peuvent localement, dépasser 1,5 m.

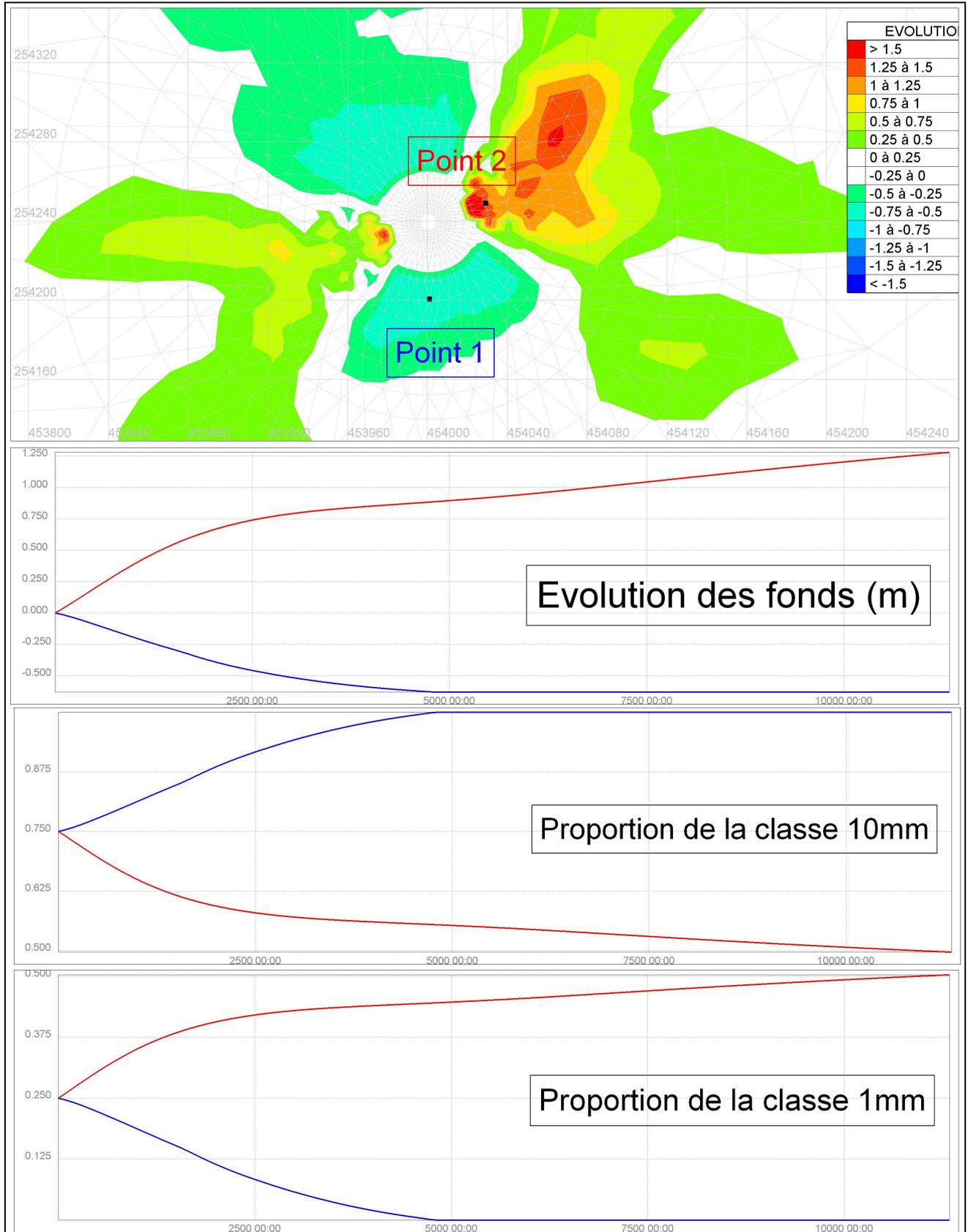


Figure 5-4 : Séries temporelles de l'évolution des fonds (en haut) et de la répartition entre les classes granulométriques 10 mm (au milieu) et 1 mm (en bas) pour deux points à proximité de la fondation M01 (nord-est). Point 1 en bleu (érosion) et point 2 en rouge (sédimentation).

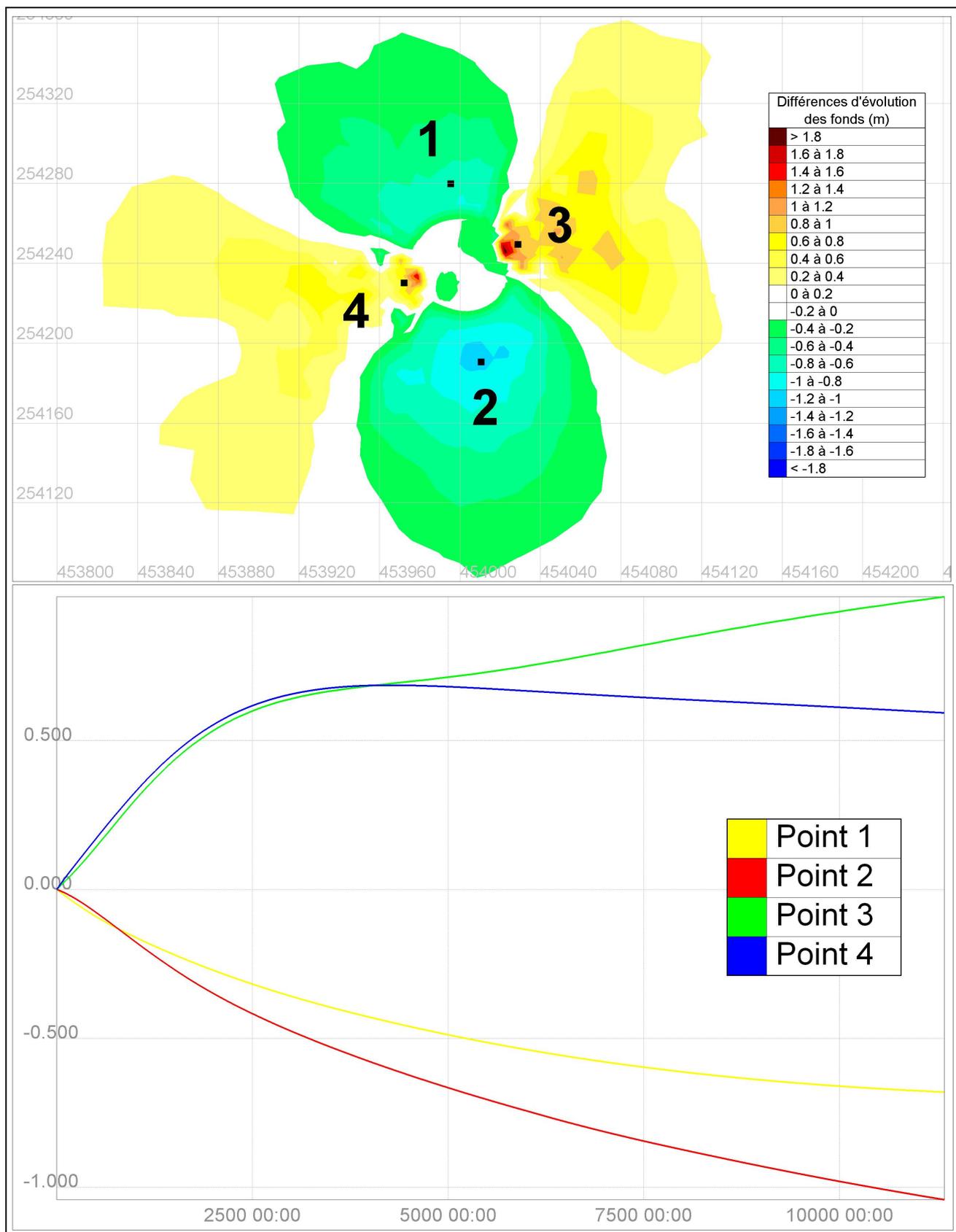


Figure 5-5 : Impacts locaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation, pour la fondation M01 (nord-est). Le cercle noir représente le haut de la fondation gravitaire.

5.1.3.2.2 Incidence à l'échelle régionale

La Figure 5-6 présente les écarts d'évolution des fonds induits par la présence des fondations gravitaires à l'échelle régionale, au bout de trente ans de simulation. Les écarts sont évalués en soustrayant les évolutions sans fondations, aux évolutions en présence de fondations. Cela signifie qu'un écart négatif correspond à un affouillement des fonds dû aux fondations. Réciproquement, un écart positif équivaut à une accrétion des fonds liée à ces fondations.

Pour mettre en avant les endroits où les fonds sont le plus fortement modifiés, les zones où les écarts sont inférieurs à 5 cm sont laissées blanches. Ce seuil correspond à une évolution moyenne de moins de 2 mm/an, ce qui – à l'échelle de la modélisation numérique – est une précision difficilement accessible. La Figure 5-6 montre que la présence des fondations ne modifie pas la morphologie des fonds à l'échelle régionale de plus de 5 cm par rapport aux évolutions naturelles. La présence des fondations gravitaires n'affecte donc l'évolution des fonds que très localement autour des fondations et ne perturbe donc pas l'évolution naturelle des fonds au-delà de la zone d'implantation du parc éolien.

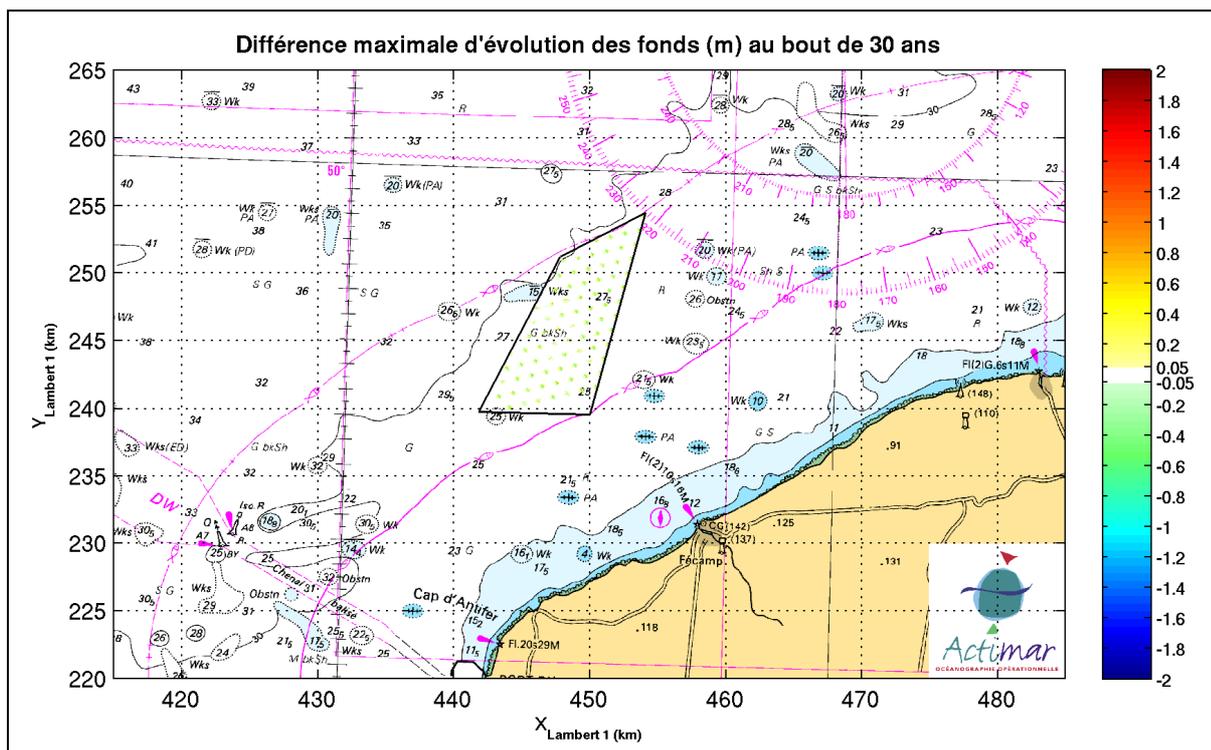


Figure 5-6 : Impacts régionaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation entre l'état naturel et le parc éolien (fondations gravitaires).

5.1.3.2.3 Incidence à l'échelle locale

La Figure 5-7 montre l'incidence des fondations d'éoliennes à l'échelle de la zone d'implantation. A cette échelle spatiale, les différences d'évolution simulées sont relativement homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude, étant donné l'homogénéité des conditions hydrodynamiques (houle et courant), la faible hétérogénéité provient en partie de la variabilité spatiale de l'épaisseur de la couche meuble de sédiments. Hormis à proximité immédiate des fondations, les différences d'évolution des fonds n'excèdent pas 50 cm. Le paragraphe suivant montre que ces différences peuvent être localement plus fortes, très localement, aux pieds des embases gravitaires.

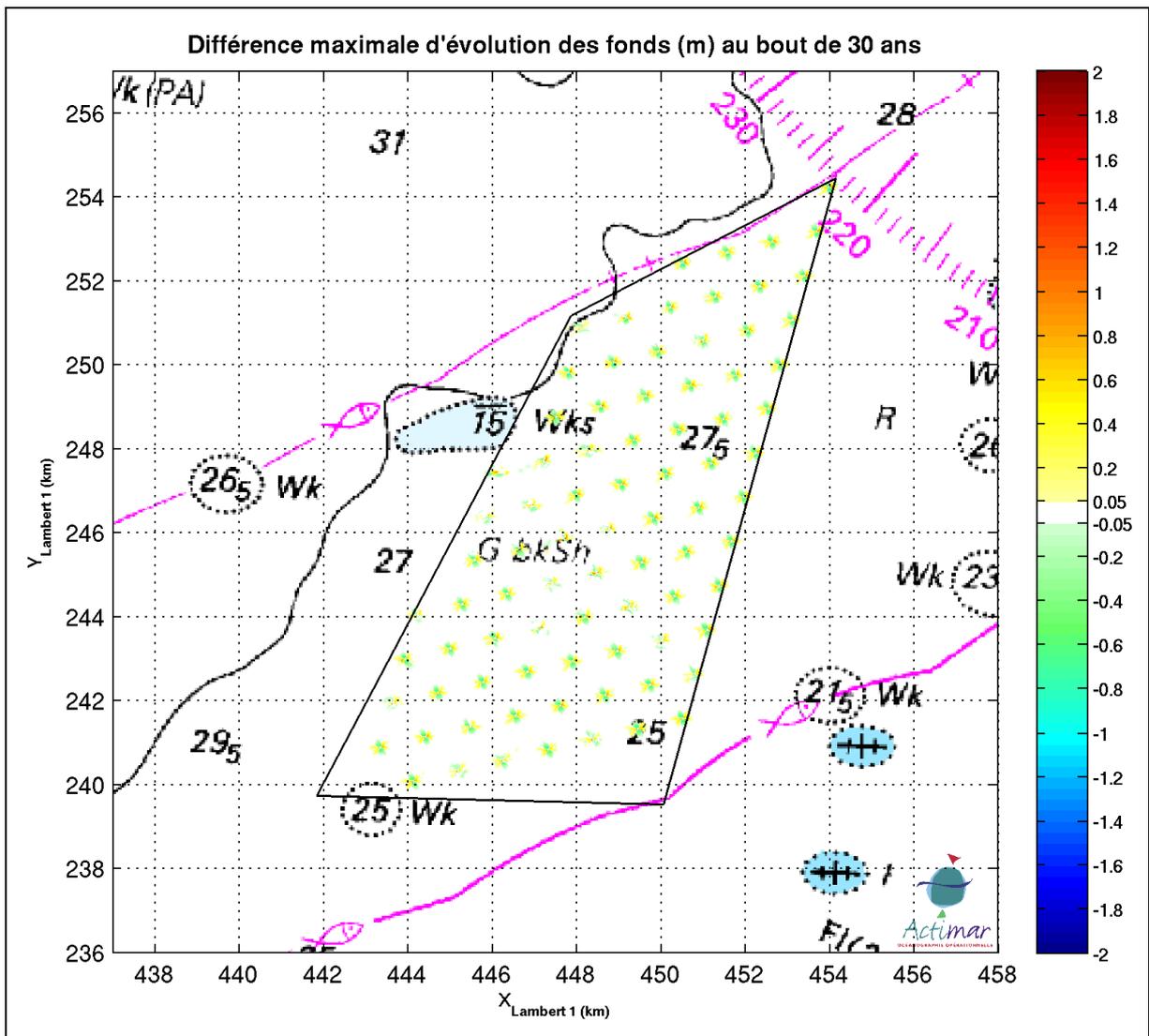


Figure 5-7 : Impacts locaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation entre l'état naturel et le parc éolien (fondations gravitaires).

5.1.3.2.4 Incidence au niveau des fondations

Dans la zone d'implantation des éoliennes, le transport sédimentaire est fortement influencé par le courant ; la houle devenant prépondérante lorsque l'on s'approche du littoral et que les profondeurs diminuent. Le courant y est orienté vers l'est-nord-est pendant le flot et vers l'ouest-sud-ouest pendant le jusant.

Lors de l'étude d'impact hydrodynamique (cf. paragraphe 3.3), il a été montré que la présence des fondations avait pour conséquence de ralentir l'intensité du courant en aval des fondations, c'est-à-dire à l'est-nord-est pendant le flot et à l'ouest-sud-ouest pendant le jusant. Le ralentissement de l'écoulement entraîne un dépôt de sédiments. La Figure 5-8 présente les différences d'évolutions des fonds obtenues au bout de 30 ans de simulation, pour les parties sud-ouest et nord est du parc. Ainsi, on constate que les écarts d'évolution sont similaires dans ces deux zones.

Les dépôts se forment aux endroits où l'écoulement ralentit, c'est-à-dire dans le sillage de flot et de jusant de chaque fondation. De la même manière, l'écoulement s'accélère latéralement, de chaque côté de la fondation ; et les fonds s'affouillent à ces endroits.

L'asymétrie entre le courant de flot et celui de jusant provoque une répartition légèrement différente des dépôts à l'est et à l'ouest de la fondation, ce qui est visible principalement sur les fondations situées au nord-est du parc (Figure 5-8, en haut), où les dépôts sont plus importants à l'est des fondations, dépassant localement 1,5 m.

Un dépôt de sédiment supérieur à 5 centimètres est présent sur environ 200 à 300 mètres à l'est et à l'ouest des fondations. La zone d'érosion supérieure à 5 centimètres a une emprise similaire, voisine de 250 mètres de part et d'autre de la direction principale de l'écoulement (au nord et au sud des fondations).

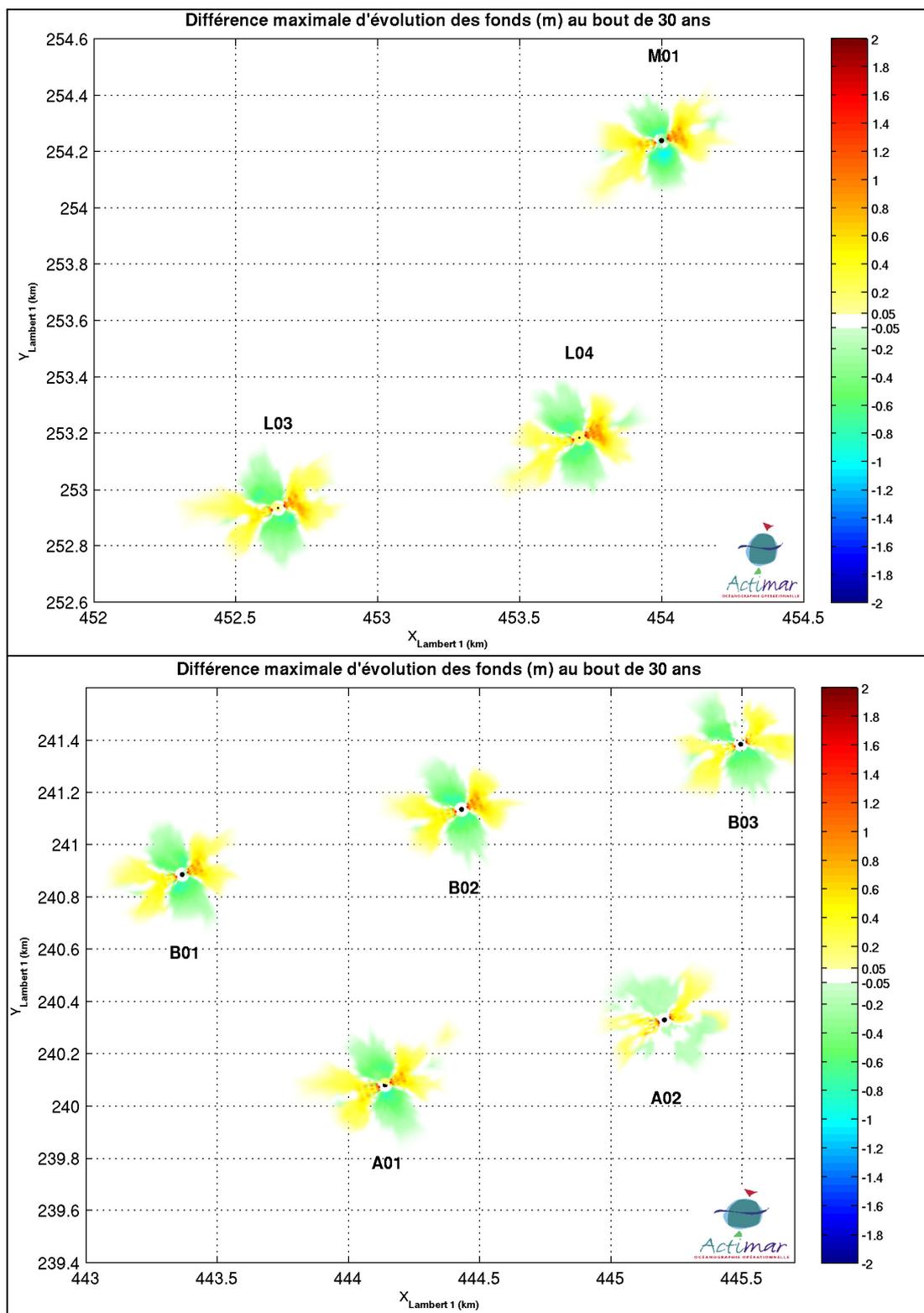


Figure 5-8 : Impacts locaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation entre l'état naturel et le parc éolien (fondations gravitaires), pour la partie sud ouest du parc (en bas) et nord est (en haut).

5.1.4 Discussion et synthèse

La modélisation mise en œuvre ici est affectée d'une limitation au niveau de la représentation des phénomènes locaux autour des fondations : en particulier, tous les aspects tridimensionnels de l'écoulement (cf. § 5.3.2) ne peuvent être pris en compte.

Il convient donc de ne pas considérer comme quantitativement exactes les estimations d'évolution maximale au voisinage des fondations, mais plutôt de retenir les résultats suivants :

- les fondations n'ont pas d'effet sur les fonds hors de l'emprise du champ d'éoliennes ;
- à l'intérieur du champ d'éoliennes, il n'y a pas d'interaction entre les impacts sédimentaires des différentes fondations pour des niveaux significatifs d'évolution.

5.2 ANALYSE DE LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE ET PERSPECTIVES D'EVOLUTION ULTERIEURE

5.2.1 La dynamique des sables littoraux

L'historique de l'évolution de l'ensablement de l'estran, bien que s'appuyant sur des clichés et inspection d'estran plutôt espacés en temps, fournit une base d'information très intéressante lorsqu'on la croise avec l'historique des aménagements/interventions et avec la description des mécanismes sédimentaires. La Figure 5-9 est présentée en support à la tentative de description de ces mécanismes, décrite ci-après.

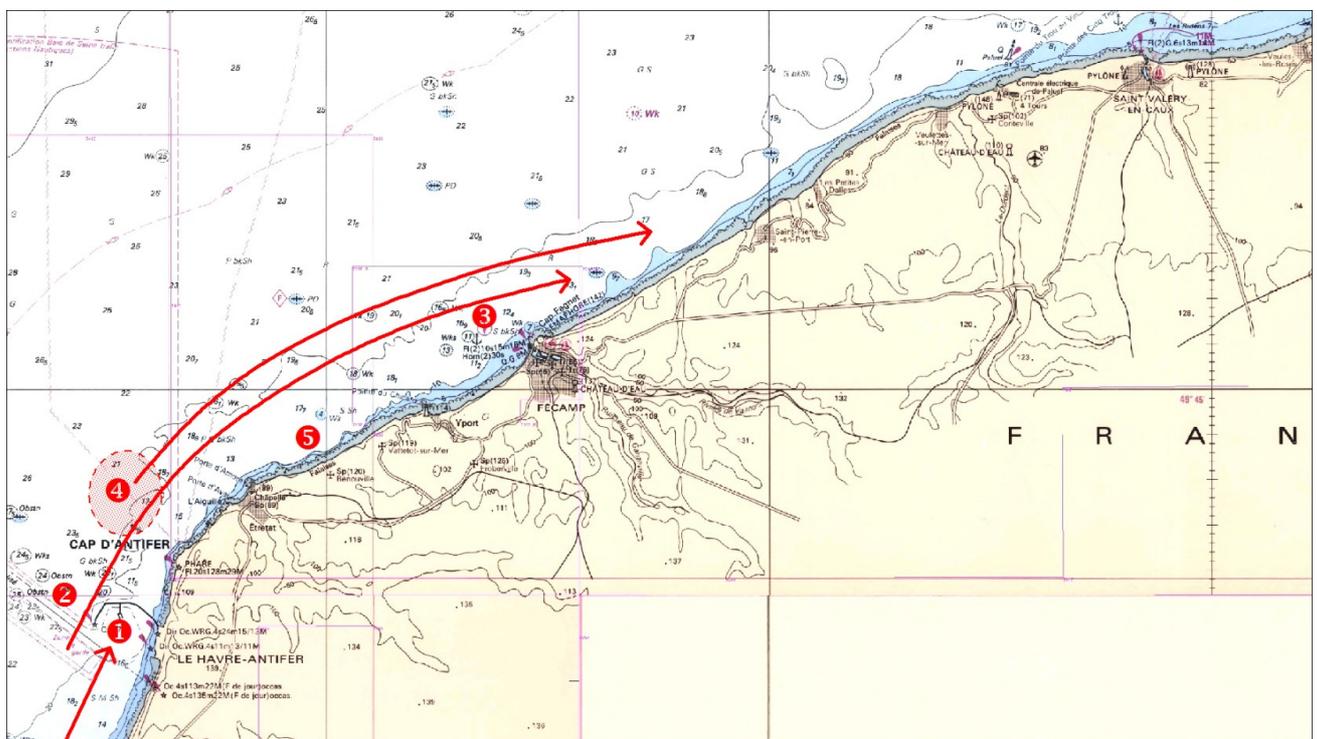


Figure 5-9 : Schéma support de l'analyse des mécanismes expliquant l'évolution de l'ensablement du littoral entre le cap d'Antifer et Saint-Valéry-en-Caux.

Du cap d'Antifer à Yport, l'ensablement de l'estran s'est progressivement réduit malgré l'essor des sources sédimentaires. L'effet physique de la digue d'Antifer en est vraisemblablement la cause : les sables migrant vers le nord-est sous l'effet dominant des courants de flot sont captés par le port pour ceux qui cheminent à petite distance de la côte (Figure 5-9, 1) ; seuls les sables cheminant plus au large peuvent passer l'obstacle (Figure 5-9, 2). Sous l'effet de la houle, ces sédiments se rapprochent éventuellement de la côte, mais selon une trajectoire très peu inclinée par rapport à l'axe des courants (Figure 5-9, 3), d'autant :

- que les fonds sont assez profonds (plus de 20 m au musoir de la digue d'Antifer) – ce qui réduit l'action de la houle,
- et que ces fonds sont relativement pentus – plus que dans le secteur de Dieppe -, la pente contrariant, par gravité, le mouvement des sédiments vers la côte.

Cette tendance des sédiments fins à se rapprocher graduellement de la côte sous l'effet complémentaire de la houle est attestée par la forme du ruban vaseux qui s'étend du point de dépôts d'Octeville, au sud du port d'Antifer (Figure 5-10).

Il en va de même pour les sédiments clapés au large dans le cadre de la construction du port d'Antifer : ils migrent vers l'est et en partie vers la côte, selon une trajectoire qui ne leur permet pas d'atteindre le littoral avant Yport (Figure 5-9, 4).

De Fécamp à Saint-Valéry-en-Caux, les sables en provenance de l'ouest – qu'ils aient passé la digue d'Antifer ou qu'ils soient issus du clapage des sédiments dragués à Antifer – ont pu en partie revenir vers le littoral. Il est possible que l'ensablement maximal constaté en 1995 soit lié au passage d'un stock de sédiments issu du dragage du port d'Antifer (une vingtaine d'années après). La forte décroissance observée ensuite serait alors due à la fois :

- au fait que le « wagon sédimentaire » lié aux sédiments les plus mobiles venant du clapage d'Antifer ait dépassé ce secteur,
- mais également à l'épuisement du stock de sable pré-existant dans les petits fonds devant le secteur cap d'Antifer-Yport (Figure 5-9, 5), du fait du barrage du port d'Antifer. Ce secteur constitue en effet une source essentielle d'ensablement pour le littoral du secteur suivant

Le secteur compris entre Veules-les Roses et le cap d'Ailly est celui qui présente la plus grande surface ensablée, malgré un linéaire plutôt peu étendu. Cette particularité est en partie liée à la forme concave du trait de côte.

L'ensablement baisse très progressivement jusqu'en 1995, potentiellement sous l'effet de l'appauvrissement en sable des petits fonds situés en amont. L'ensablement maximal est observé en 1999, juste après celui observé sur le secteur situé à l'ouest immédiat ; l'ensablement baisse ensuite : ce comportement est en cohérence avec l'hypothèse de la migration progressive vers l'est d'un « wagon sédimentaire », provenant éventuellement de la partie la plus mobile des sédiments rejetés au large lors du dragage du port d'Antifer.

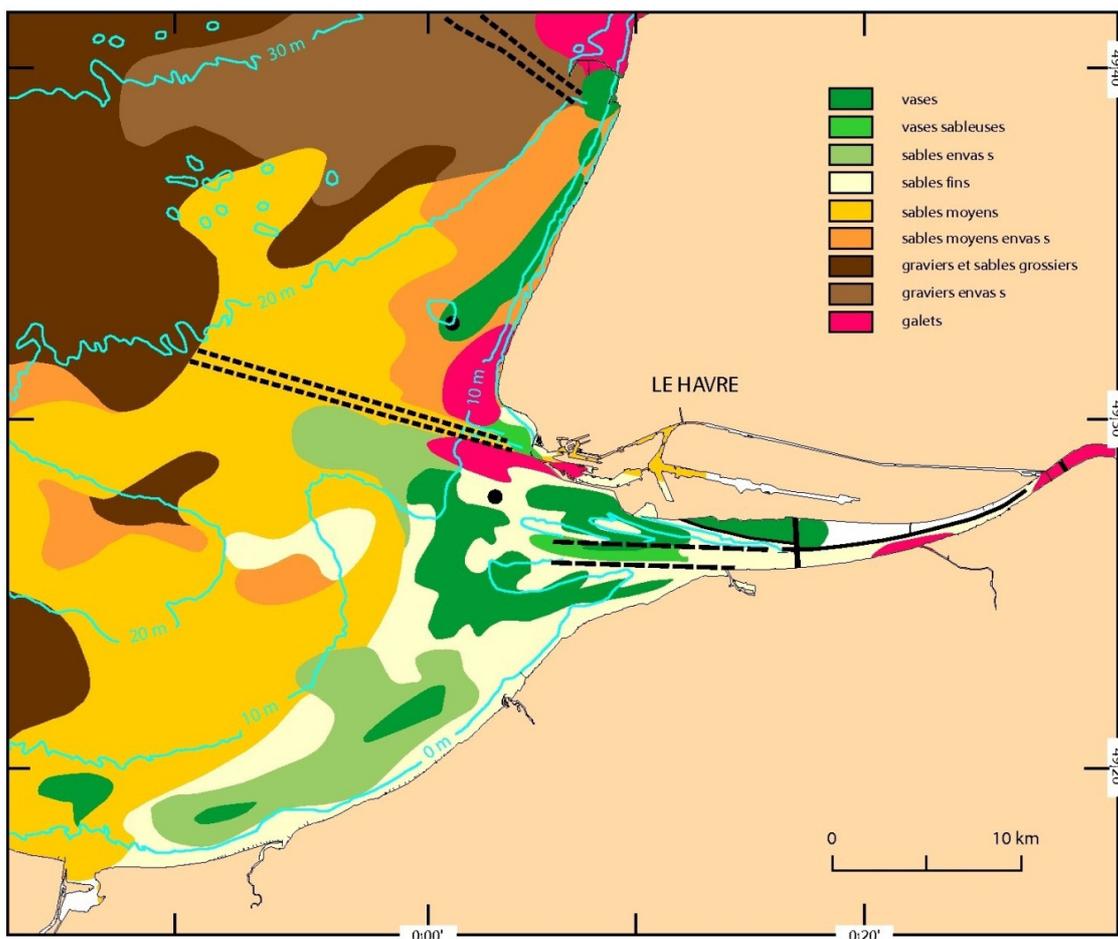


Figure 5-10 : Carte des sédiments superficiels de la baie de Seine orientale (d'après Lesueur et al., 1999, Réf. 36).

5.2.2 Dynamique sédimentaire au large

Les courants au large de la côte de la Seine-Maritime portent vers le nord-nord-est au sud du cap d'Antifer, puis vers l'est-nord-est à l'est du cap, avec une intensité des courants de marée qui se renforce progressivement depuis Le Havre jusqu'au large du secteur Fécamp – Saint-Valéry-en-Caux, pour décroître ensuite vers l'est.

Selon Guerrero (2008, Réf. 26), sous l'effet de l'aménagement de l'estuaire de la Seine, les bancs d'embouchure auraient été repoussés jusqu'à un secteur à plus forte hydrodynamique, où les sables qui y sont amenés peuvent alors être mobilisés et transportés vers le nord-est par des courants de flot plus importants.

Dans le secteur du projet, les fonds marins sont « lessivés » par des courants intenses qui ne laissent subsister les apports sableux que dans des cuvettes, ou en placages éphémères et mobiles sur la couverture caillouteuse. Seuls demeurent pérennes les fonds de cailloutis, beaucoup moins facilement mobilisables.

La faible épaisseur de cette couche de cailloutis, la rémanence de chenaux et de fosses bien marqués, ainsi que l'aspect général de l'évolution des fonds entre 1975 et 2011 – malgré les artefacts qui l'affectent - conduisent à présumer l'absence de véritable mobilité de ces fonds grossiers.

5.3 INTERACTIONS ENTRE LE PROJET ET LES FONDS MARINS

5.3.1 Incidence à l'échelle régionale

5.3.1.1 Effet du courant

Les résultats de la simulation numérique hydrodynamique (cf. § 3.3.1) montrent que l'impact des fondations se réduit rapidement avec la distance à ces fondations. L'incidence sur les fonds n'est pas perceptible en dehors du champ d'éoliennes, que ce soit en pleine mer ou dans le secteur littoral. Ce constat est corroboré par les résultats de l'impact morphologique à l'échelle régionale (cf. § 5.1.3).

5.3.1.2 Effet de la houle

L'effet de la houle est surtout manifeste à proximité immédiate des fondations – dans la zone où une protection des fonds est envisagée. A plus grande distance, cet effet est moins sensible que celui dû aux courants, car la diffraction et l'étalement directionnel de la houle régularisent assez rapidement l'énergie de la houle le long des lignes de crête (moins d'effet de sillage).

A distance, en arrière du parc éolien, la réduction de hauteur induite par l'effet d'écran des fondations est au maximum de l'ordre de 5,3 % (cf. § 4.2.2.3). A la côte, l'effet est encore davantage réduit sous l'effet de l'étalement directionnel. Cette réduction y est en tout état de cause plus faible que les écarts liés aux variabilités interannuelles du climat de houle : elle n'aura donc pas d'incidence notable dans le domaine littoral.

5.3.2 Incidence à l'échelle locale

5.3.2.1 Mécanismes d'affouillement

La présence d'obstacles - telles les fondations des éoliennes - sur des fonds sédimentaires où se manifestent des transports de sédiments conduit à un affouillement local potentiellement important. Cette érosion est due à la fois :

- ➡ à l'accélération de l'écoulement à proximité de l'obstacle, du fait de la convergence des lignes de courant,
- ➡ et à l'accroissement de l'énergie turbulente de l'écoulement, due à la génération de tourbillons depuis la structure.

En régime d'écoulement permanent ou lentement variable (marée), l'obstacle à l'écoulement engendre un accroissement de pression sur sa face amont ; le gradient de pression produit un écoulement dirigé vers le bas, qui génère un premier tourbillon lorsqu'il atteint le fond (Whitehouse, 1998, **Réf. 58**) ; dans le cas d'un cylindre, ce tourbillon entoure l'obstacle et s'évanouit en donnant naissance à un second tourbillon, en forme de fer à cheval (cf. Figure 5-11). Ces deux tourbillons, en augmentant la contrainte de l'écoulement sur le fond, sont en grande partie responsables de l'affouillement autour de la base du cylindre.

Dans le cas de la houle, l'augmentation locale de cette contrainte est plus faible que dans le cas du courant, en raison :

- d'une couche limite moins épaisse,
- et du fait que le tourbillon en fer à cheval n'est pas toujours présent, en particulier lorsque le diamètre de la structure est important.

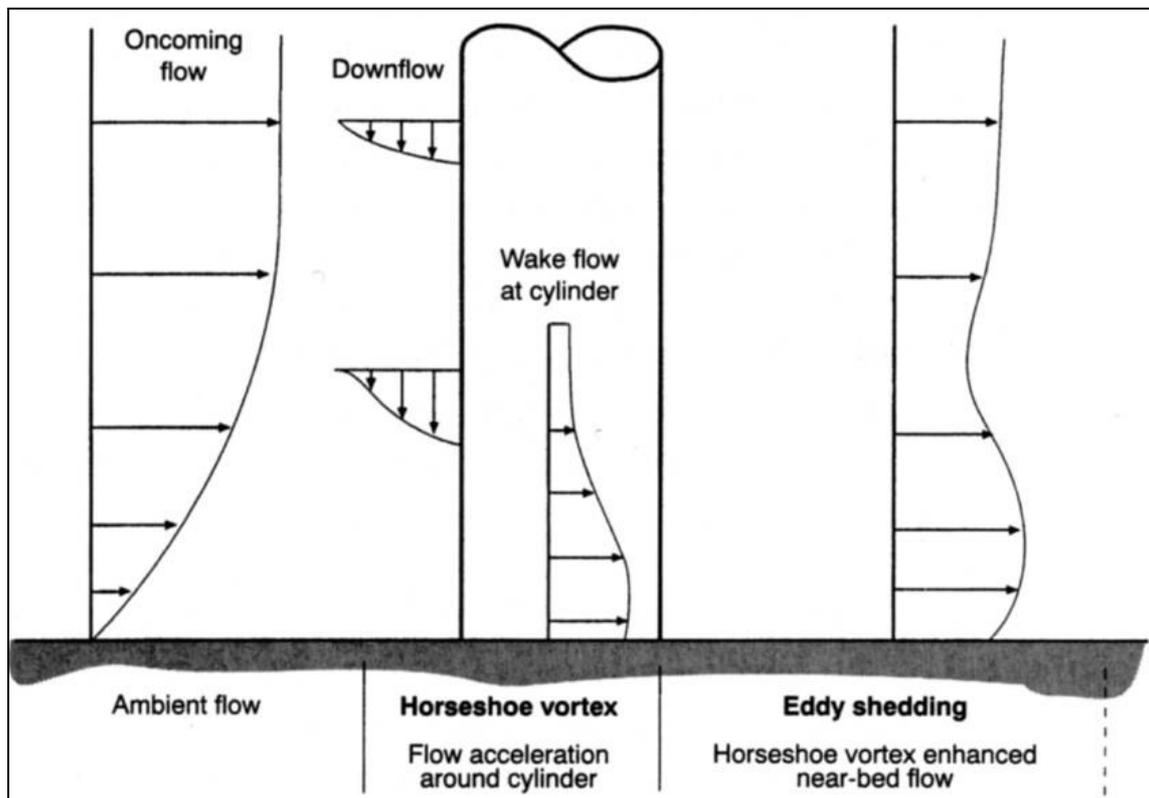


Figure 5-11 : Interactions entre écoulement et structure dans le cas d'un cylindre vertical, d'après Whitehouse, 1998, Réf. 58.

D'après Sumer et al. (1992, in Whitehouse, 1998, Réf. 58), ce tourbillon n'apparaît pas lorsque le nombre de Keulegan-Carpenter KC est inférieur à 6, i.e. :

$$KC = (U_w T_w)/D < 6$$

où U_w et T_w sont respectivement l'amplitude de la vitesse orbitale et la période de la houle, et D le diamètre de l'obstacle.

Un autre mécanisme apparaît lorsque l'obstacle est de dimension significative : la diffraction de la houle derrière cet obstacle. D'après Hoffmans *et al.* (1997, Réf. 28) et le Coastal Engineering Manual (USACE, 2003, Réf. 55), l'effet de la diffraction devient important quand le rapport D/L dépasse 0,1, L étant la longueur d'onde de la houle.

Ainsi les pieux étroits (« slender piles ») sont soumis aux décollements et tourbillons en fer à cheval, mais ne génèrent pas de diffraction en arrière, cependant que les pieux de grand diamètre (« large piles ») : $KC < 1$, selon Haddorp, 2005, Réf. 27) ne provoquent pas de décollement mais occasionnent le plus souvent la diffraction de la houle en arrière. Entre les deux, un régime intermédiaire ($1 < KC < 6$) est soumis à des tourbillons de sillage et éventuellement à de la diffraction derrière le pieu.

Si houle et courants coexistent, le tourbillon est périodiquement renforcé et affaibli par le mouvement oscillatoire de la houle lorsque la vitesse orbitale de celle-ci est bien inférieure à la vitesse du courant permanent ; dans le cas contraire, le tourbillon peut exister seulement sous une forme atténuée, voire ne pas exister du tout (Whitehouse, 1998, Réf. 58). Dans le cas présent, les deux situations se rencontrent, la première se manifestant plus particulièrement en vive eau, en phase de courant établi, en flot comme en jusant, lorsque la mer est peu agitée.

5.3.2.2 Caractéristiques de l'affouillement

Compte tenu du faible diamètre des supports d'éoliennes par rapport à la distance séparant les différentes structures, l'interaction entre les éoliennes sera inexistante en ce qui concerne les mécanismes d'affouillement liés à la génération de turbulence. Les caractéristiques de ces affouillements seront donc celles correspondant aux fondations prises isolément.

Dans le cas d'obstacles de grande dimension, telles les fondations gravitaires examinées ici, l'écoulement lié à la houle change de nature près du fond : un courant permanent (« steady streaming ») est généré du fait de l'interaction houle/obstacle, avec une vitesse pouvant atteindre 20 à 25 % de la vitesse orbitale maximale (Sumer *et al.*, 2002, Réf. 53).

Le rapport entre la profondeur maximale d'érosion et le diamètre de la fondation est bien plus faible que dans le cas de pieu étroit ; en houle seule (cas de la majorité des résultats expérimentaux), l'érosion maximale s'observe en périphérie de l'obstacle, à 45° par rapport à l'axe de l'écoulement (cf. Figure 5-12). La dépendance entre profondeur maximale d'érosion, nombre de Keulegan Carpenter et rapport D/L est donnée sur la Figure 5-13 : compte tenu de la valeur de KC dans le cas des fondations gravitaires (cette valeur ne dépasse jamais 2,1: cf. § 4.2.1), la profondeur d'érosion serait inférieure à 5 % du diamètre de la fondation.

En cas de combinaison de houle et de courant, les érosions sont plus fortes ; elles sont doublées dans le cas des quelques essais menés par Rance (1980, *in* Sumer *et al.* 2002, Réf. 53). En courant seul, Haddorp (2005, Réf. 27) recommande de considérer une érosion maximale de l'ordre de 10% du diamètre de la fondation.

Enfin les expérimentations en canal menées par Whitehouse (2004, Réf. 59) sur différents types de fondations gravitaires (Figure 5-14) conduisent à des valeurs sensiblement plus fortes. En particulier, pour le cas de fondation similaire à celui envisagé ici (fondation de gauche sur la Figure 5-14), l'affouillement maximal en houle et courant atteint 7,5 m pour un diamètre de fondation de 19 m, soit une profondeur d'érosion atteignant 39 % du diamètre de la fondation. Appliqué au diamètre envisagé dans le projet examiné ici (34 m), cette profondeur dépasserait ainsi 13 m.

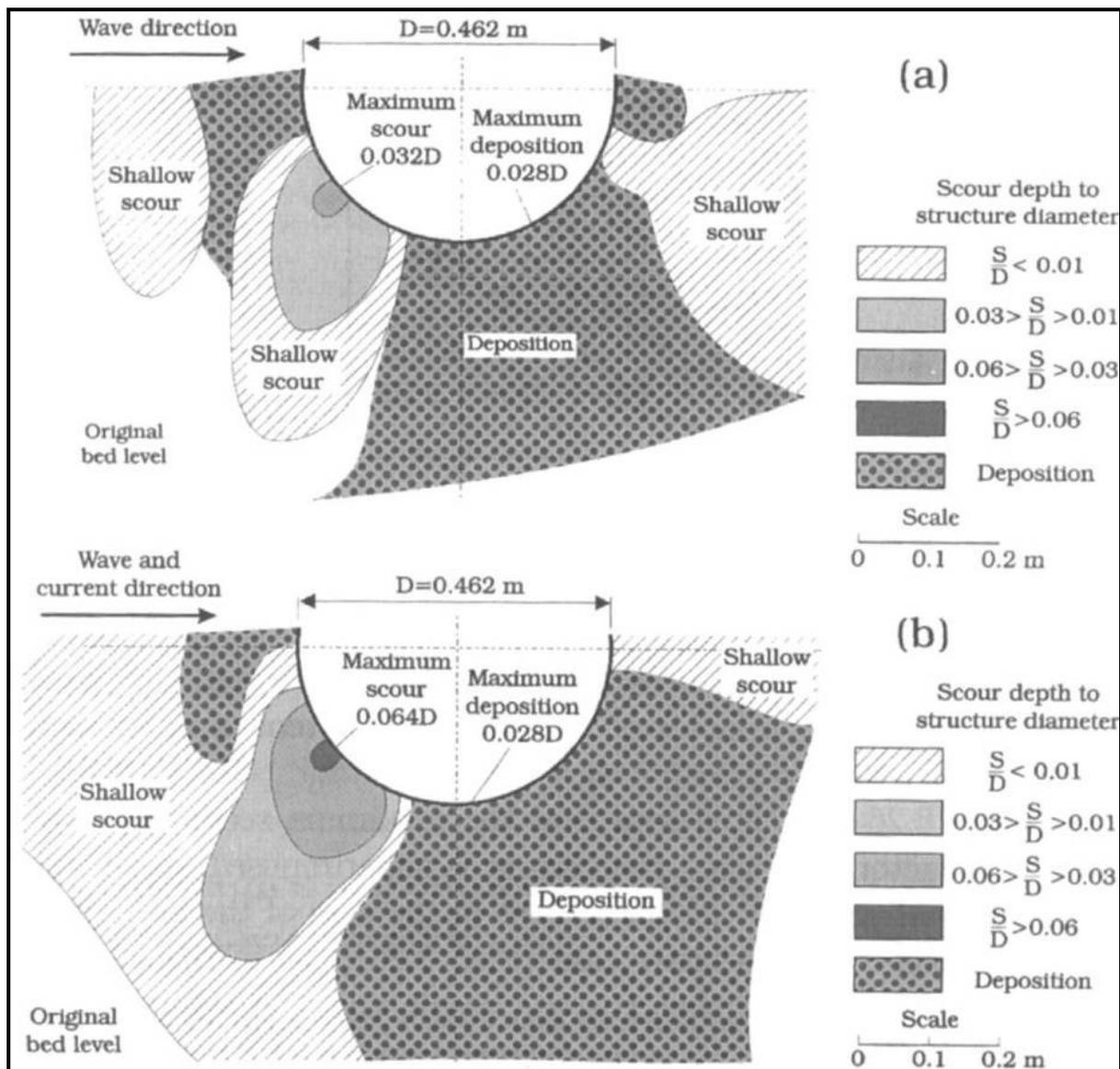


Figure 5-12 : Forme des évolutions des fonds autour d'un cylindre de grande largeur, en houle seule (a) et en houle et courant (b), d'après Sumer et al., 2002, Réf. 53.

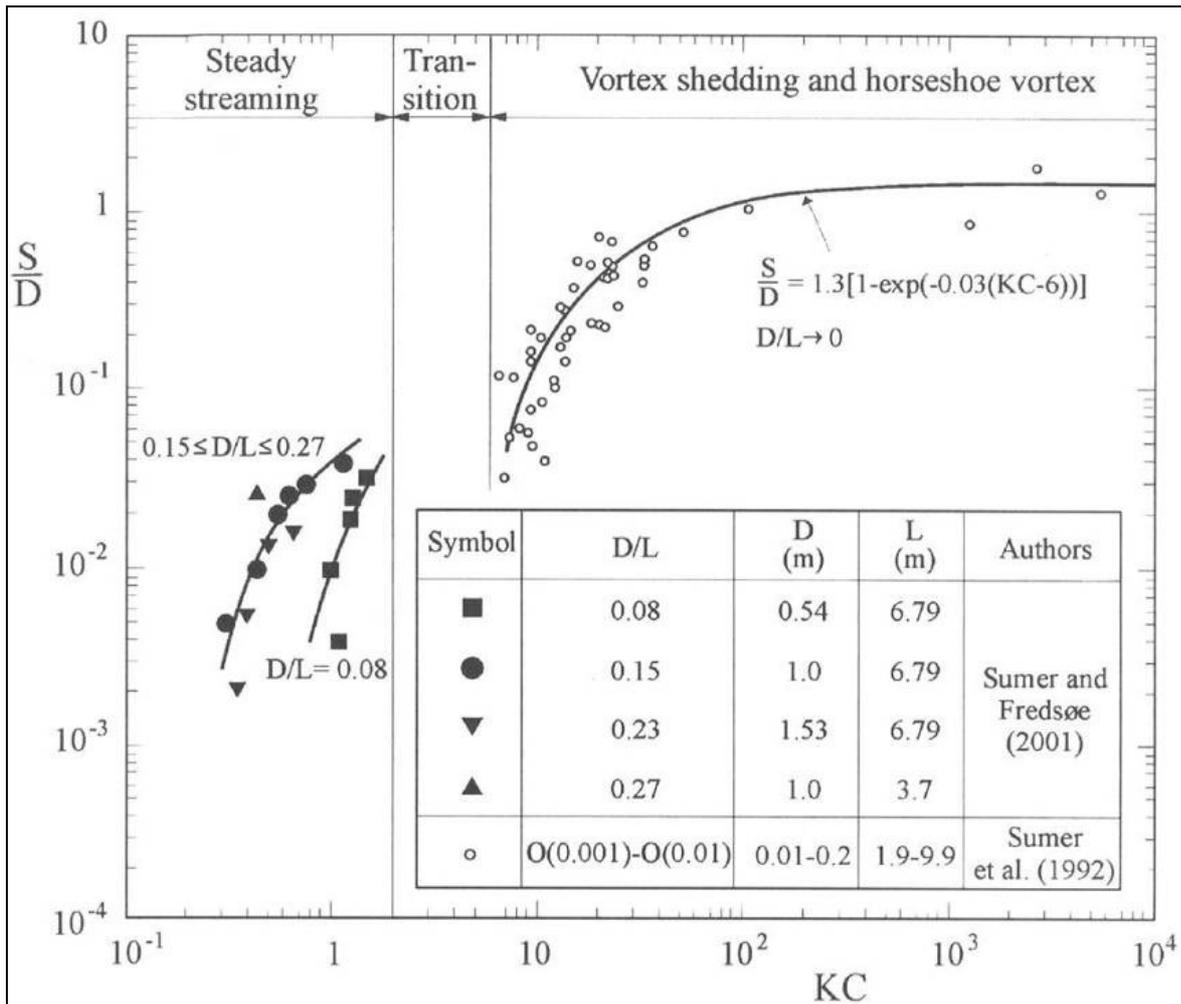


Figure 5-13 : Érosion maximale à la périphérie de la fondation, d'après Sumer et al., 2002, Réf. 53.

D'après les quelques observations et expérimentations disponibles, l'emprise de la zone érodée serait comprise entre 1 et 2 diamètres à partir de la périphérie de la fondation – *i.e.* de la base du cône, dans le cas présent (Whitehouse, 1998, Réf. 58).

A noter pour terminer que Sumer *et al.* (1994, in Sumer *et al.*, 2002, Réf. 53) ont examiné l'érosion autour d'un obstacle en forme de cône – forme assez proche de la fondation gravitaire. Ils ont étudié en particulier l'effet de l'angle au sommet du cône sur l'amplification de la contrainte sur le fond autour de l'obstacle : plus le cône est aplati, moins l'amplification de la contrainte en périphérie du cône est importante – que ce soit sous l'action de la houle ou sous l'action du courant (Figure 5-15). Ainsi, les fondations cylindriques conduisent à des érosions « enveloppes » par rapport aux fondations coniques telles les fondations gravitaires envisagées ici.

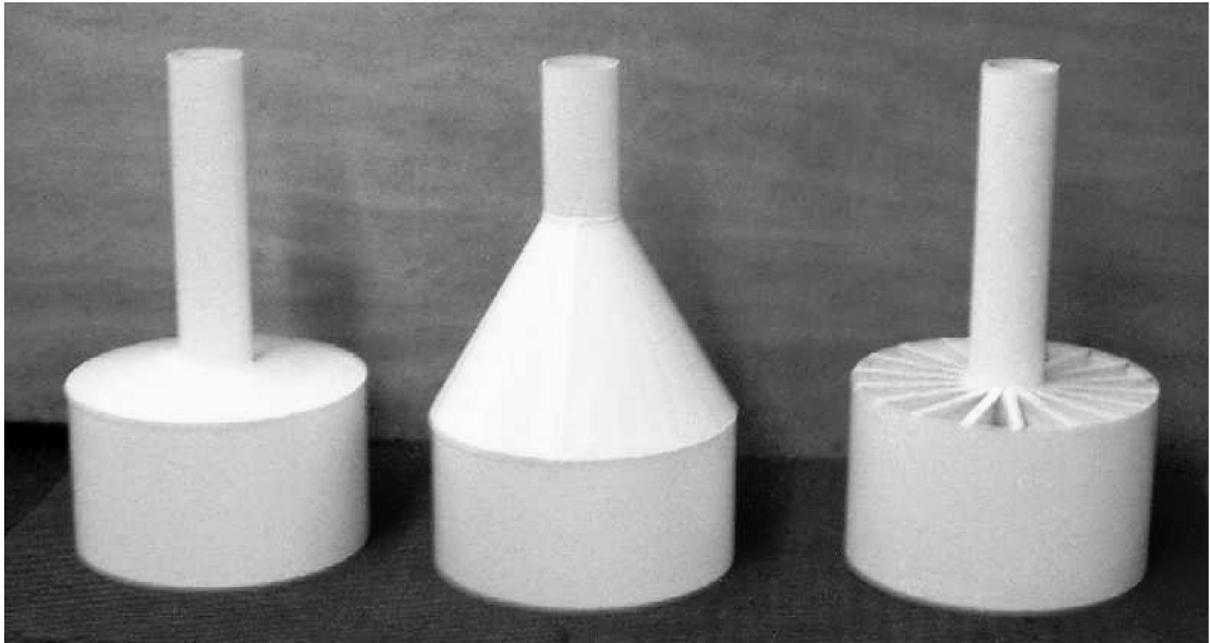


Figure 5-14 : Les différentes fondations étudiées par Whitehouse (2004)

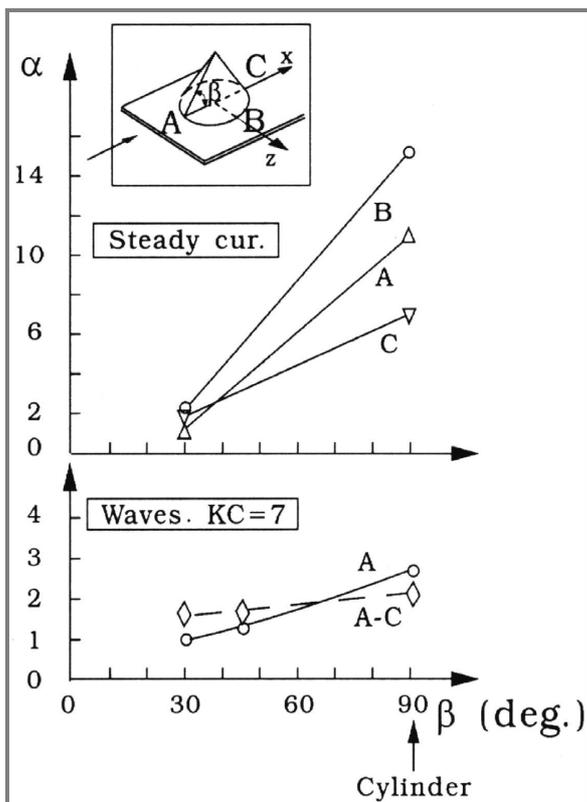


Figure 5-15 : Effet de l'angle à la base du cône sur l'amplification de la contrainte sur le fond, d'après Sumer et al., 1994, Réf. 51).

5.3.2.3 Examen des risques potentiels selon la localisation des fondations

La nature et le dimensionnement de la protection anti-affouillement ont été établis préalablement à la présente étude. Il s'agit d'enrochements disposés en 2 couronnes :

- 1^{ère} couronne sur 5 m autour de chaque fondation ($M_{50} = 100$ kg) ;
- 2^{ème} couronne sur 15 m au-delà de la première couronne ($M_{50} = 50$ kg).

Aucune information n'a été communiquée quant à l'épaisseur de ces protections et aux éventuels filtres sur lesquels elles reposeraient.

La vérification du dimensionnement des protections n'entre pas dans le champ de la présente étude (à noter que la stabilité des enrochements est une condition essentielle à la stabilité des GBS). Si l'on suppose que cette stabilité est assurée, la question qui demeure est d'évaluer si l'érosion en périphérie de protection ne met pas en jeu la stabilité de l'ensemble enrochements-GBS. Cette érosion est provoquée notamment par la saillie que forment les enrochements au-dessus des fonds naturels, et par la modification de rugosité entre fonds naturels et enrochements.

Dans le cas présent, compte tenu de la faible épaisseur de fonds sédimentaires meubles, l'érosion potentielle à l'extérieur de la protection ne pourrait pas dépasser 2,5 m environ – ce qui est suffisamment faible pour que l'abaissement qui s'ensuivrait en périphérie de protection ne mette pas en cause la stabilité du secteur de protection proche de l'embase. Dans cette optique, il est recommandé de vérifier la faiblesse de l'épaisseur de la couche mobile au voisinage des différentes éoliennes, à l'occasion de leur mise en place.

5.3.2.4 Protection du câble

Il est conseillé de protéger les câbles inter-éoliennes contre les agressions extérieures (arrachage par les ancres de navires ou chaluts, cisaillement par les chaînes d'ancrage, actes de malveillance ...).

Dans les fonds sédimentaires, un ensouillage permettrait d'assurer la protection des câbles. Vis-à-vis des chaluts, une profondeur d'ensouillage de 50 cm serait suffisante d'après Hoshina et al. (2001). La protection contre les dégâts potentiels des ancres est plus exigeante. Selon Roelens, la profondeur de pénétration d'une ancre dans le sable est comprise entre 1 m et 2 m pour les navires de type cargo moyen (Figure 5-16).

Cette profondeur d'ensouillage est à considérer sous le niveau minimal des fonds attendus sur la durée de vie du projet – soit 30 ans : une érosion maximale de l'ordre de 0,50 m sur cet intervalle de temps paraît acceptable.

Mole et al. (1997) proposent une gradation de la profondeur d'ensouillage selon le type de menace encourue, par l'intermédiaire d'un indice de protection par ensouillage (BPI : Burial Protection Index) décrit plus précisément ensuite par Allan (1998) : indice de 1 pour les chaluts, 2 pour les ancres jusqu'à 2 tonnes, et 3 pour les autres, à l'exception des plus gros navires. Dans le cas d'un indice de 3, la profondeur d'ensouillage recommandée est supérieure à 2 m pour du sable grossier. Par contre dans le cas moins pénalisant d'une protection à n'assurer que contre les traits de chaluts (indice 1), la profondeur recommandée baisse à un peu moins de 1 m pour du sable grossier (Allan, 1998) – ce dernier cas pouvant être considéré ici.

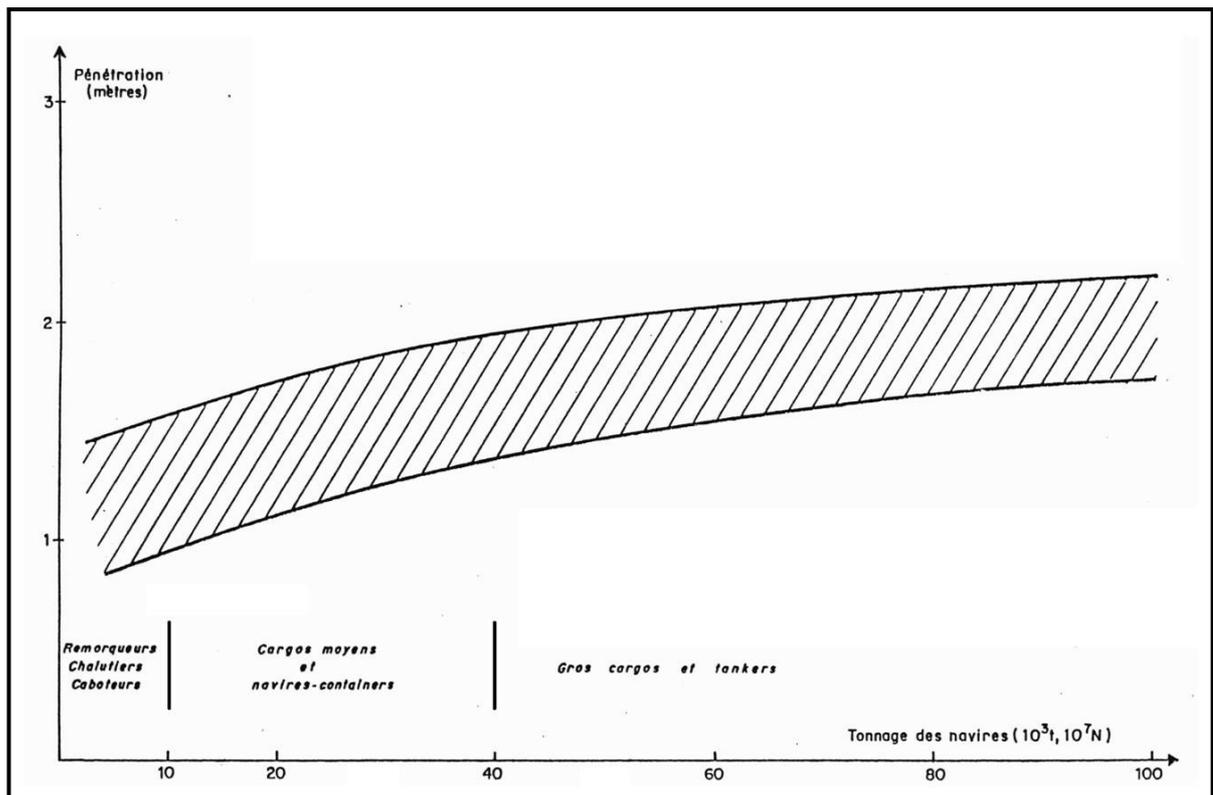


Figure 5-16 : Profondeur de pénétration du sable par une ancre de marine classique (Stokes, Hall's Union, Byers, Poolanker, in Roelens)

6 - IMPACT SUR LA QUALITE DE L'EAU – PHASE DE TRAVAUX

6.1 PRESENTATION DE LA MODELISATION SEDIMENTAIRE

6.1.1 Contexte

Dans le cadre de l'étude d'impact hydro-sédimentaire du projet de parc éolien en mer au large de Fécamp, nous cherchons ici à évaluer l'impact sédimentaire lors de la phase des travaux d'installation des éoliennes. Des modélisations numériques visant à représenter les travaux de décaissement préalables à la pose des fondations gravitaires ont été réalisées dans le but d'estimer l'étendue et les concentrations maximales du panache turbide résultant du rejet sédimentaire.

6.1.2 Le modèle

Le modèle utilisé pour la réalisation de cette étude est le code SISYPHE, élément de la chaîne de calcul TELEMAC développée par EDF-LNHE dont la description est fournie au paragraphe 5.1.1.1. Le modèle utilise les forçages hydrodynamiques calculés par le code Telemac-2D dont les phases de construction et de validation sont décrites de façon détaillé aux paragraphes 3.1 et 3.2.

6.1.3 Dynamique des sédiments

La phase de travaux de décaissement préalable à la pose des fondations gravitaires est susceptible de remettre en suspension dans la colonne des particules plus fines que les matériaux présents naturellement sur le site. La dynamique de ces particules est sensiblement différente de celle traitée dans la section 5.1 où on s'intéresse à des matériaux plus grossiers qui ne se comportent pas de la même façon. Ici, de par leur faible diamètre, certaines particules sont susceptibles de s'agréger entre elles pour former des flocs ce qui a pour effet de modifier les propriétés des matériaux, comme par exemple une augmentation de la vitesse de chute.

Par conséquent, étant donnée le diamètre des particules constituant le rejet, il est nécessaire de modifier le paramétrage du modèle tel qu'il a été mis en place pour l'étude d'impact. En effet, la granulométrie des sédiments prise en compte ici est plus fine que les sables auxquels nous sommes intéressés pour étudier l'impact sédimentaire. Le mode de transport à considérer est le transport des sédiments par suspension dans la colonne d'eau. En effet, le transport par charriage n'est pas le mode de transport adapté pour représenter la dispersion du panache turbide, étant donné le diamètre des sédiments à considérer. Il faut également tenir compte de l'aspect cohésif de certaines particules.

Par conséquent, la modélisation mise en œuvre prend en compte les points suivants :

- le rejet des matériaux tel que défini par les caractéristiques ci-dessous ;

- ceux-ci sont instantanément dilués dans la colonne d'eau à chaque pas de temps (modèle 2D) ;
- ils sont alors advectés par les courants ambiants ;
- éventuellement déposés sur le fond si la vitesse du courant est inférieure à la vitesse critique de dépôt ;
- éventuellement remis en suspension après dépôt et si l'intensité des courants est suffisante.

6.2 METHODOLOGIE DE MODELISATION

6.2.1 Scénarii considérés

Les simulations seront réalisées sur les deux conditions type de marées moyennes de morte-eau et de vive-eau, sur une durée de cinq jours, comprenant trois jours de rejet et deux jours supplémentaires pour étudier la dispersion ultérieure du panache.

Trois points de rejets différents ont été considérés à l'intérieur du parc : au sud-ouest du parc ; au centre et au nord-est du parc.

Enfin, le modèle a été mis en œuvre pour deux granulométries différentes : 5 μm et 100 μm , de manière à couvrir une large gamme de particules fines pouvant être rejetées lors des opérations de décaissement. Pour les particules les plus fines de 5 μm , les propriétés cohésives ont été prises en compte.

6.2.2 Paramétrage du modèle

Les caractéristiques propres au rejet à simuler sont les suivantes :

- Diamètre médian des sédiments rejetés : $D_{50} = 100 \mu\text{m}$ et 5 μm ;
- Densité des matériaux rejetés : 2000 kg/m^3 ;
- Débit solide du rejet : 2,1 m^3 de sédiment par heure ;

Les paramètres propres à cette modélisation sédimentaire sont les suivants :

- Vitesse de chute : 4 mm/s pour les particules de 100 μm (déduite de la densité et de la granulométrie du sédiment d'après la formulation de Soulsby) et 0,1 mm/s (déduite de la même formulation à laquelle est appliquée un facteur de floculation tenant compte de l'aspect cohésif (d'après Migniot) ;

- Contrainte critique d'érosion : 7 N/m^2 pour les deux granulométries considérées car il s'agit d'une valeur représentative des sédiments en place sur le site et qui auront tendance à piéger les particules fines provenant du rejet dans les interstices qu'elles créent ;
- Vitesse critique de cisaillement pour le dépôt : infinie. L'approche adoptée ici défavorise sensiblement le dépôt, puisqu'elle correspond à la mise en suspension du sédiment à partir d'un lit de sédiment de même nature. Or dans notre cas, il n'y a pas ce type d'échange puisque les matériaux constituant le rejet et ceux présents sur le fond sont complètement différents. La présence de cailloutis a pour effet d'inhiber la remise en suspension. C'est pour cette raison que nous avons considéré plus réaliste d'autoriser le dépôt en permanence ;
- Concentration du lit de vase : 1600 g/l dans le cas des sédiments de $100 \mu\text{m}$ (provenant de la densité du matériau associée à une porosité de 40%), et 200 g/l pour les particules fines à $5 \mu\text{m}$ (représentatif d'un dépôt frais) ;
- Coefficient de dispersion : calculé à chaque instant en fonction des conditions hydrodynamiques ambiantes selon la formulation d'Elder.

6.3 RESULTATS DES SIMULATIONS

6.3.1 Concentration maximale

Les champs de concentration maximale obtenus après 5 jours de simulation sont présentés sur la Figure 6-1 pour une marée de morte-eau moyenne et sur la Figure 6-2 pour une marée de vive-eau moyenne. Les illustrations de gauche sont relatives aux simulations réalisées avec un diamètre médian de $100 \mu\text{m}$ et celles de droite au diamètre de $5 \mu\text{m}$.

Quelle que soit la position du point de rejet (nord-est, centre ou sud-ouest), on constate que les concentrations maximales simulées sont localisées au niveau des différents points de rejet et que les panaches turbides se répartissent selon l'orientation du courant dans une direction est-nord-est / ouest-sud-ouest. Les valeurs modélisées sont très faibles et restent inférieures à $0,1 \text{ mg/l}$ à 10 km au-delà du point de rejet et à 1 mg/l à un kilomètre au-delà du point de rejet. Très localement autour du point de rejet, ces valeurs modélisées peuvent être plus importantes. Ces valeurs ne dépassent pas celles de la turbidité naturelle pouvant être rencontrée dans cette région qui sont de l'ordre de 1 à 20 mg/l (cf. §2.3.4.3)

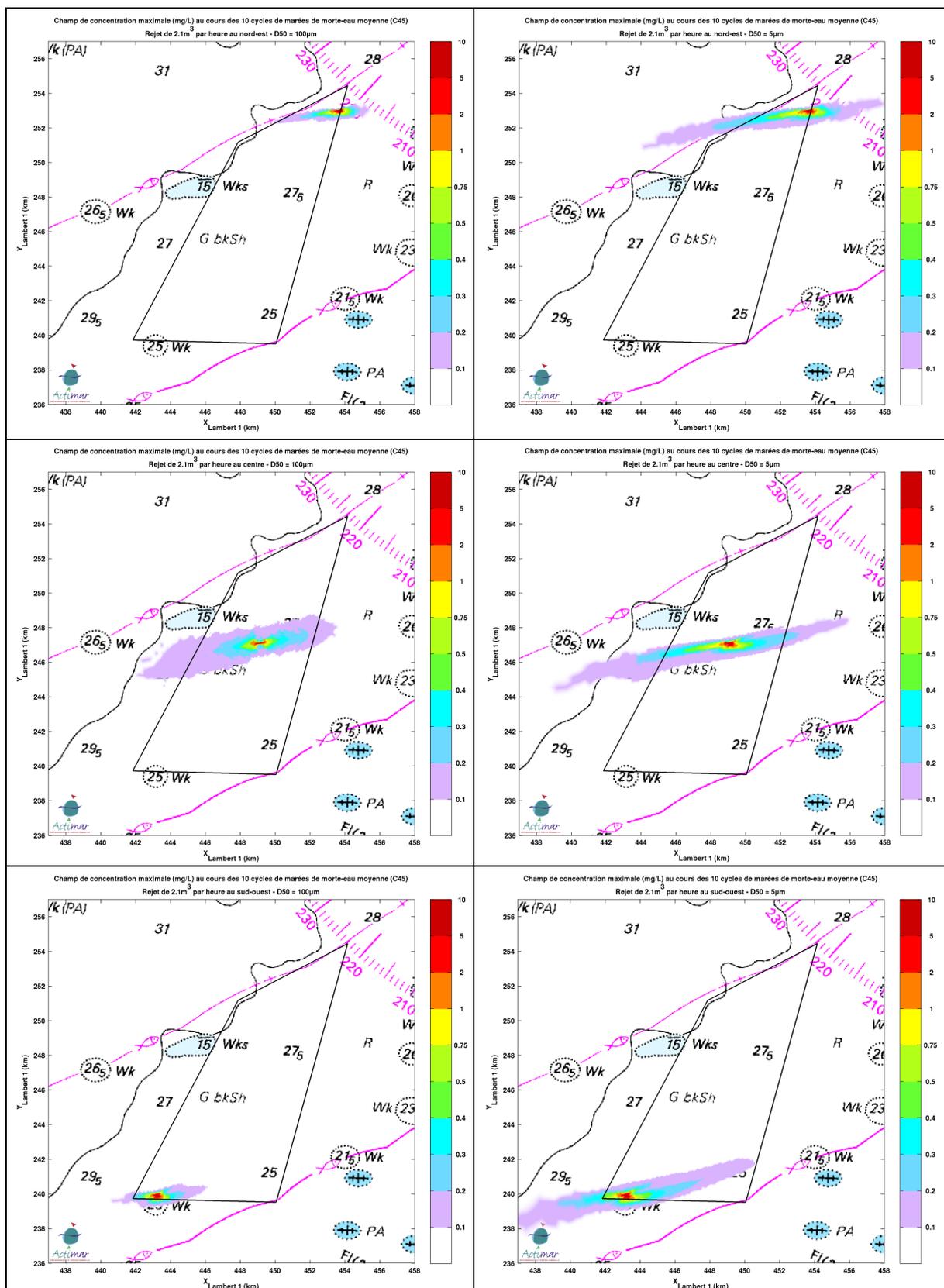


Figure 6-1 : Champ de concentration maximale (en mg/L) après 5 jours de simulation en marée de morte-eau moyenne (C45), pour un rejet de particules de diamètre médian de 100 μm (à gauche) et de 5 μm (à droite), et pour différentes positions du points de rejet (au nord-est en haut, au centre au milieu et au sud-ouest en bas).

6 - Impact sur la qualité de l'eau – Phase de travaux

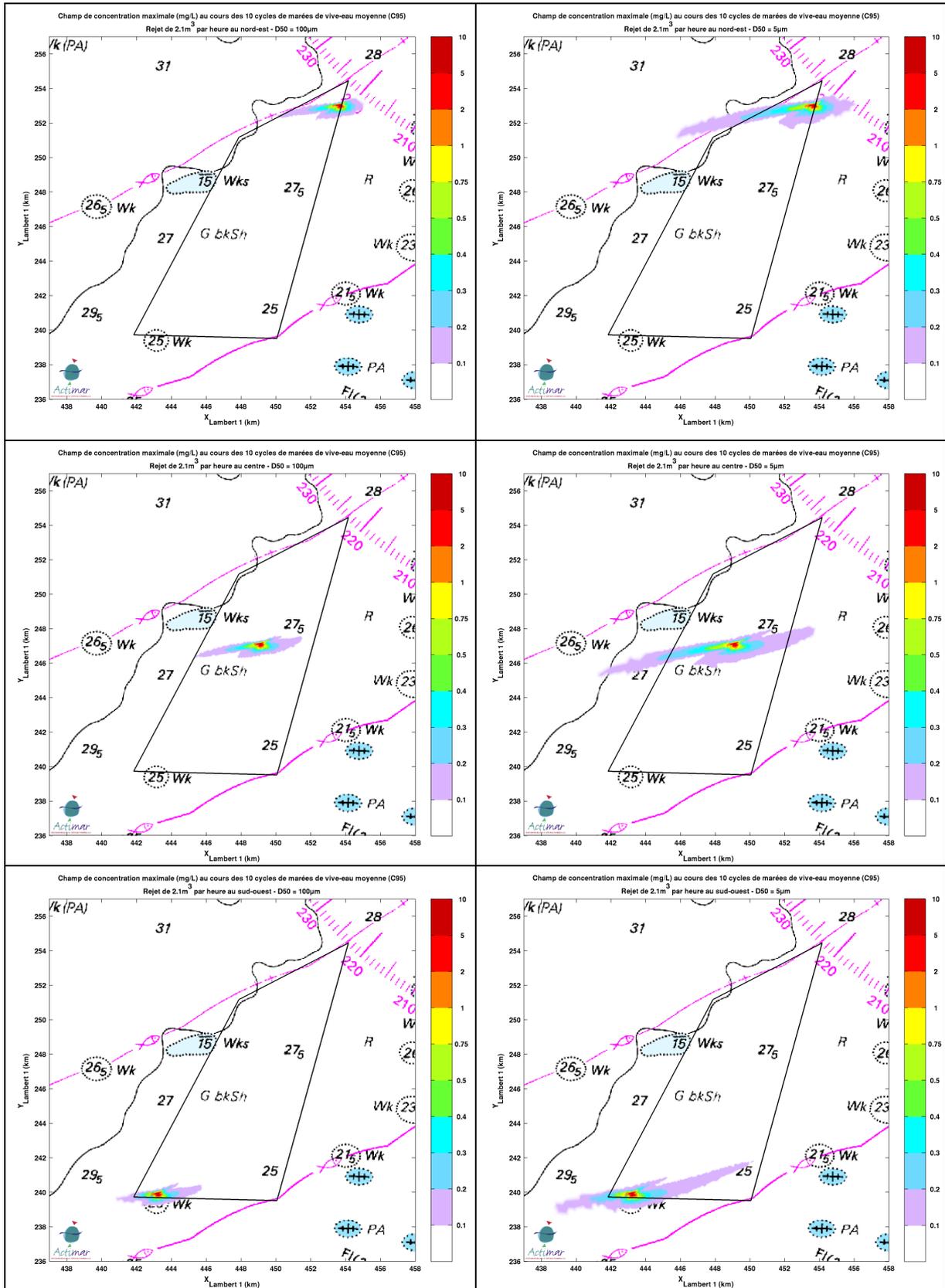


Figure 6-2 : Champ de concentration maximale (en mg/L) après 5 jours de simulation en marée de vive-eau moyenne (C95), pour un rejet de particules de diamètre médian de 100 µm (à gauche) et de 5 µm (à droite), et pour différentes positions du points de rejet (au nord-est en haut, au centre au milieu et au sud-ouest en bas).

6.3.2 Dépôt maximal

Les cartes de dépôt maximal obtenu après 5 jours de simulation sont présentées sur la Figure 6-3 pour une marée de morte-eau moyenne et sur la Figure 6-4 pour une marée de vive-eau moyenne. Les quantités déposées sur le fond sont localisées au niveau du point de rejet et se répartissent également selon la direction du courant. Les valeurs de dépôt modélisées restent toutefois inférieures à 1 mm quelles que soient les configurations testées.

6 - Impact sur la qualité de l'eau – Phase de travaux

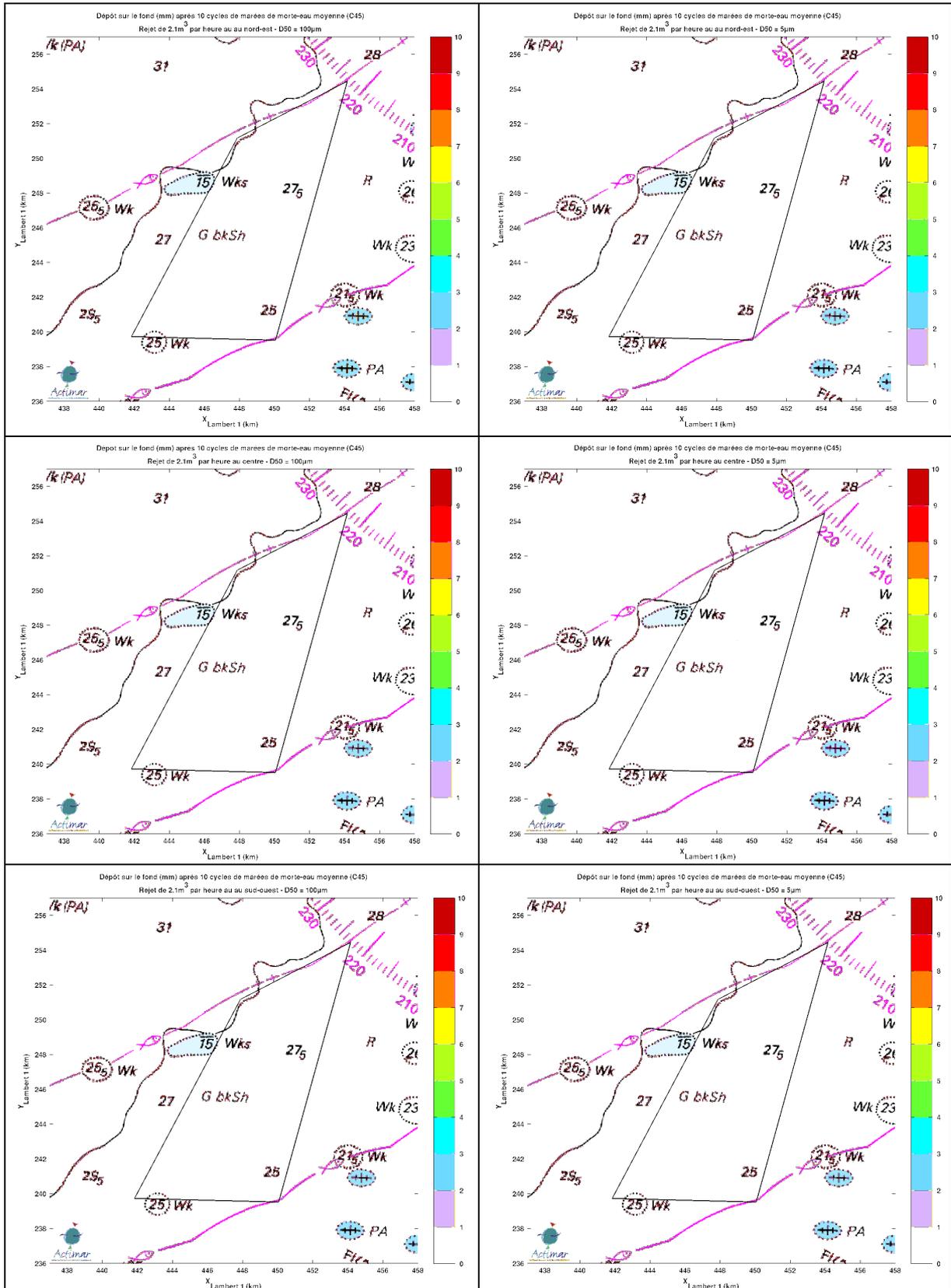


Figure 6-3 : Cartes de dépôt maximal (en mm) après 5 jours de simulation en marée de morte-eau moyenne (C45), pour un rejet de particules de diamètre médian de 100 µm (à gauche) et de 5 µm (à droite), et pour différentes positions du points de rejet (au nord-est en haut, au centre au milieu et au sud-ouest en bas).

6 - Impact sur la qualité de l'eau – Phase de travaux

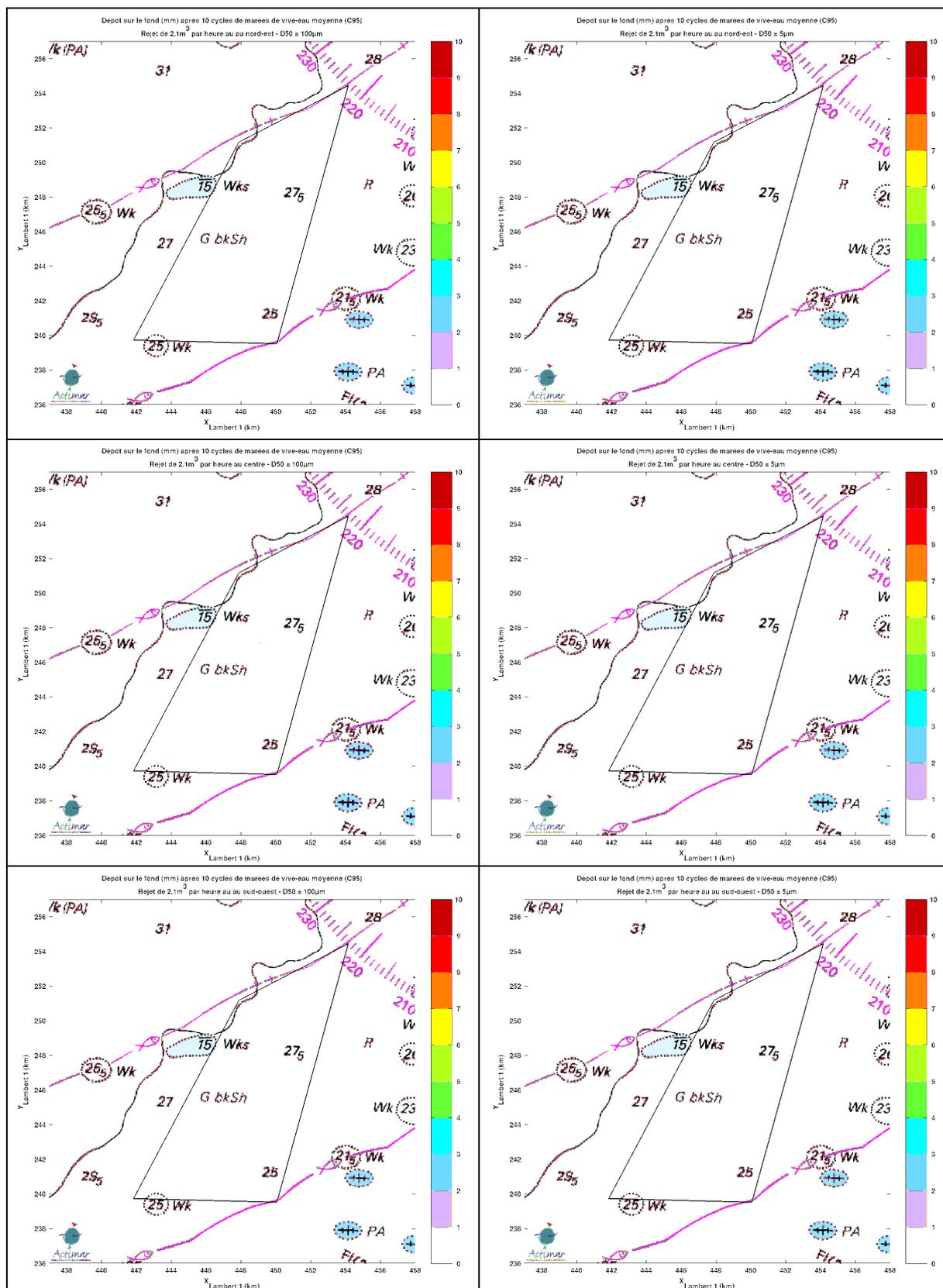


Figure 6-4 : Cartes de dépôt maximal (en mm) après 5 jours de simulation en marée de vive-eau moyenne (C95), pour un rejet de particules de diamètre médian de 100 µm (à gauche) et de 5 µm (à droite), et pour différentes positions du points de rejet (au nord-est en haut, au centre au milieu et au sud-ouest en bas).

7 - SYNTHÈSE GÉNÉRALE

Cette étude vise à évaluer l'incidence du projet de parc éolien de Fécamp, situé à treize kilomètres de la côte, sur les conditions hydrodynamiques et sédimentaires de la zone.

Le parc éolien, tel que défini au chapitre 1, a une incidence spatialement limitée sur l'hydrodynamique. Les résultats du modèle mettent en évidence une réduction de la vitesse du courant en aval des aérogénérateurs. La réduction pour le courant barotrope est inférieure à 10% au-delà de 500 m d'une fondation ; elle est inférieure à 5% au-delà de 2 kilomètres des fondations. La présence des fondations n'affecte l'hydrodynamique que très localement autour de chaque éolienne. L'incidence reste faible dans la zone du parc et elle devient très faible voire négligeable à plus grande distance, à l'extérieur du parc.

L'incidence du parc éolien sur les états de mer est abordée dans cette étude sous deux aspects : l'effet de masquage des fondations sur la propagation des vagues et l'effet de sillage des turbines sur les échanges océan-atmosphère. La présence des fondations affecte les états de mer dans la zone d'implantation, sur une courte distance de l'ordre de 150 à 200 m autour des fondations. L'effet de sillage des turbines perturbe la génération des états de mer à plus grande distance ; il induit une faible réduction des transferts atmosphère-océan. La réduction maximale de la hauteur des vagues en aval du parc est estimée à 5,3 % en considérant les différents effets combinés liés aux fondations et au fonctionnement des turbines. Cet écart reste inférieur à la variabilité naturelle interannuelle des états de mer (estimée à partir des données Anemoc à 7,1%).

Enfin, sur les aspects sédimentaires, la présence des fondations n'affecte l'évolution des fonds que très localement autour de chaque éolienne et ne perturbe donc pas l'évolution naturelle des fonds au-delà de la zone d'implantation du parc éolien. L'incidence du parc à plus grande distance, à l'extérieur du champ d'éoliennes, est infime (écart d'évolution des fonds inférieur à 5 cm au bout de 30 ans). A l'intérieur du parc d'éoliennes cette valeur n'est dépassée qu'à moins de 200 à 300 m de chaque fondation ; il n'y a donc pas d'interaction entre les impacts sédimentaires des différentes fondations.

En phase de travaux, le panache turbide produit par le décaissement se répartit selon l'orientation du courant, dans une direction est-nord-est / ouest-sud-ouest. Les concentrations du panache turbide restent inférieures à 1 mg/l à un kilomètre au-delà du point de rejet ; elles ne dépassent donc pas celles de la turbidité naturelle pouvant être rencontrée dans cette région, qui sont de l'ordre de 1 à 20 mg/l.

Le plan de développement des énergies renouvelables en France prévoit le déploiement de plusieurs parcs éoliens offshore en Manche est. Il concerne les parcs de Courseulles sur Mer (d'une capacité maximale installée de 450 MW), de Fécamp (500 MW) et de Veulette sur Mer. Outre Manche, les parcs de Rampion (700MW) et de Navitus Bay (970 MW) sont également en phase de développement (cf. Figure 7-1). Le projet éolien offshore le plus proche du site de Fécamp est celui de Veulette sur Mer, situé à environ 30 kilomètres à l'est. Par ailleurs, les études d'impacts menées pour les trois projets de l'éolien offshore français en Manche est (Réf. 1, Réf. 16) montrent que l'incidence des parcs sur le milieu physique est spatialement limitée et qu'elle devient négligeable à l'extérieur de la zone de projet, et infime (inférieure à la précision des modèles numériques) à quelques kilomètres du parc. Il n'y a donc pas d'interaction attendue entre les différents projets de l'éolien offshore français, ni avec les deux projets britanniques situés, outre Manche, à plus de 80 kilomètres des sites éoliens offshore français.

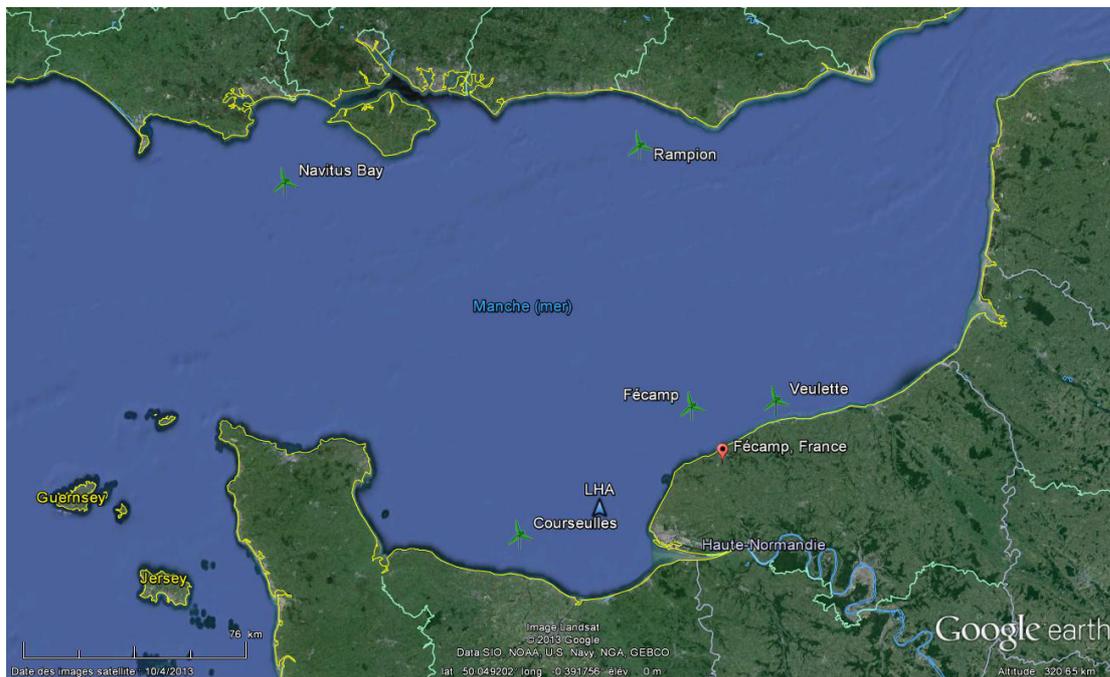


Figure 7-1 : Projets éoliens en Manche est.

BIBLIOGRAPHIE

Réf. 1 : **Actimar** (2013) – « Etude d'impact hydro-sédimentaire du projet de parc éolien offshore en baie de Seine ». Eoliennes Offshore du Calvados. Document MOC-0567.

Réf. 2 : **Albaret E., Dupeyron J., Nedellec M.** (2004) – « Sédimentation sableuse du littoral haut normand. Etude de la zone intertidale entre le cap d'Antifer et Le Tréport et de l'ensablement du port extérieur de Dieppe ». Université de Caen Basse-Normandie, Laboratoire GEOPHEN, DESS AGIRE.

Réf. 3 : **Auffret J.P., Alduc D.** (1977) – « Ensembles sédimentaires et formes d'érosion du Quaternaire sous-marin de la Manche orientale ». Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire, Volume 14, N° 4, pp 71-75.

Réf. 4 : **Augris C., Clabaut P., Costa S., Gourmelon F., Latteux B.** (2004) – « Evolution morpho-sédimentaire du domaine littoral et marin de la Seine-Maritime ». Ifremer, Conseil Général de la Seine-Maritime, EDF. Ed. Ifremer, Bilans & Prospectives, 159 p.

Réf. 5 : **Avoine J.** (1994) – « Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. Sédimentologie ». Rapport IFREMER-PAH, 154 p.

Réf. 6 : **Bijker E.W.** (1968) – « Mechanics of sediment transport by the combination of waves and current in Design and Reliability of Coastal Structures ». 23rd Int. Conf. on Coastal Engineering, 147-173.

Réf. 7 : **BRL Ingénierie** (juillet 2012) – « Currents statistics analysis for wind power structural design in FECAMP ».

Réf. 8 : **BRL Ingénierie** (2011) – « Offshore Wind Project – FECAMP – Geological analysis for wind power structural design in Fécamp ». Document 8000113 NDC, Rev a.

Réf. 9 : **BRL Ingénierie**, « Etude de l'impact d'un parc éolien offshore sur les courants marins ».

Réf. 10 : **Brylinski J.M., Cabioch L., Chabert d'Hyères G., Guéguéniat P., Larsonneur C., Retière C.** (1988) – « Problèmes d'environnement dans les mers côtières : le cas de la Manche, mer à forte dynamique de marée ». Journées de l'Environnement, 30 novembre – 1^{er} décembre 1988, Paris.

Réf. 11 : **Christiansen, M.B., Hasager, C.B.** (2005). Wake effects of large offshore wind farms identified from satellite SAR. Remote Sensing Environment. Vol. 98, 251-268.

Réf. 12 : **Commissariat Général du Développement Durable, MEDDTL.** (mai 2011) – « Environnement littoral et marin, Chapitre 6 : Les risques naturels et industriels sur le littoral ». Sébastien Colas, SOeS.

- Réf. 13 : **Costa S.** (1997) – « Dynamique littorale et risques naturels – L’impact des aménagements, des variations du niveau marin et des modifications climatiques entre la baie de Seine et la baie de Somme ». Thèse de l’Université de Paris I Panthéon-Sorbonne.
- Réf. 14 : **Costa S.** (2000) – « Réactualisation des connaissances et mise en place d’une méthode de suivi de la dynamique du littoral haut-normand et picard. Rapport final ». Préfecture de Picardie. Contrat de Plan Interrégional du Bassin de Paris (CPIBP), 103 pp.
- Réf. 15 : **Costa S.** (2009) – « L’ensablement des plages ». Conférence organisée par l’Association de Sauvegarde du Patrimoine Veulais et la Municipalité.
- Réf. 16 : **CREOCEAN** (2006) – Projet de parc éolien offshore « Côte d’Albâtre » au large de Veulettes-sur-Mer - Etude d’impact environnementale ». ENERTRAG France – CECA SAS. Dossier 104494.
- Réf. 17 : **De Vos L., Frigaard P., De rouck J.** (2007) – Wave run-up on cylindrical and cone shaped foundations for offshore wind turbines. Coastal Eng. 54. pp. 17-29.
- Réf. 18 : **DHI** (2009) – « Horns Rev Wind Power Plant. Environmental impact assessment of hydrography ».
- Réf. 19 : **Ferrant P., Malenica S., Molin B.** (1999) – « Nonlinear wave loads and runup on a vertical cylinder. Nonlinear water wave interaction ». Ed. O. Mahrenholtz & M. Makiewicz. Pp. 101-135. WIT Press.
- Réf. 20 : **Frijling H.C.** (1952) – « Discussion of the sediment transport formulas of Kalinske ». 2nd Journal Hydraulics, Soc. Hydraulic de France, Grenoble, pp 98-103.
- Réf. 21 **Gandara R., Harris J.** (2012). Nearshore wave damping due to the effect on winds in response to offshore wind farms.
- Réf. 22 : **Garnaud S.** (2002) – « La sédimentation fine sur une plate-forme interne macrotidale : la baie de Seine Sud-Orientale ». Thèse de l’Université de Caen/Basse-Normandie.
- Réf. 23 : **GEMEL Picardie** (2011) – « Réalisation de la 1^{ère} tranche de l’état bio-sédimentaire initial pour le projet éolien des Hautes Falaises ».
- Réf. 24 : **GIEC** (IPCC 2007) – « Résumé technique. In: changements climatiques 2007: Les éléments scientifiques. Contribution du groupe de travail au quatrième Rapport d’évaluation du Groupe d’experts intergouvernemental sur les changements climatiques », Solomon, S., D. Qin, M. Manning, R.B. Alley, T. Berntsen, N.L. Bindoff, Z. Chen, A. Chidthaisong, J.M. Gregory, G.C. Hegerl, M. Heimann, B. Hewitson, B.J. Hoskins, F. Joos, J. Jouzel, V. Kattsov, U. Lohmann, T. Matsuno, M. Molina, N. Nicholls, J. Overpeck, G. Raga, V. Ramaswamy, J. Ren, M. Rusticucci, R. Somerville, T.F. Stocker, P. Whetton, R.A. Wood and D. Wratt.
- Réf. 25 : **Guerrero J.** (2007) – « Evolution spatio-temporelle de l’ensablement de l’estran et ses conséquences sur certaines activités maritimes. L’exemple du littoral haut-normand ». Mémoire de stage de Master 1, Université de Bretagne Occidentale.
- Réf. 26 : **Guerrero J.** (2008) – « Recherche sur l’origine de l’ensablement de la zone intertidale en Seine-Maritime ». Mémoire de stage de Master 2, Université de Bretagne Occidentale.
- Réf. 27 : **Haddorp R.** (2005) – « Predictability of Scour at Large Piles due to Waves and Currents ». Diploma Thesis. Delft University of Technology.
- Réf. 28 : **Hoffmans G.J.C.M., Verheij H.J.** (1997) – « Scour Manual », Rotterdam.
- Réf. 29 : **ID SCOPE MONACO** (2011) – « Reconnaissance géophysique du champ éolien offshore de Fécamp. Rapport final et cartographie ». Document MC391.

Réf. 30 : **Isaacson M.** (1979) – « Wave-induced forces in the diffraction regime ». In. Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinder (Ed. T.L. Shaw). Pitman Advanced Publishing Program, pp. 68-89.

Réf. 31 : **IX SURVEY.** (2013) – « Fecamp geophysical survey ». Final interpretative report. Document: FEC-DAC-GEO-REP-IXS-0006-E2.0.

Réf. 32 : **Karim M.F., Kennedy J.F.** (1982) – « A computer based flow and sediment routing ». IIH Report N°250, Modelling for streams and its application to the Missouri River, University of Iowa, Iowa City, IA.

Réf. 33 : **Larsonneur C., Vaslet D., Auffret J.P.** (1978) – « Les sédiments superficiels de la Manche – Carte au 1/500 000^{ème} » CNEXO-BRGM éd.

Réf. 34 : **Latteux B.** (2001) – « Synthèse sur les problématiques et enjeux d'évolution du littoral haut-normand et picard. Chapitre 1 : Milieu physique ».

Réf. 35 : **LCHF** (1986) – « Catalogue sédimentologique des côtes françaises – Côtes de la Mer du Nord et de la Manche – partie C : de la baie de Seine au Mont-Saint-Michel ». Collection des Etudes et Recherches d'EDF – Eyrolles, n° 61.

Réf. 36 : **Lesueur P., Lesourd S.** (1999) – « Sables, chenaux, vasières ... : dynamique des sédiments et évolution morphologique ». Programme Seine-aval. Ifremer-Région Haute-Normandie-Agence de l'Eau Seine-Normandie. Ed. Ifremer, Programme Seine-aval, fascicule 3.

Réf. 37 : **Météo-France** (2001) – « Cartographie des zones à risque de surcotes sur les côtes de la Manche et de l'Atlantique ».

Réf. 38 : **Miche R.** (1954) – « Mouvements ondulatoires des mers en profondeur constante ou décroissante ». Ser. 3 Issue 363, Wave Res. Lab., Univ Calif. At Berkeley.

Réf. 39 : **Migniot C., Bellessort B.** (1974) – « Bas-Champs de la Somme – Protection contre la mer – Etude sédimentologique complémentaire – Etude sur plan des solutions de stabilisation ». Rapport LCHF.

Réf. 40 : **Molina D.L.** (2008) – « Modeling of Wakes Behind Wind Turbines ». Technical University of Denmark.

Réf. 41 : **Molin B.** (2002) – « Hydrodynamique des structures offshore ». Guides pratiques sur les ouvrages en mer - CLAROM. Editions Technip.

Réf. 42 : **Molin B., Remy F., Kimmoun O., Jamois E.** (2005) – « The role of tertiary wave interactions in wave-body problems ». Journal of Fluid Mechanics ISSN 0022-1120.

Réf. 43 : **Offshore Center Denmark** (2006) – « Offshore Wind Turbines situated in Areas with Strong Currents ». Doc. N° 6004RE01ER1.

Réf. 44 : **Rainey R.C.T., Chaplin J.R.** (2003) – « Wave breaking and cavitation around vertical cylinder: experiments and linear theory ». Proc. 18th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies. (Ed. A.H. Clement & P. Ferrant). London: R. Inst. Naval Architects.

Réf. 45 : **Rance P.J.** (1980) – « The Potential for Scour around Large Objects ». Scour Prevention Techniques around Offshore Structures, London Seminar, Society for Underwater Technology, pp 41-53.

Réf. 46 : **Saito E., Sato S., Shibayama T.** (1990) – « Local Scour around a Large Circular Cylinder due to Wave Action ». Proc. 22nd Int. Conf. Coastal Engineering, Delft, Netherlands, Chapter 134.

Réf. 47 : **Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)** (2010) – « Carte 7417G – Natures de fond – Abords de Fécamp et de Dieppe – du Cap d'Antifer à Dieppe ».

Réf. 48 : **Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)** (2012) – « Ouvrage de marée – Références Altimétriques Maritimes – Cotes du Zéro Hydrographique et Niveaux Caractéristiques de la marée ».

Réf. 49 : **Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) et Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales (CETMEF)** (2012) – « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France ».

Réf. 50 : **Sumer B.M., Fredsøe J. and Christiansen N.** (1992) – « Scour around vertical piles in waves ». Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng, 118 (1), pp. 15-31.

Réf. 51 : **Sumer B.M., Fredsoe J., Christiansen N, Hansen S.B.** (1994) – « Bed shear stress and scour around coastal structures ». Proc. 24th ICCE, ASCE, Kobe, Vol. 2, pp. 1595-1609.

Réf. 52 : **Sumer B.M., Fredsøe, J.** (2001) – « Scour around pile in combined waves and current ». J. Hydraulic Eng., Vol. 127, No. 5, 403-411.

Réf. 53 : **Sumer B.M., Fredsøe J.** (2002) – « The mechanics of scour in the marine environment ». Advances Series on Ocean Engineering, Volume 17, World Scientific Publishing Co.

Réf. 54 : **Sumer B.M., Fredsøe J.** (2006) – « Hydrodynamics around cylindrical structures ». World Scientific, ISBN 981-270-039-0.

Réf. 55 : **U.S. Army Corps of Engineers** (2003) – « Coastal Engineering Manual ». EM 1110-2-1100 (Part VI). Chapter 5.

Réf. 56 : **U.S. Army Corps of Engineers** (mai 2001) – « Scour analysis ».

Réf. 57 : **Van Rijn L.C.** (1993) – « Principles of sediment transport in rivers, estuaries and coastal seas ». Aqua Publications.

Réf. 58 : **Whitehouse R.J.S.** (1998) – « Scour at marine structure - A manual for practical applications ». Thomas Telford, 198 pp.

Réf. 59 : **Whitehouse R.J.S.** (2004) – « Marine scour at large foundations ». 2nd International Conference on Scour and Erosion (ICSE-2), Singapore, 1-4 November 2004.

ANNEXES

Annexe 1.

Niveaux extrêmes de pleine mer

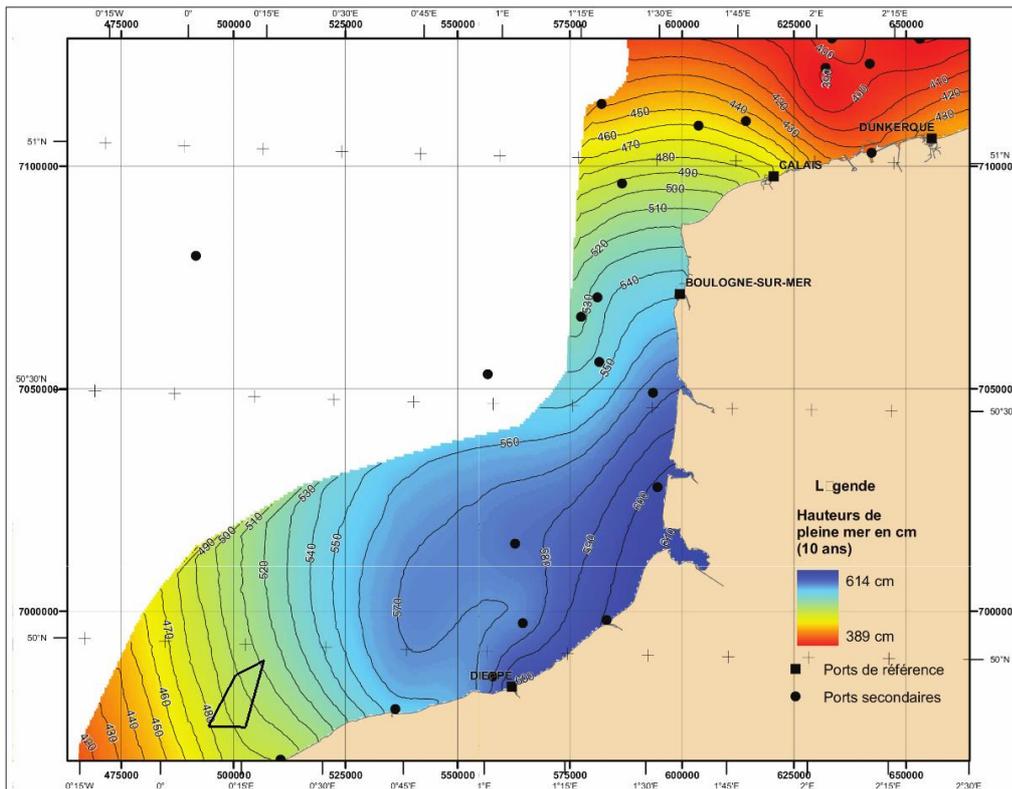


Figure A-1 : Niveaux extrêmes de pleine mer pour une période de retour de 10 ans d'après SHOM - CETMEF 2012 (Réf. 49).

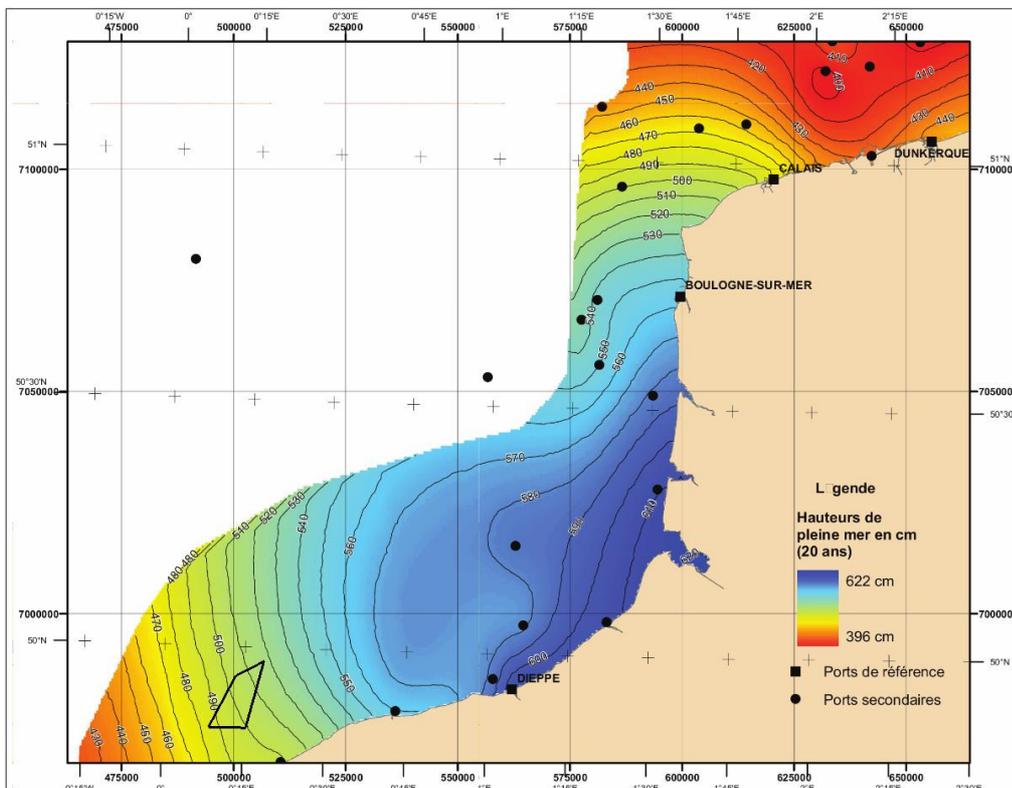


Figure A-2 : Niveaux extrêmes de pleine mer pour une période de retour de 20 ans d'après SHOM - CETMEF 2012 (Réf. 49).

7 - Synthèse générale

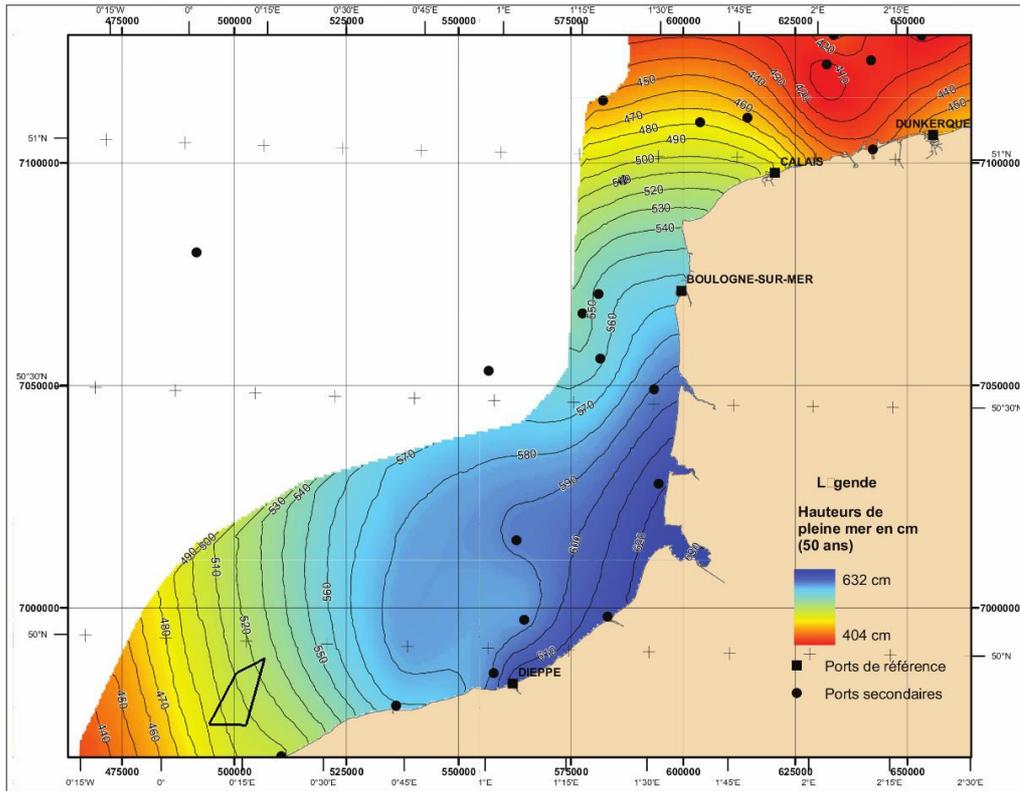


Figure A- 3 : Niveaux extrêmes de plein mer pour une période de retour de 50 ans d'après SHOM - CETMEF 2012 (Réf. 49).

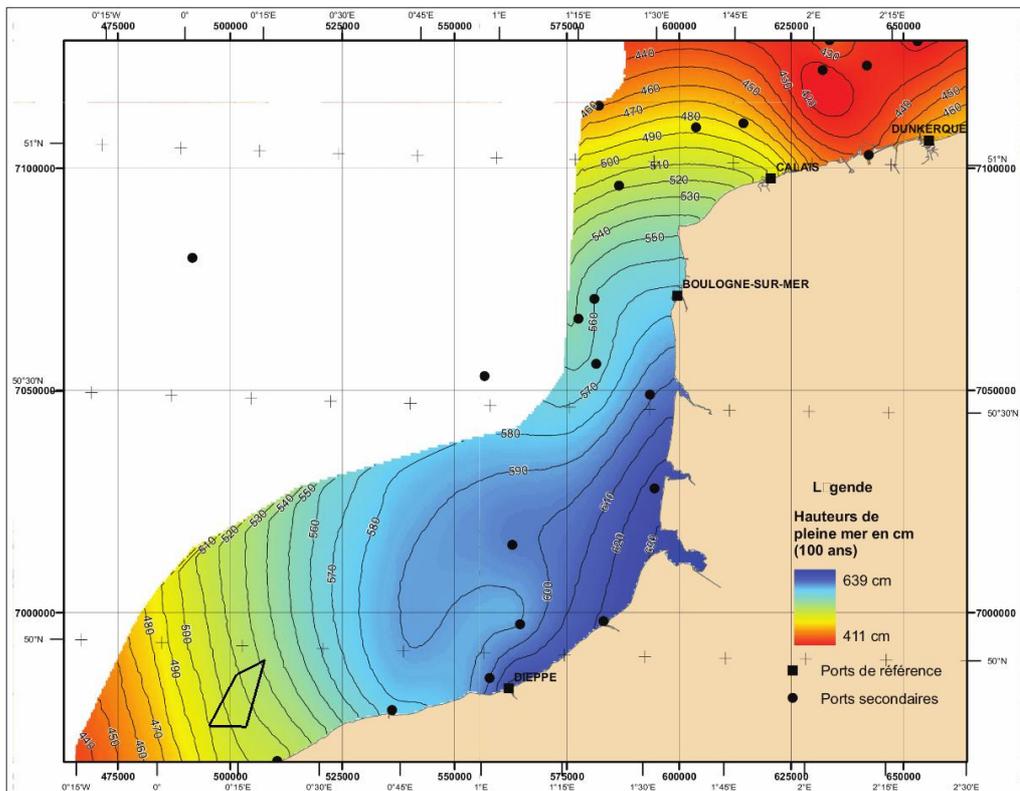


Figure A- 4 : Niveaux extrêmes de pleine mer pour une période de retour de 100 ans d'après SHOM - CETMEF 2012 (Réf. 49).

Annexe 2.

Conditions hydrodynamiques en l'état naturel

VALIDATION PAR COMPARAISON AUX MESURES SHOM

NIVEAU D'EAU

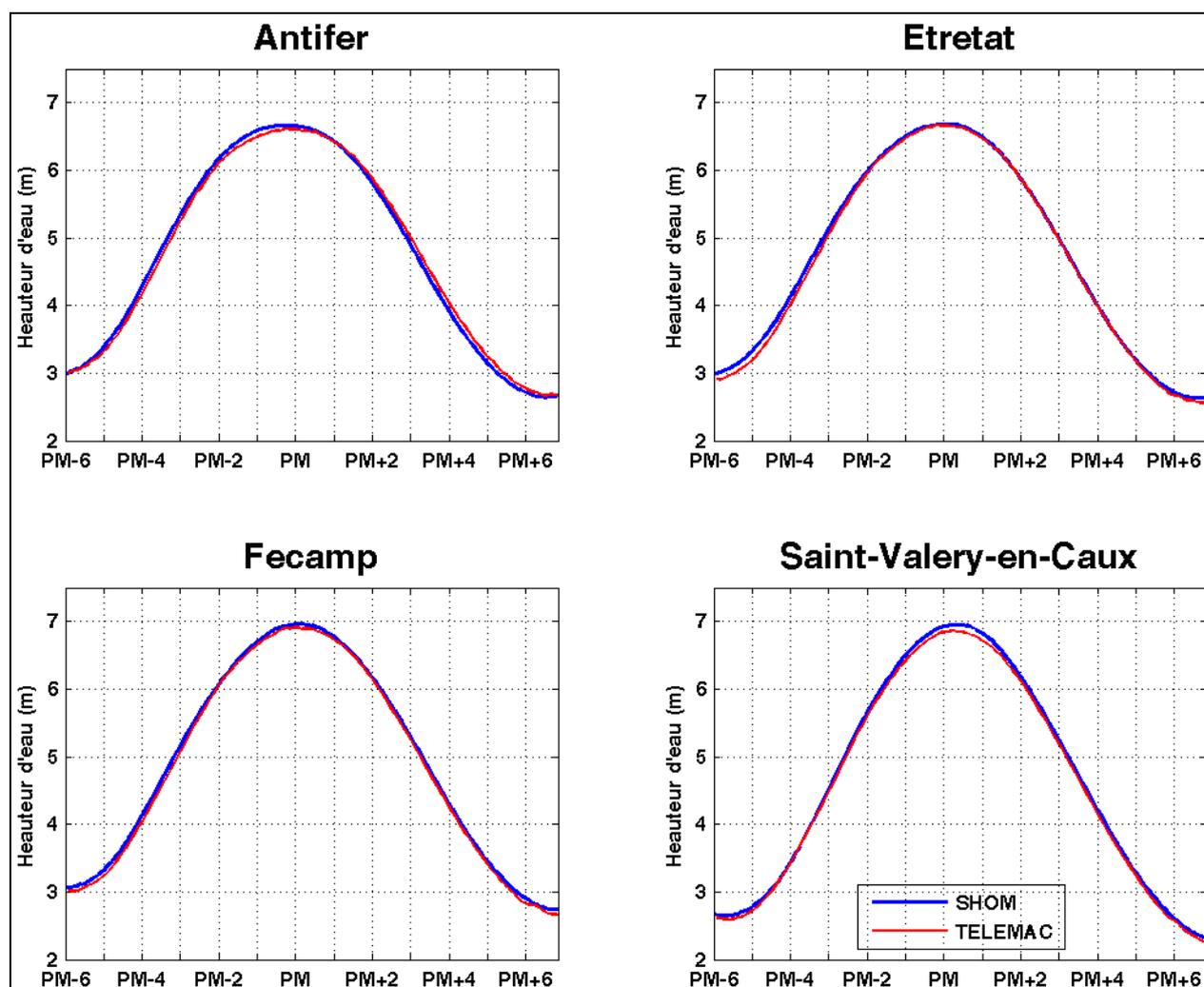


Figure A- 5 : Comparaison des niveaux d'eau entre le modèle hydrodynamique TELEMAC (en rouge) et les mesures du SHOM (en bleu), en condition de marée de morte-eau moyenne (C45).

COURANT

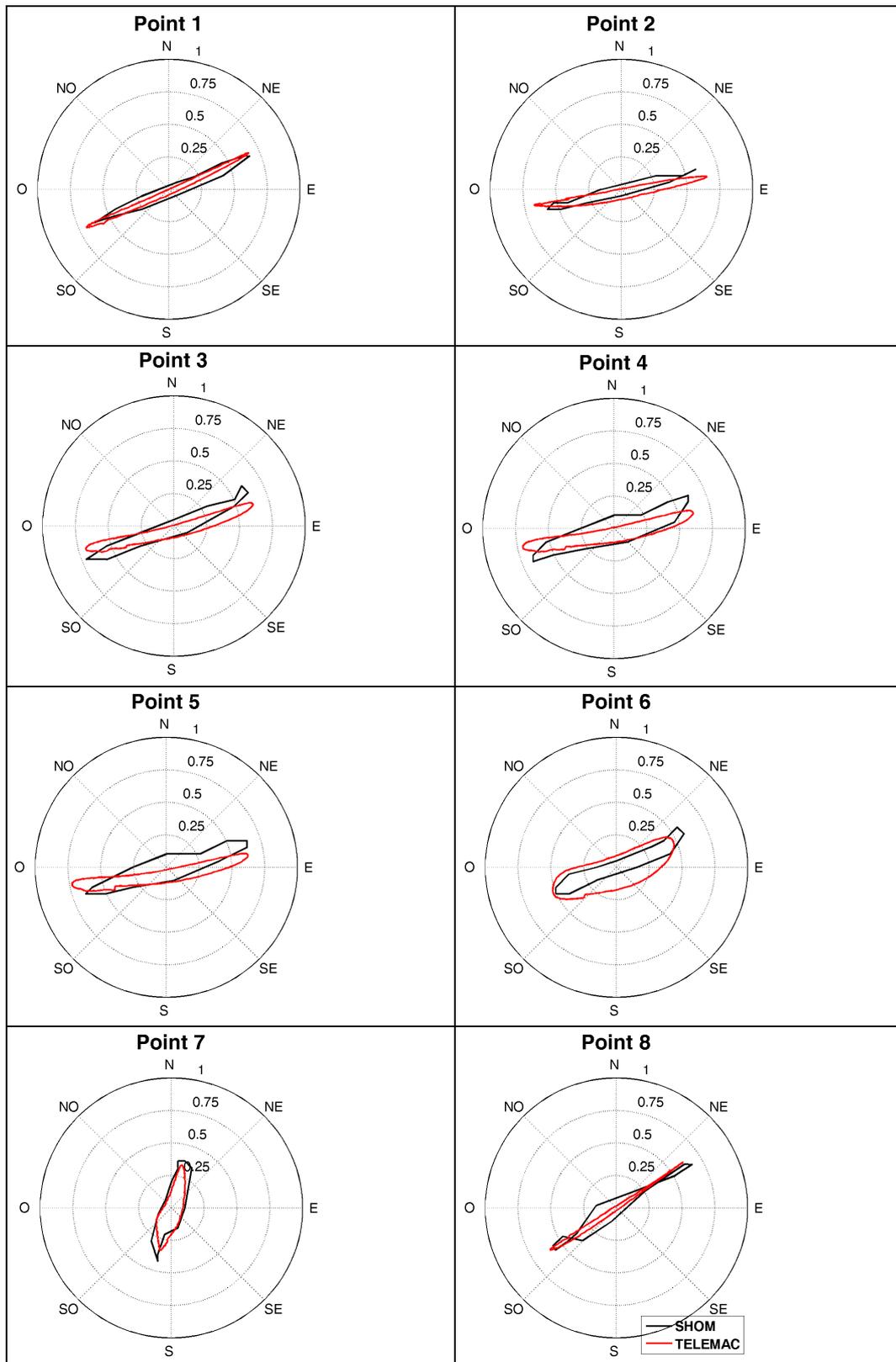


Figure A- 6 : Comparaison des courants de marée entre le modèle hydrodynamique TELEMAC (en rouge) et les courants du SHOM (en noir), pour une marée de morte-eau moyenne (C45).

CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES EN L'ETAT NATUREL

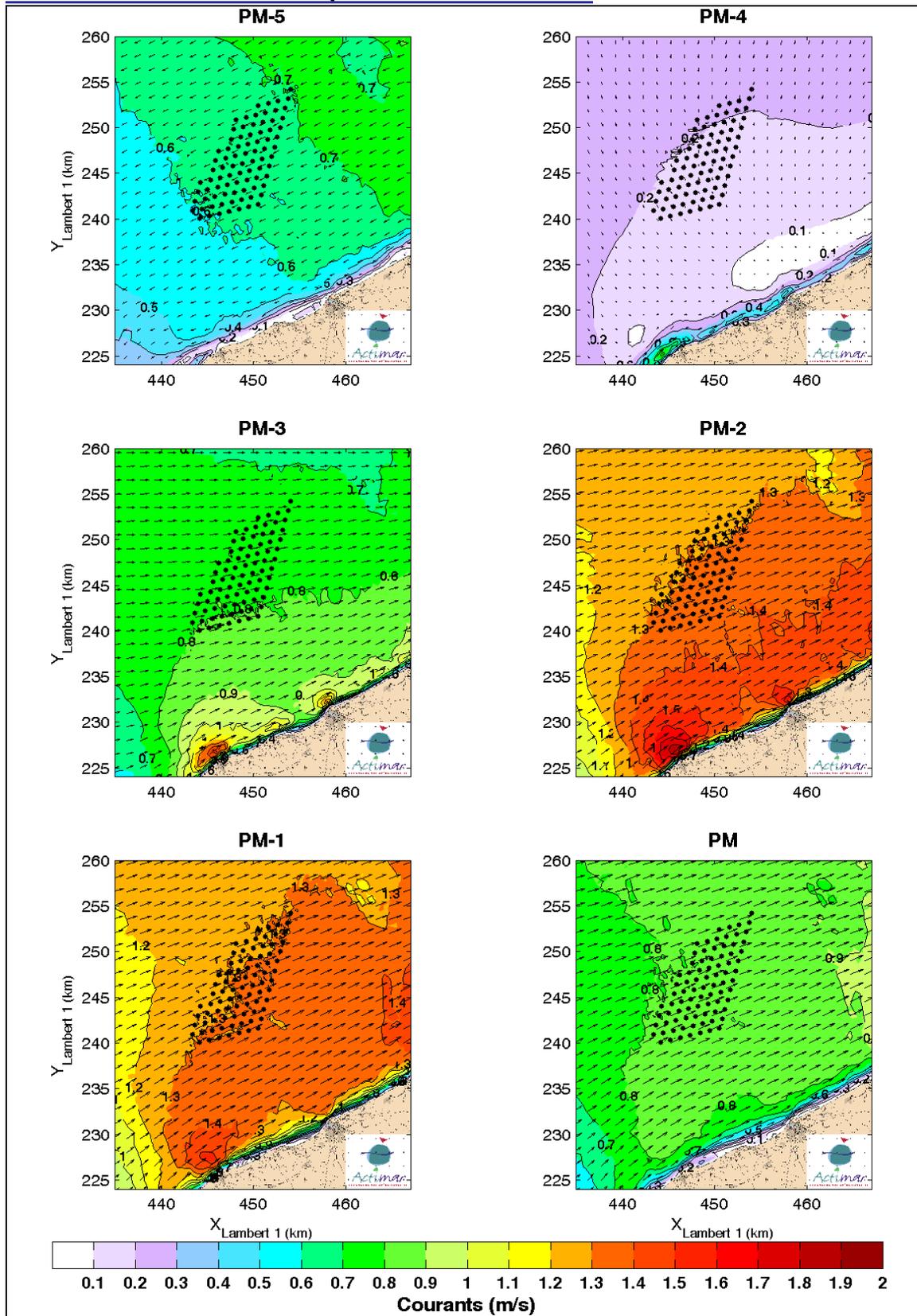


Figure A- 7 : Champs horaires de courant obtenus par modélisation numérique pour une marée de vive-eau moyenne (C95). De PM-5 à PM, Port de référence : Fécamp.

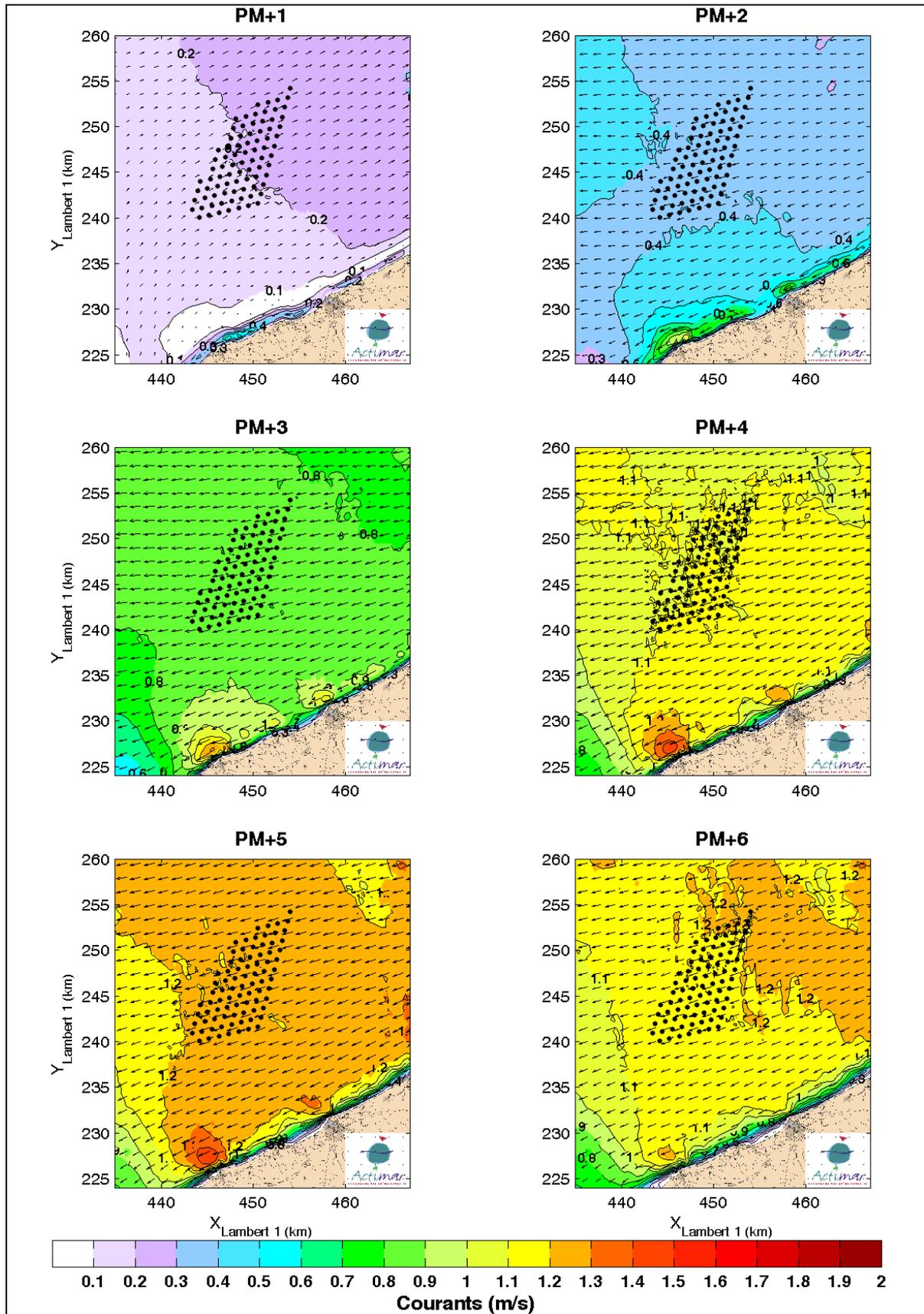


Figure A- 8 : Champs horaires de courant obtenus par modélisation numérique pour une marée de vive-eau moyenne (C95). De PM+1 à PM+6, Port de référence : Fécamp.

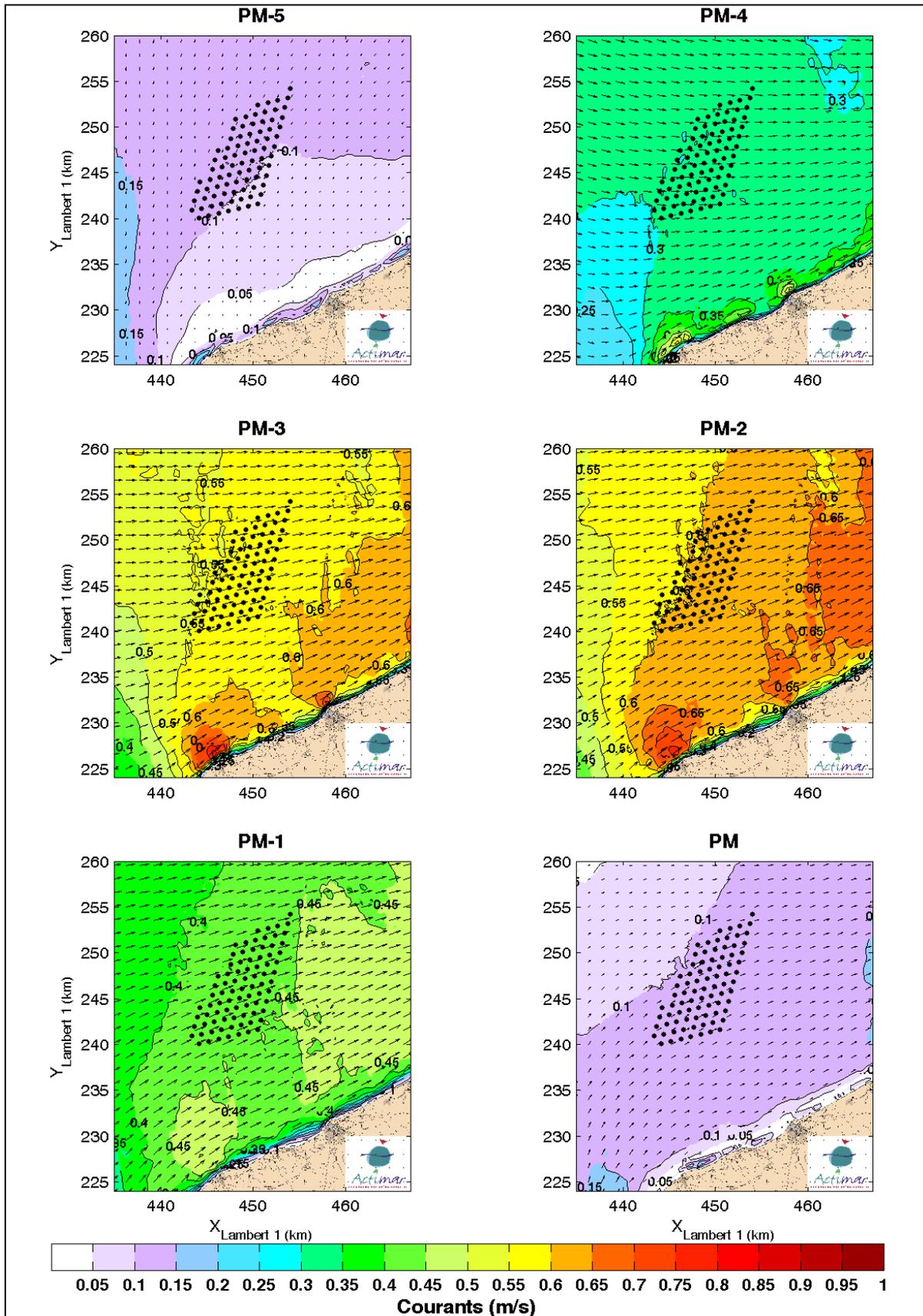


Figure A- 9 : horaires de courant obtenus par modélisation numérique pour une marée de morte-eau moyenne (C45). De PM-5 à PM, Port de référence : Fécamp.

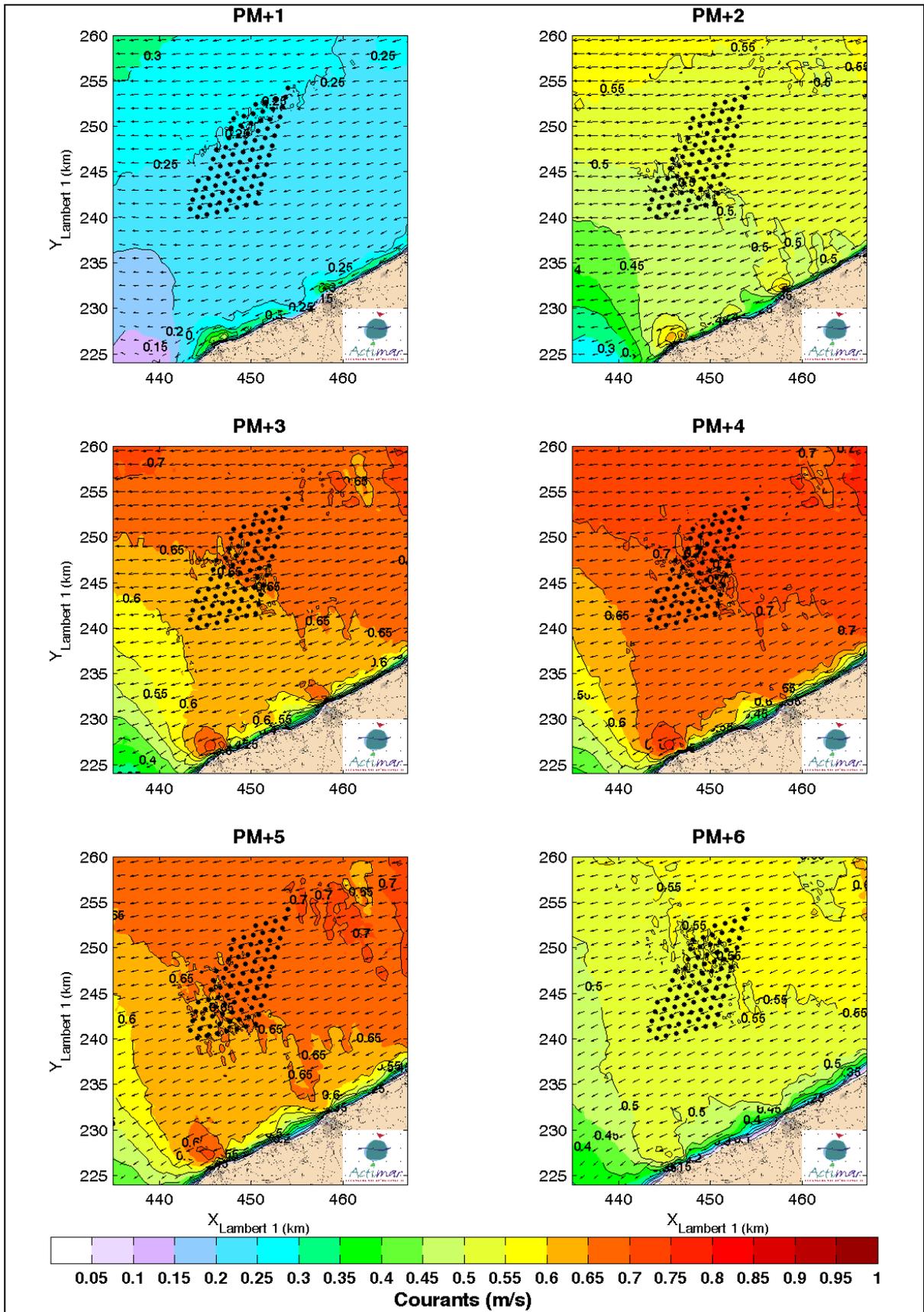


Figure A- 10 : Champs horaires de courant obtenus par modélisation numérique pour une marée de morte-eau moyenne (C45). De PM à PM+6, Port de référence : Fécamp.

Annexe 3.

Impact du parc éolien à l'échelle régionale

MORTE-EAU MOYENNE (C45)

COURANT BAROTROPE

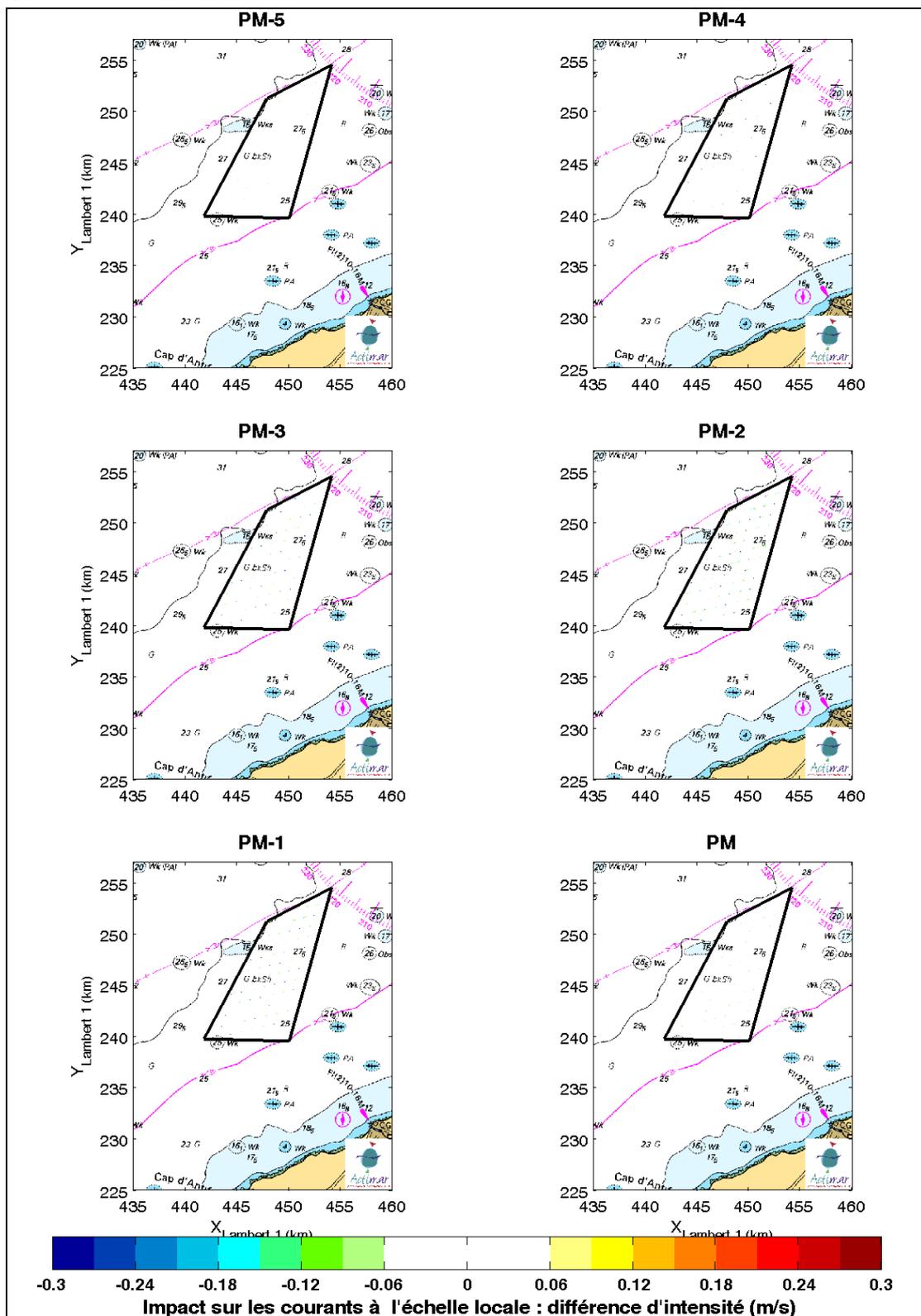


Figure A- 11 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant barotrope au cours du flot d'une morte-eau moyenne (C45). Courant barotrope sur l'état naturel : 0,7 m/s à C45.

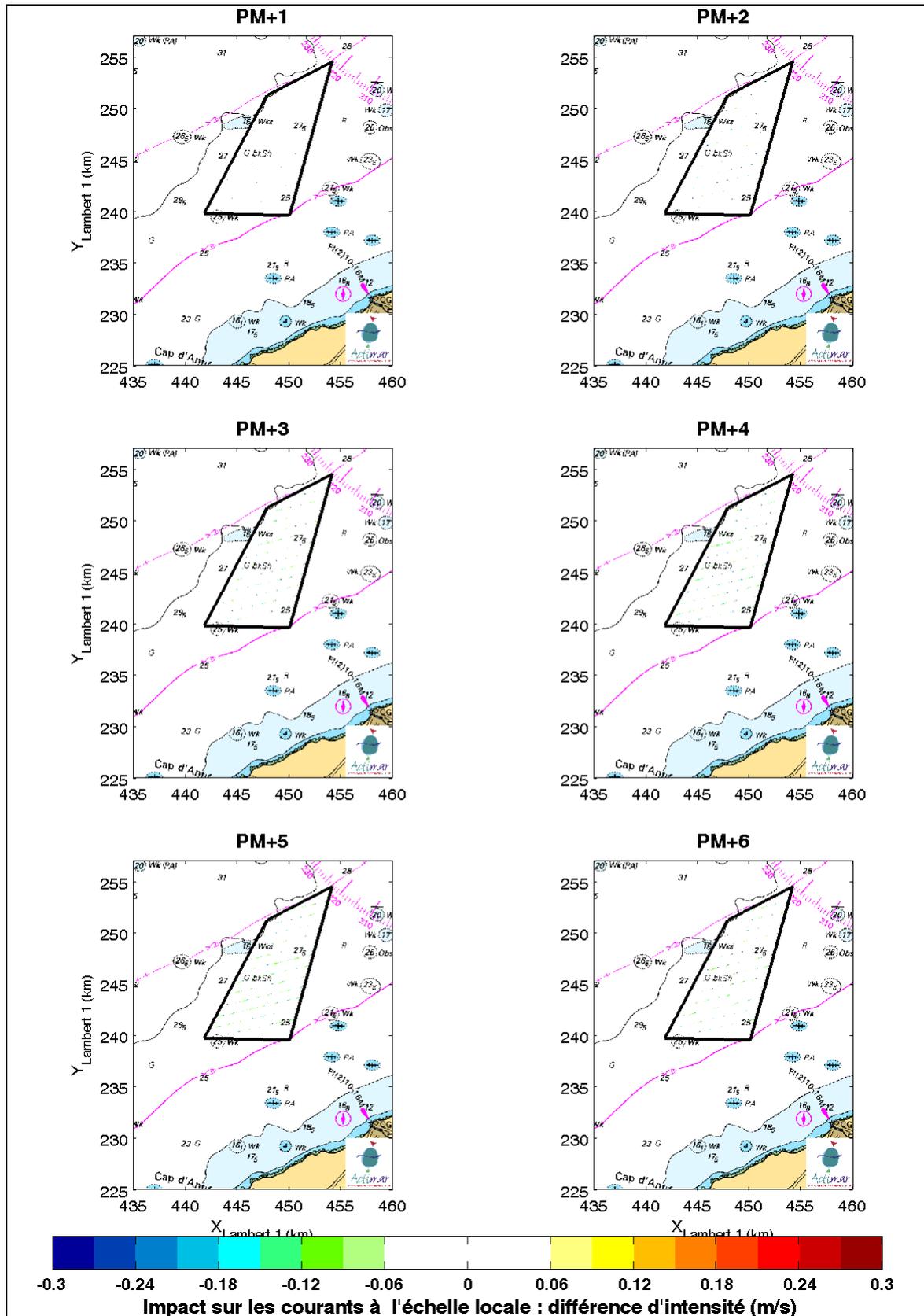


Figure A- 12 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant barotrope au cours du jusant d'une morte-eau moyenne (C45). Courant barotrope maximum sur l'état naturel : 0,7 m/s à C45.

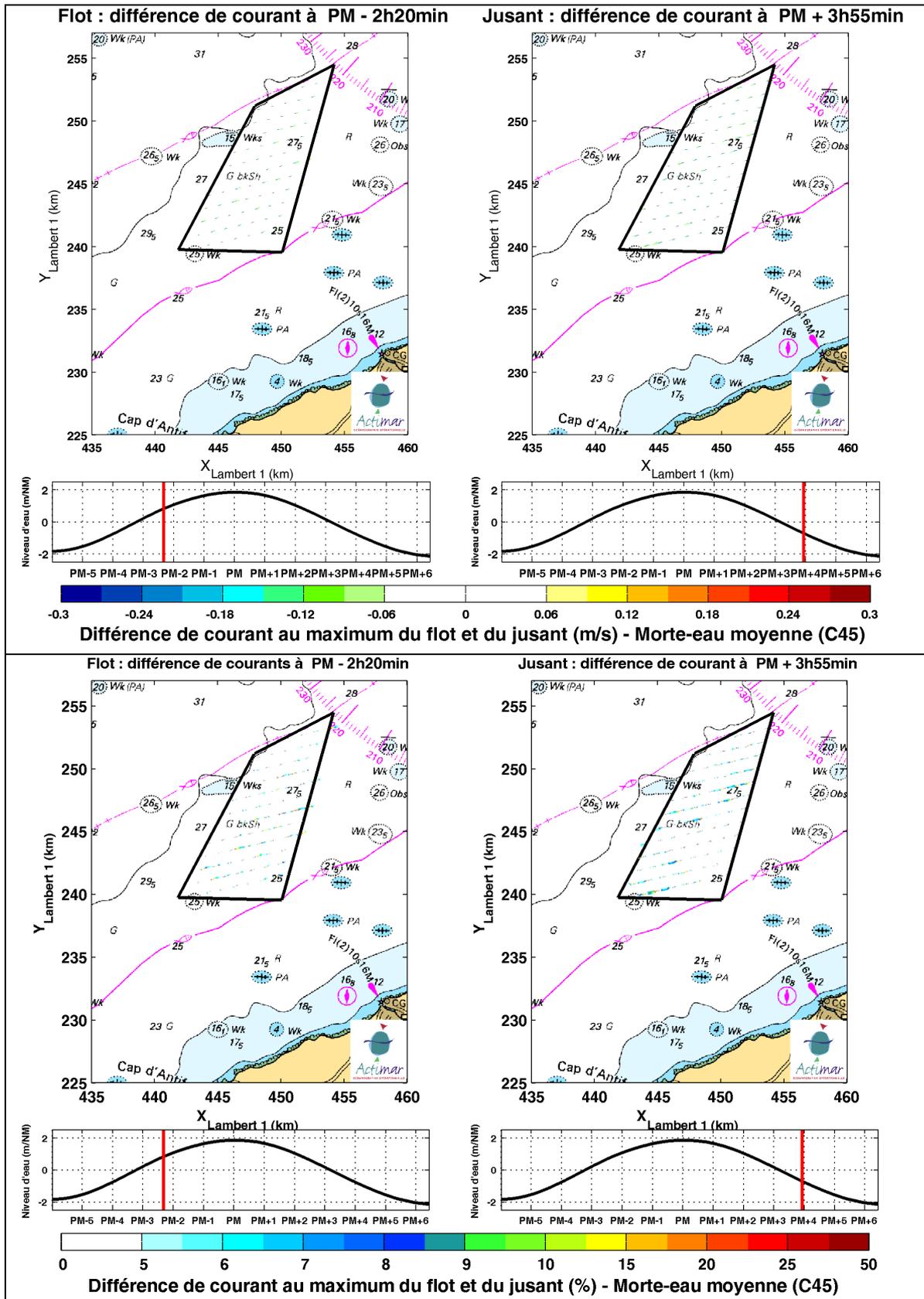


Figure A- 13 : Différences absolues (en m/s, en haut) et relatives (en %, en bas) d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne (C45)

COURANT DE SURFACE

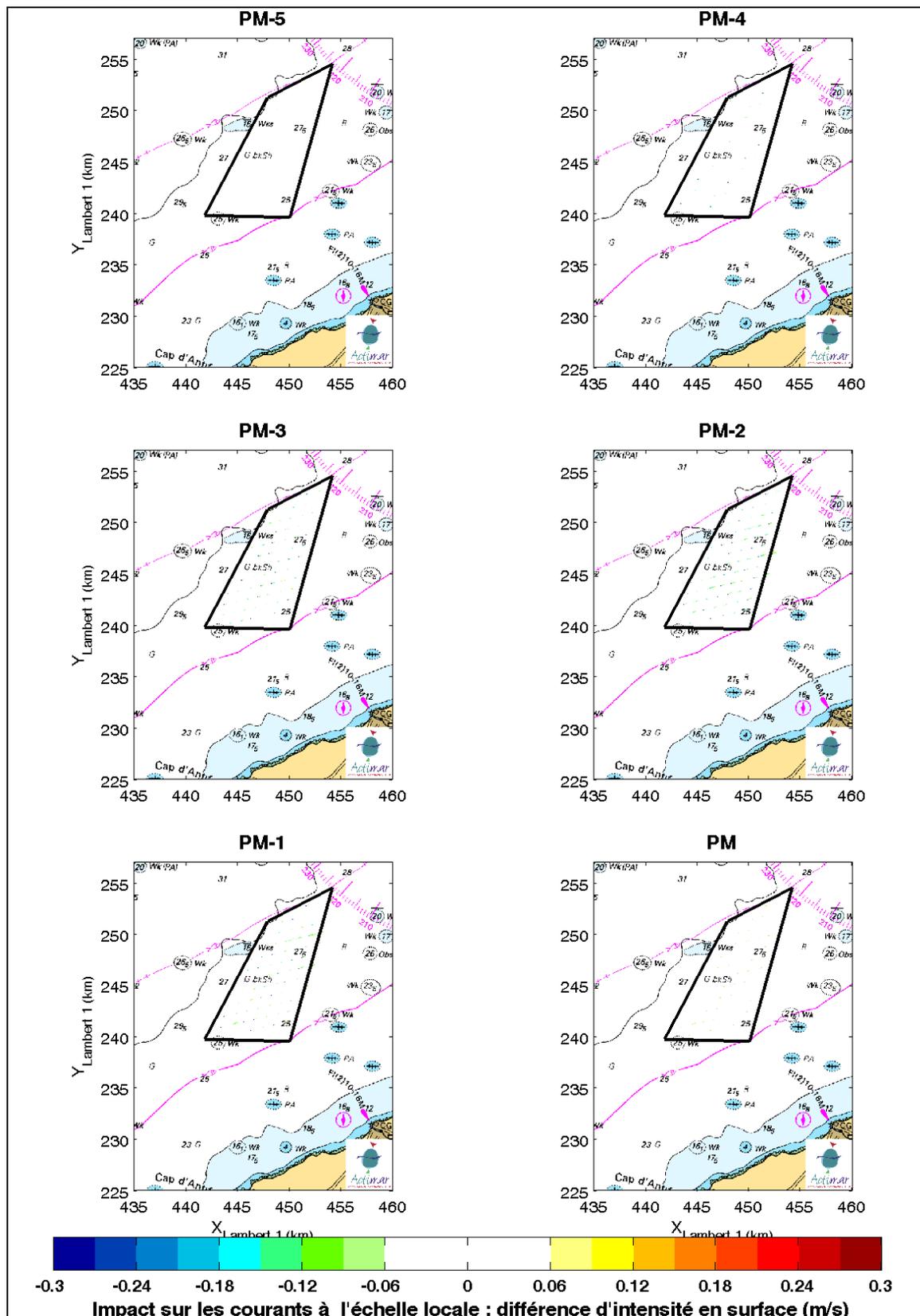


Figure A- 14 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant en surface au cours du flot d'une morte-eau moyenne (C45). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C45.

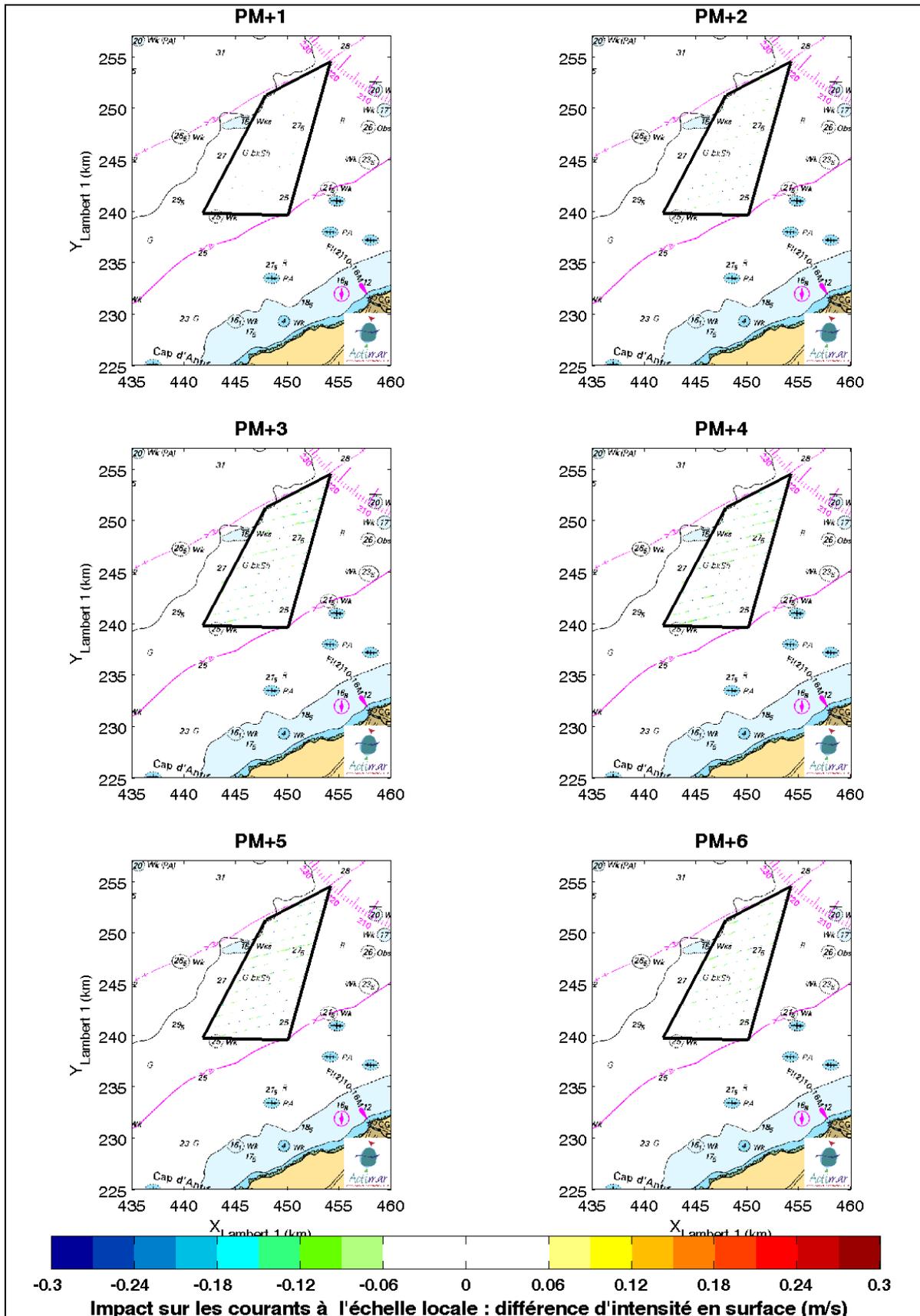


Figure A- 15 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant en surface au cours du jusant d'une morte-eau moyenne (C45). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C45.

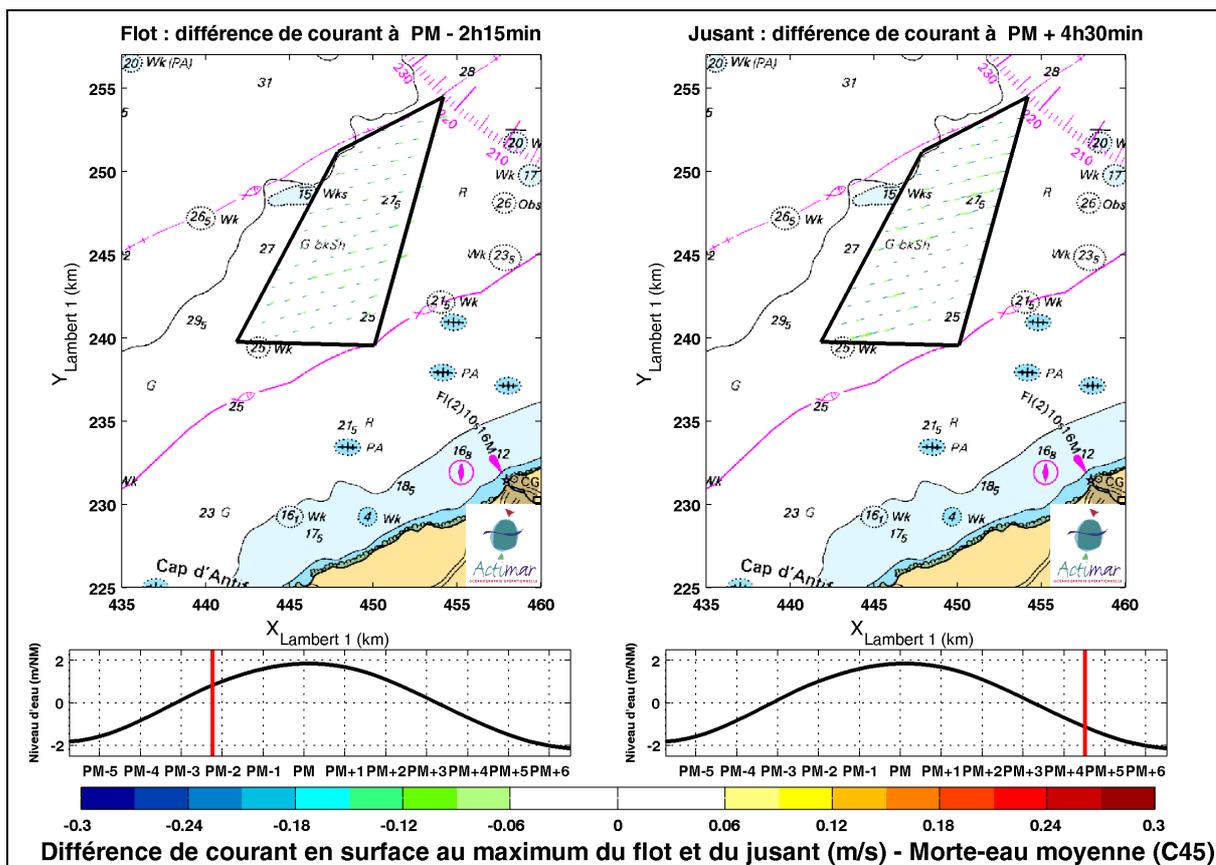


Figure A- 16 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne (C45). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C45.

COURANT DE FOND

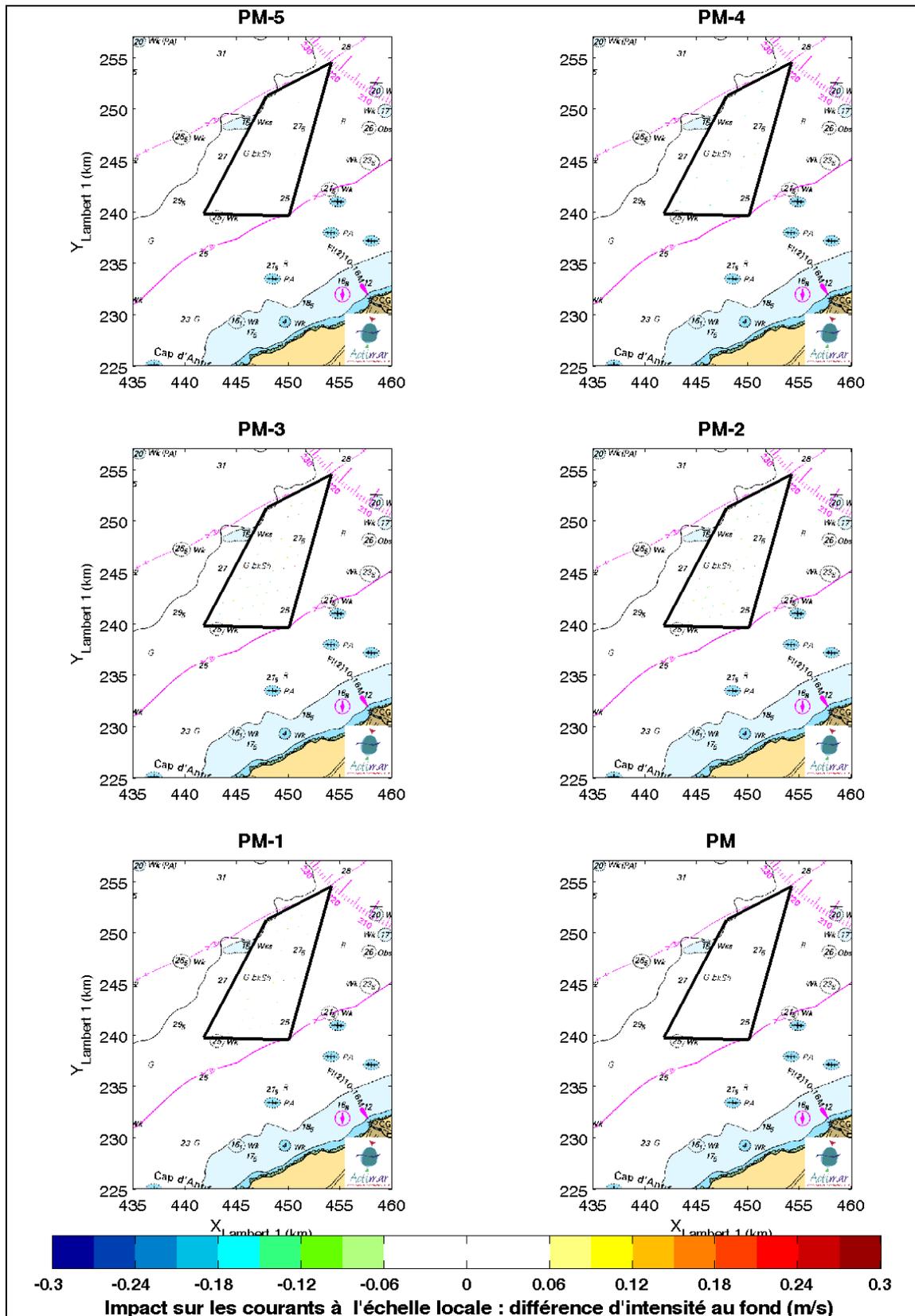


Figure A-17 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant au fond au cours du flot d'une morte-eau moyenne (C45). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,3 m/s à C45.

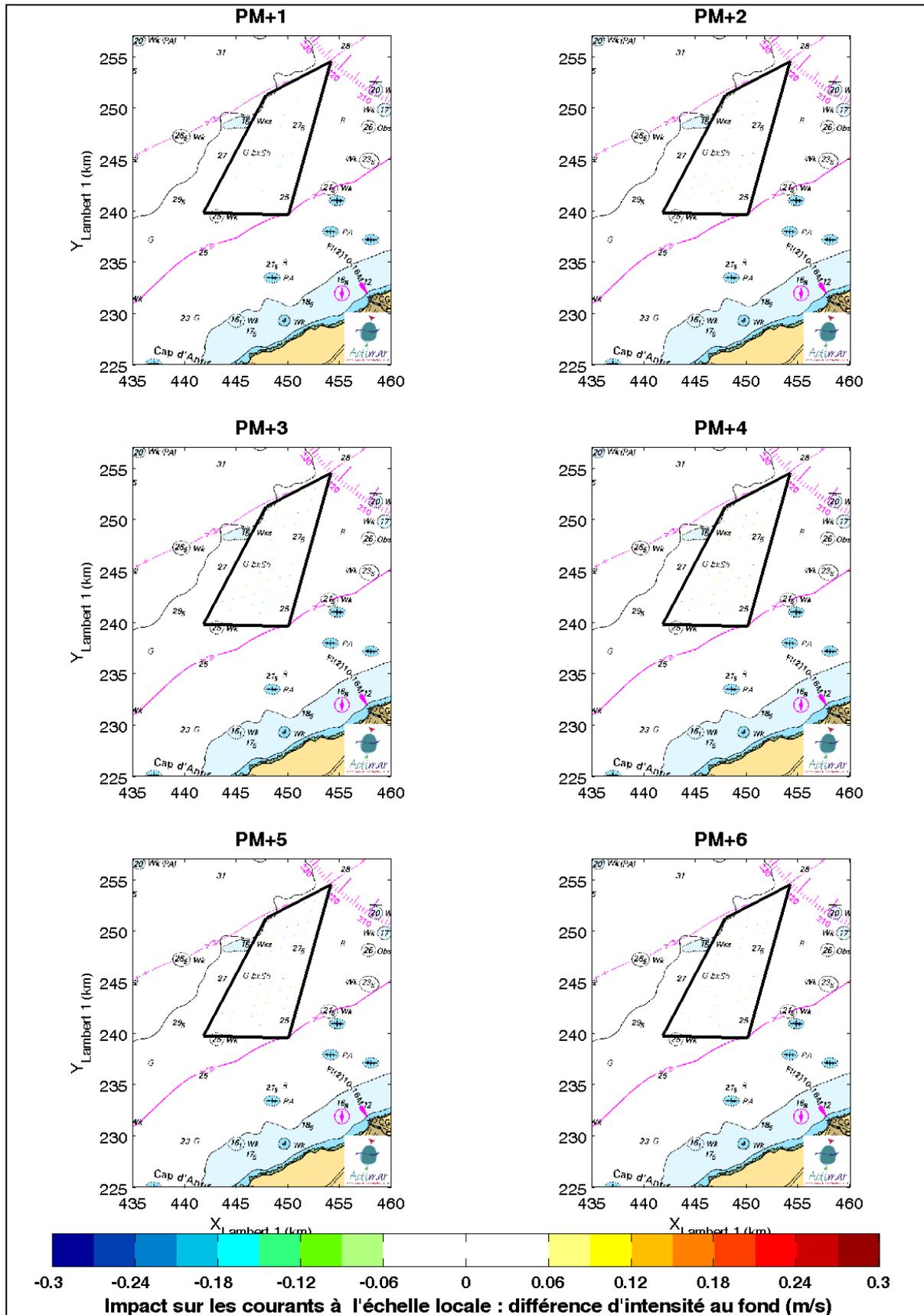


Figure A-18 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant au fond au cours du jusant d'une morte-eau moyenne (C45). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,3 m/s à C45.

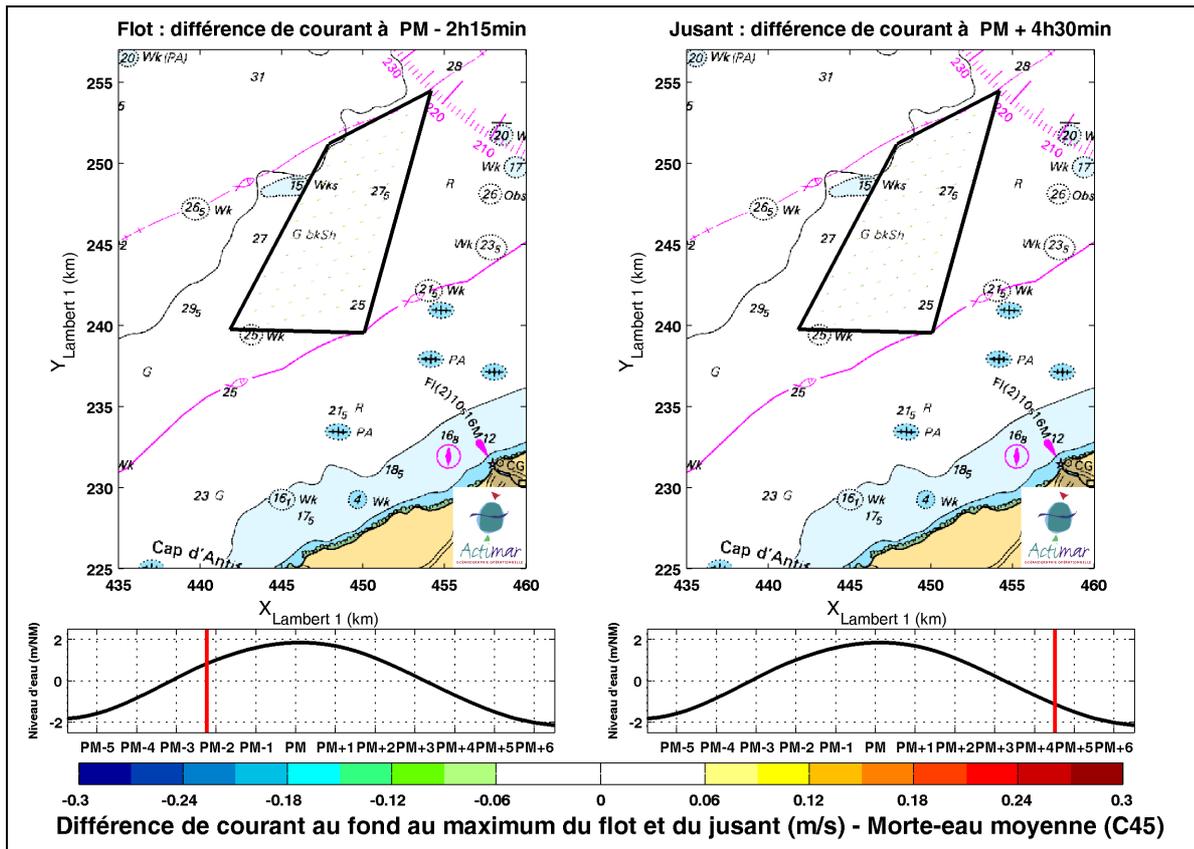


Figure A-19 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne (C45). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,3 m/s à C45.

VIVE-EAU MOYENNE (C95)

COURANT BAROTROPE

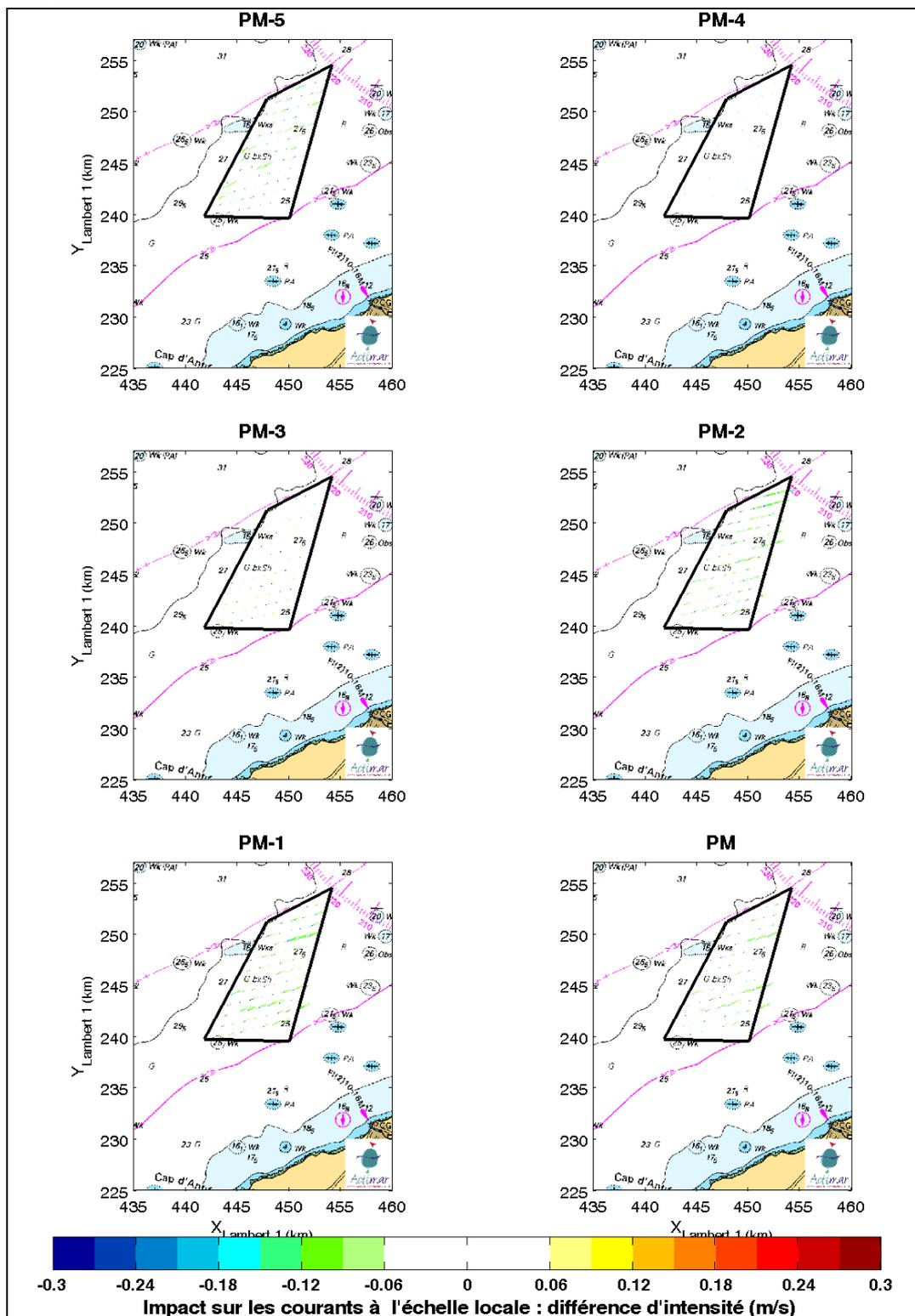


Figure A- 20 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant barotrope au cours du flot d'une vive-eau moyenne (C95). Courant barotrope maximum sur l'état naturel : 1,4 m/s à C95.

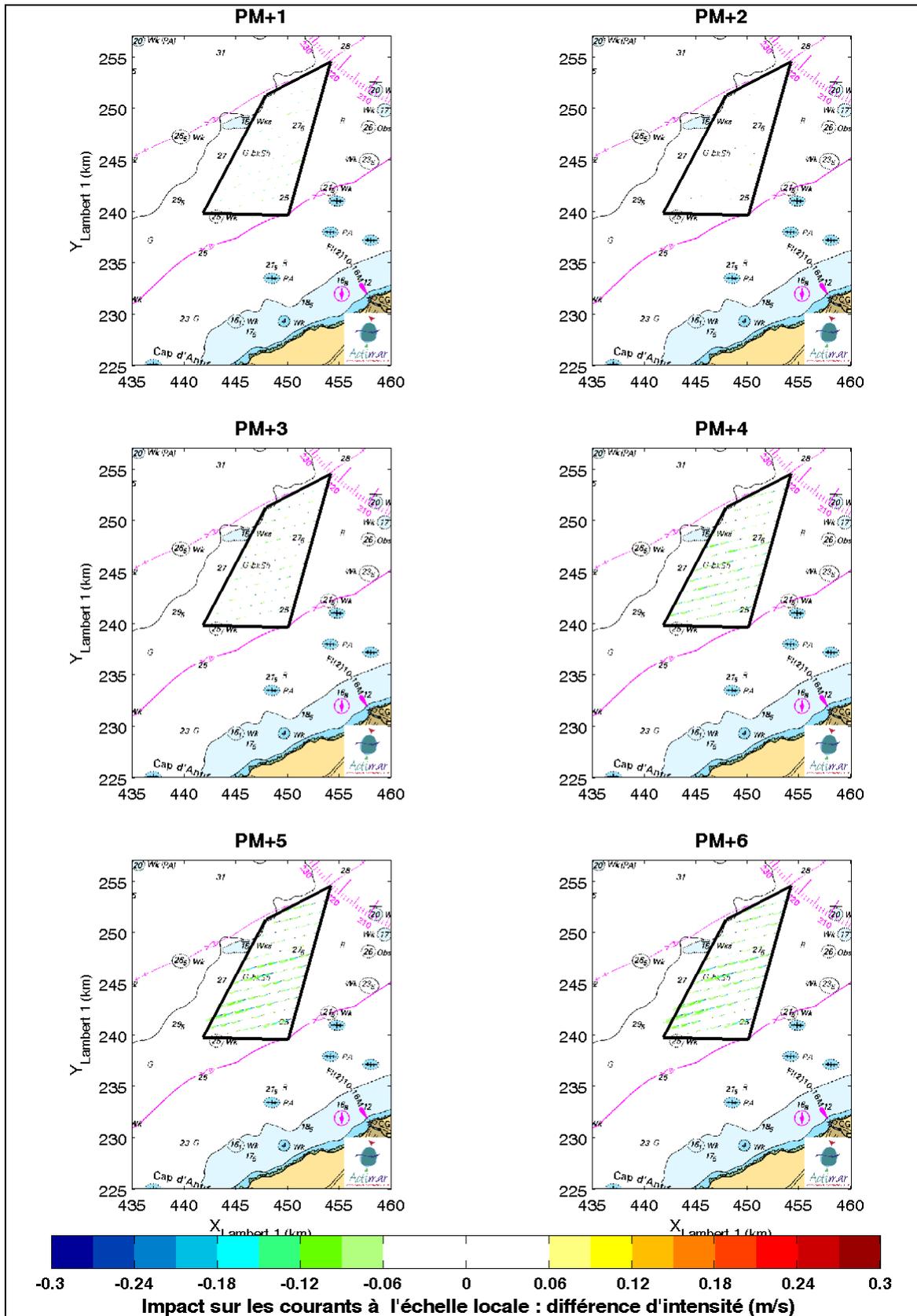


Figure A- 21 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant barotrope au cours du jusant d'une vive-eau moyenne (C95). Courant barotrope maximum sur l'état naturel : 1,4 m/s à C95.

COURANT DE SURFACE

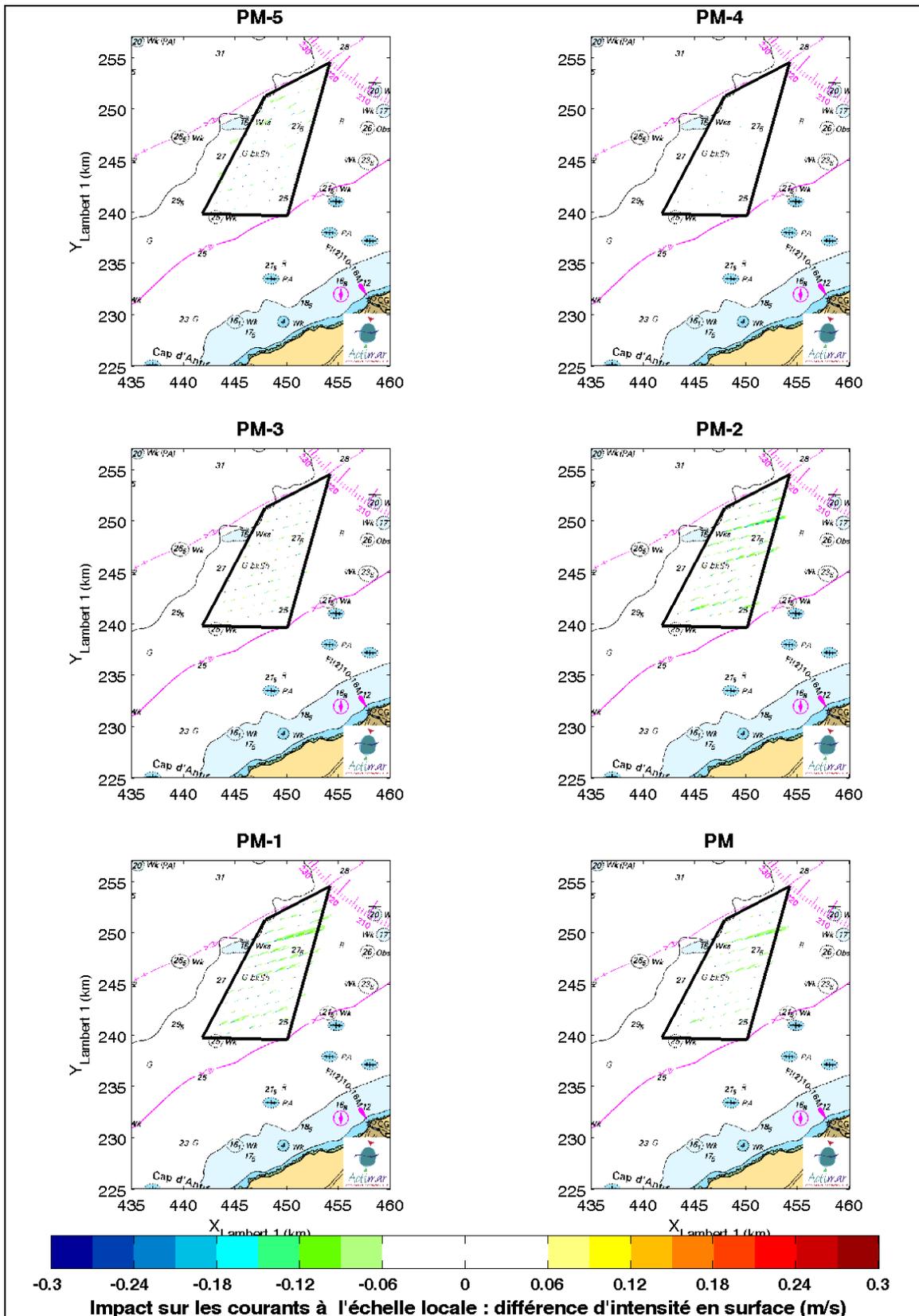


Figure A- 22 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant en surface au cours de la flot d'une vive-eau moyenne (C95). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 1,6 m/s à C95.

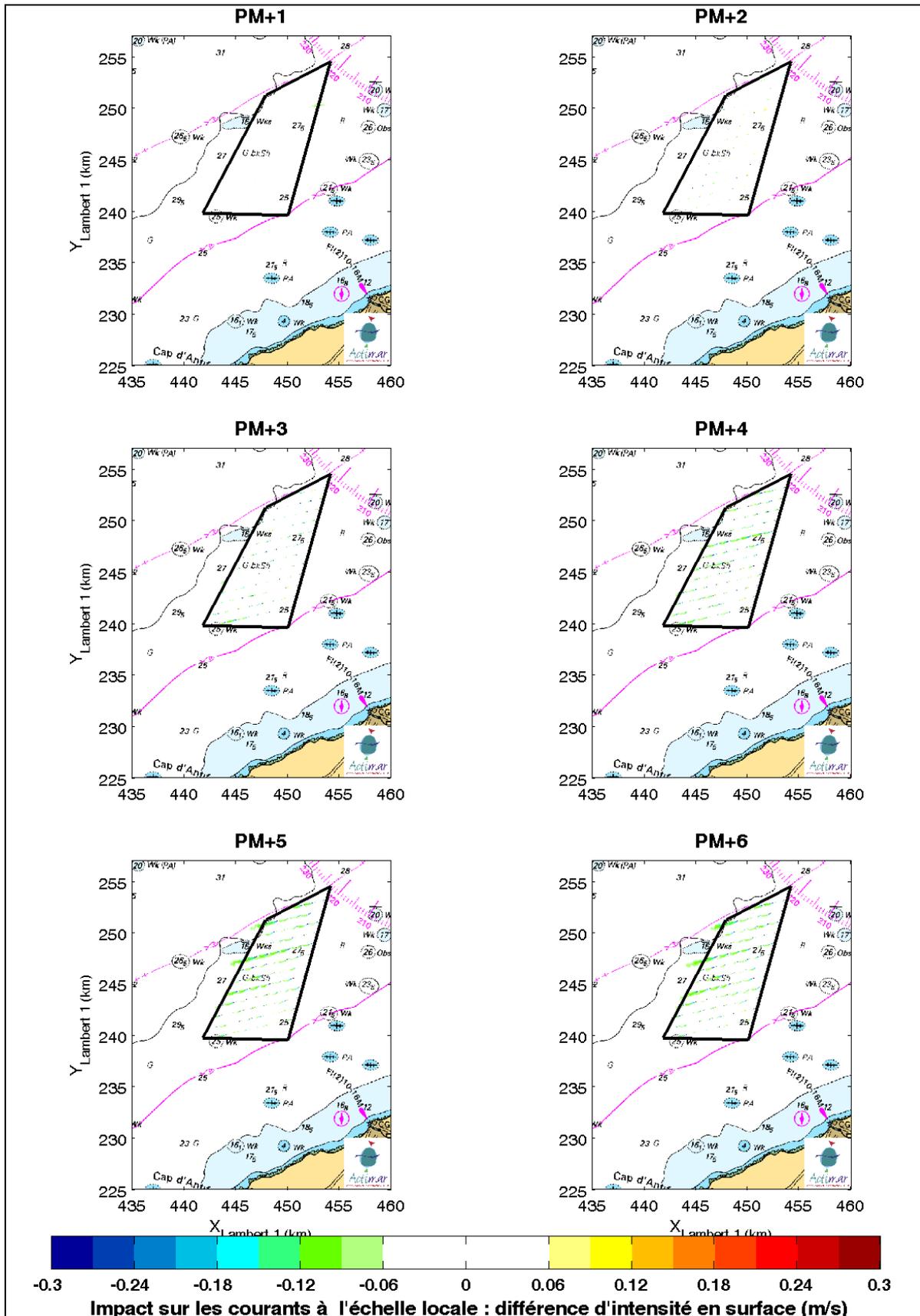


Figure A- 23 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant en surface au cours du jusant d'une vive-eau moyenne (C95). Courant de surface maximum sur l'état naturel : 1,6 m/s à C95.

COURANT DE FOND

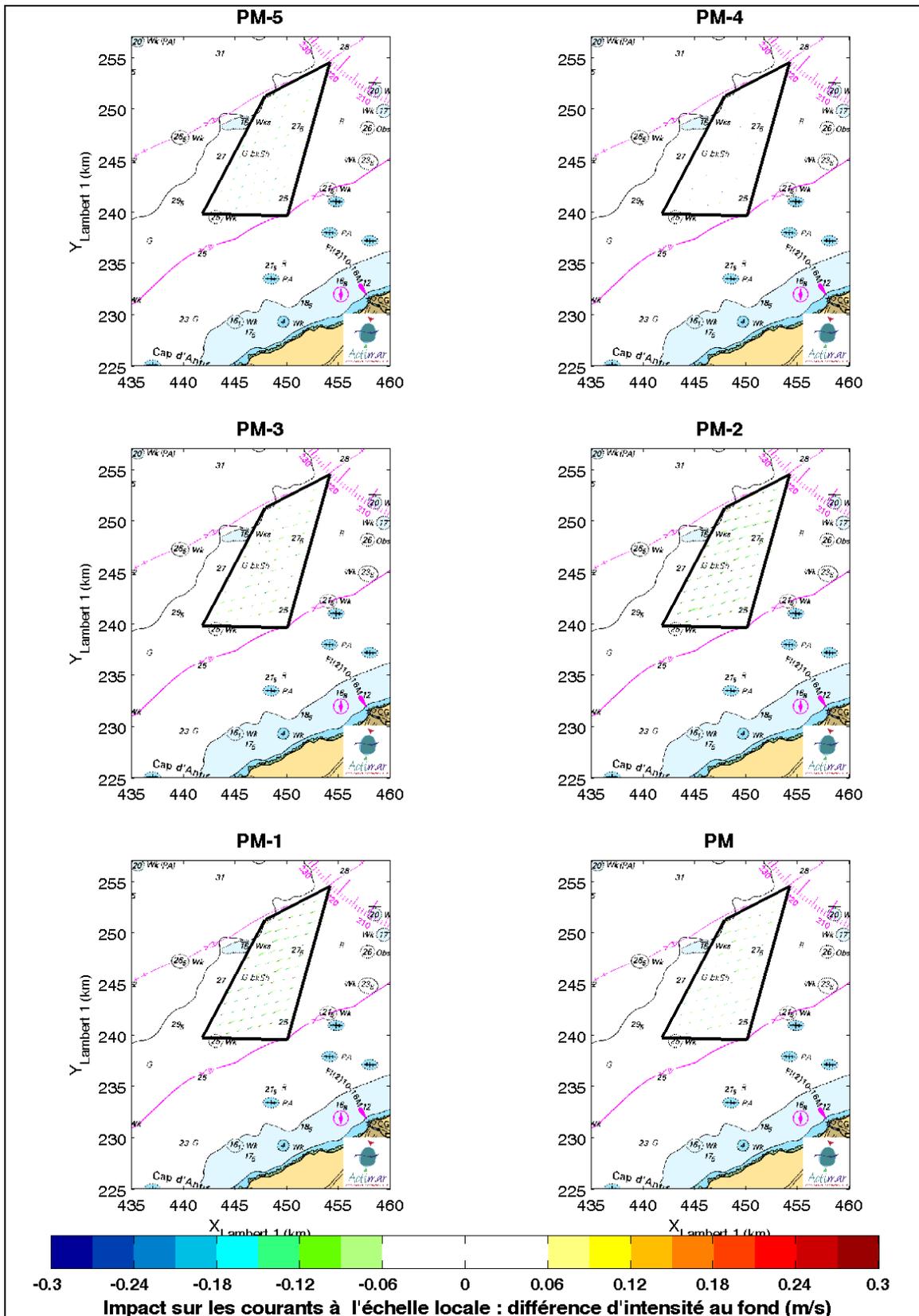


Figure A- 24 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant au fond au cours du flot d'une vive-eau moyenne (C95). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C95.

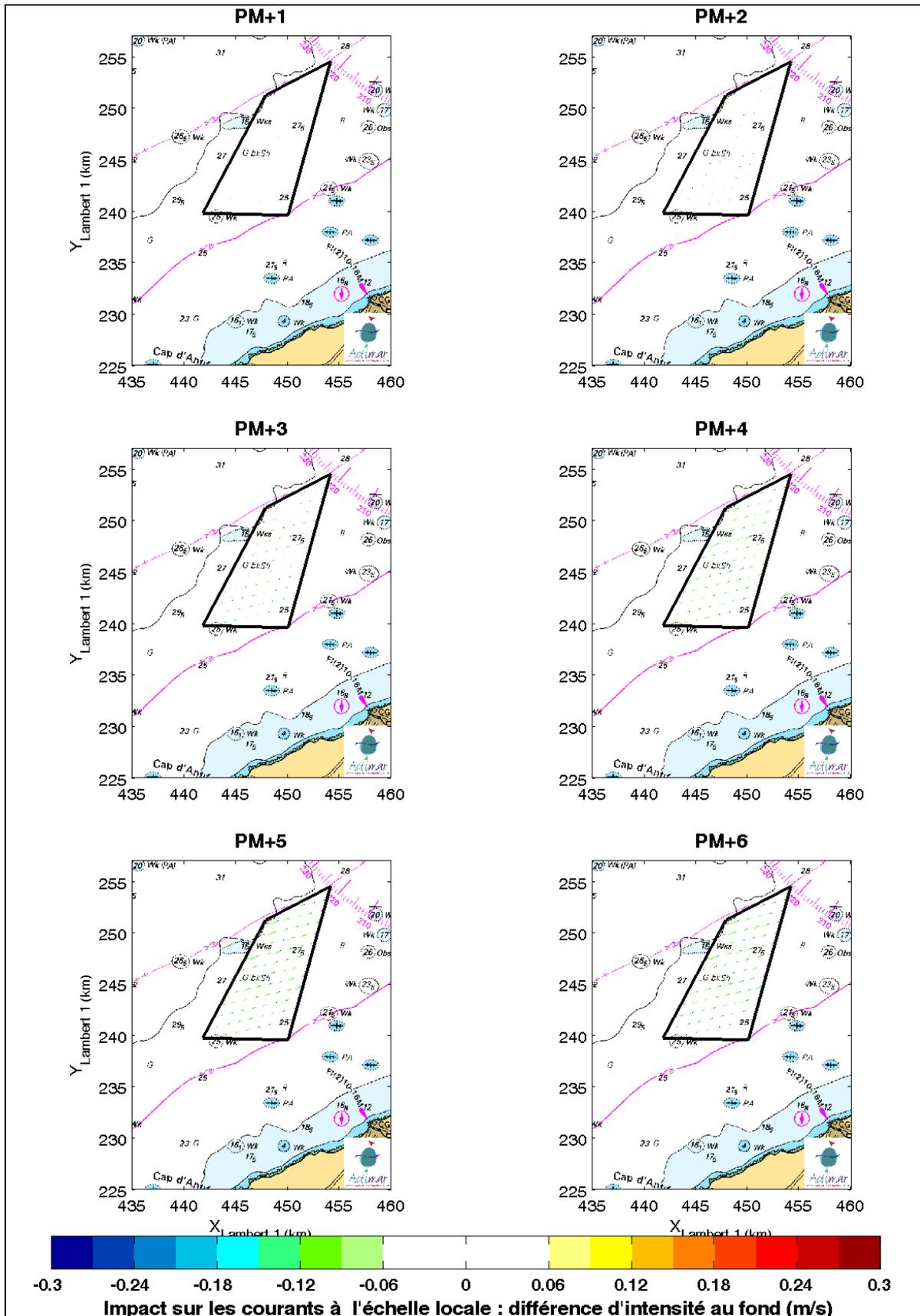


Figure A- 25 : Champs instantanés horaires de différence de l'intensité du courant au fond au cours du jusant d'une vive-eau moyenne (C95). Courant de fond maximum sur l'état naturel : 0,9 m/s à C95.

Annexe 4.

Impact du parc éolien à l'échelle locale

MORTE-EAU MOYENNE

COURANT BAROTROPE

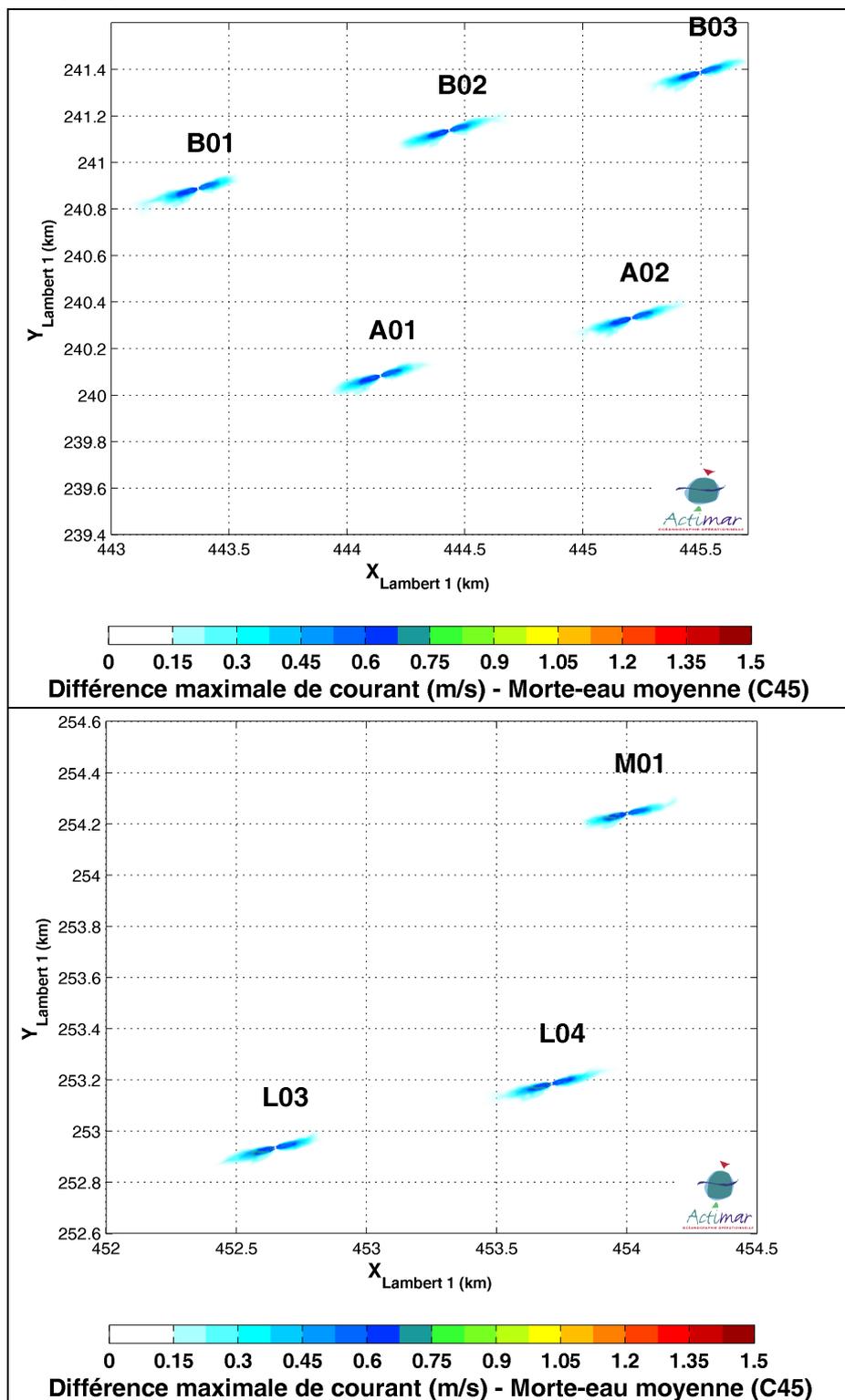


Figure A- 26 : Différences maximales d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

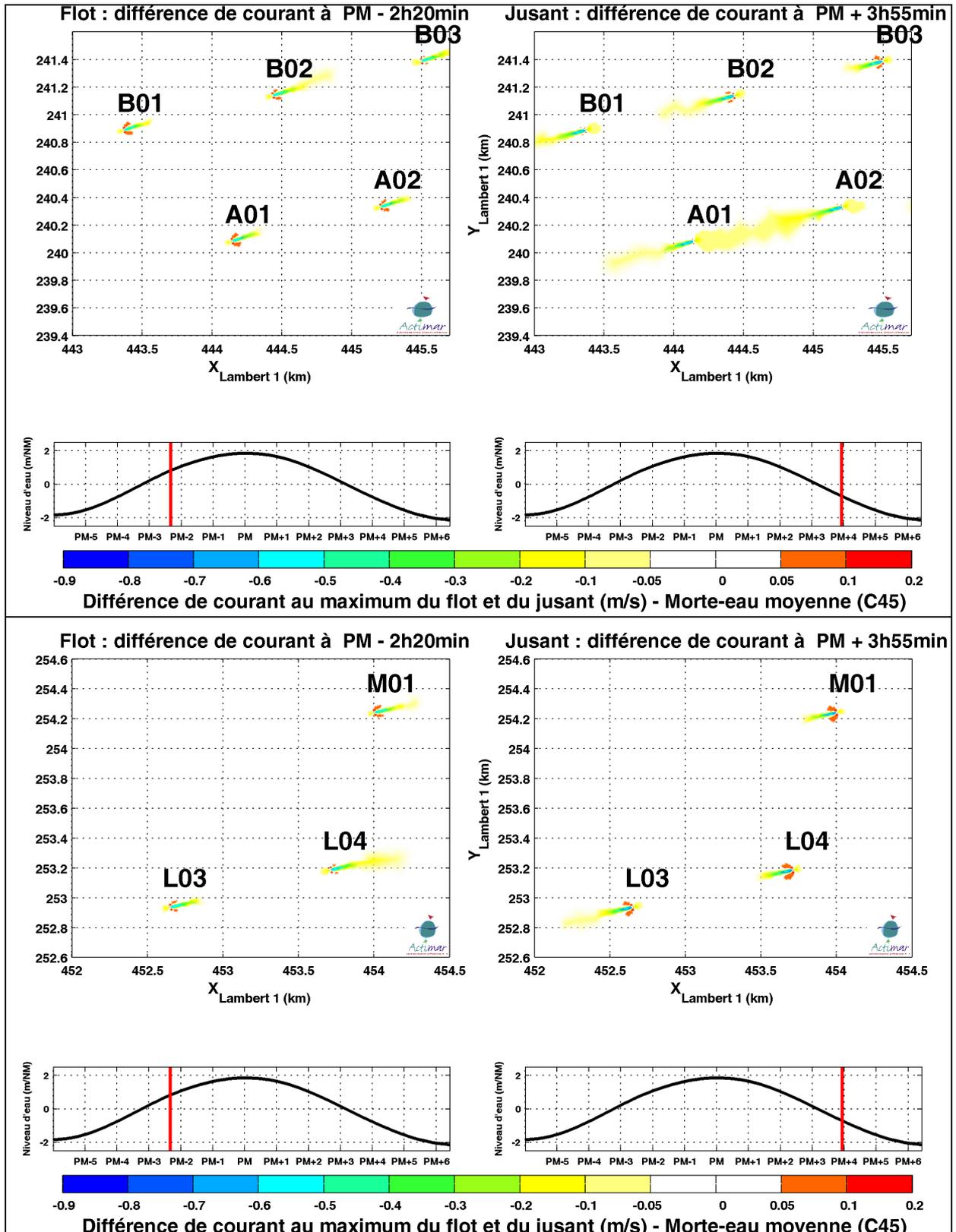


Figure A- 27 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant barotrope pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

COURANT DE SURFACE

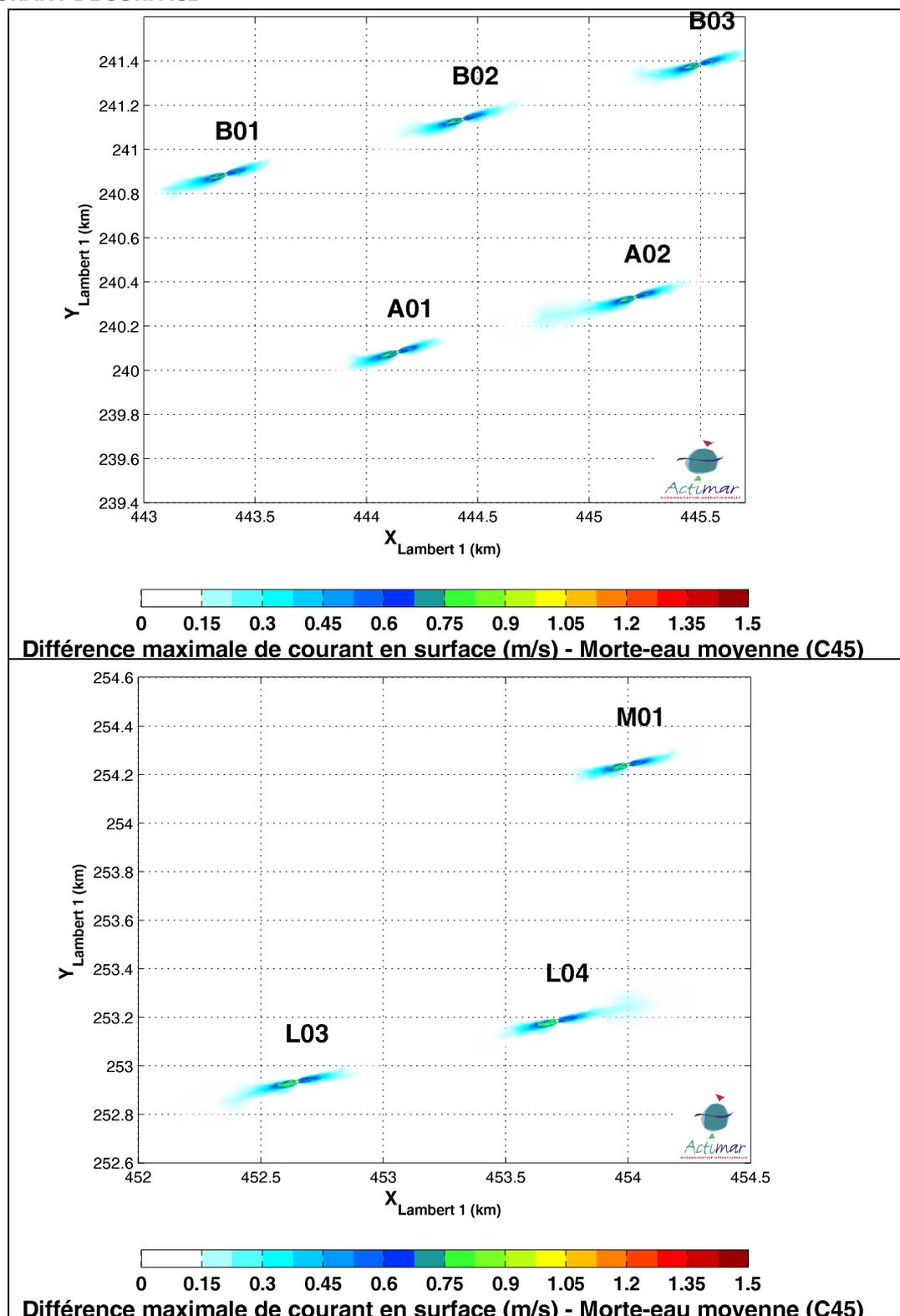


Figure A- 28 : Différences maximales d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

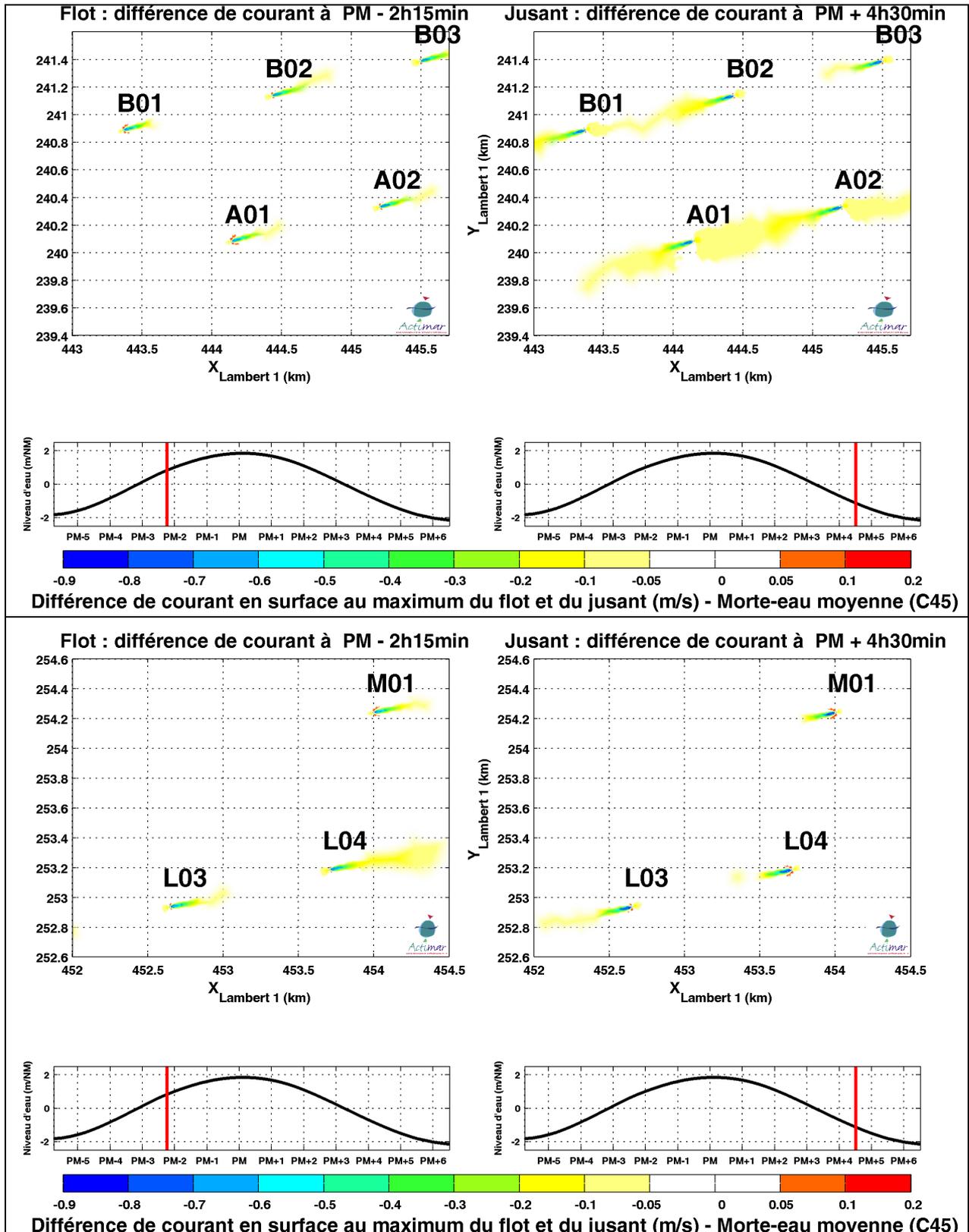


Figure A- 29 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant en surface pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

COURANT DE FOND

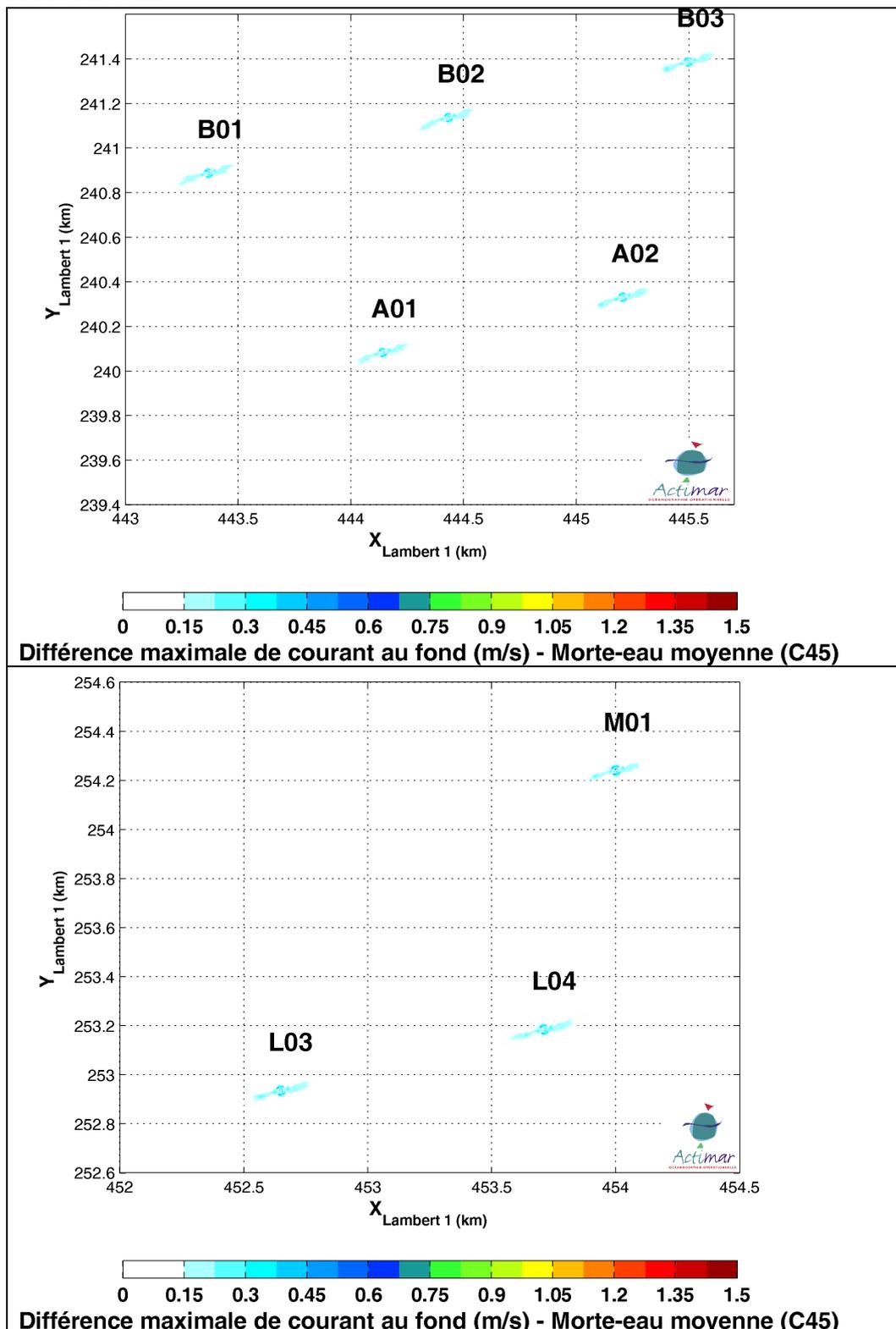


Figure A- 30 : Différences maximales d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations. Ecart absolu maximal (m/s) sur une marée de morte-eau moyenne pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

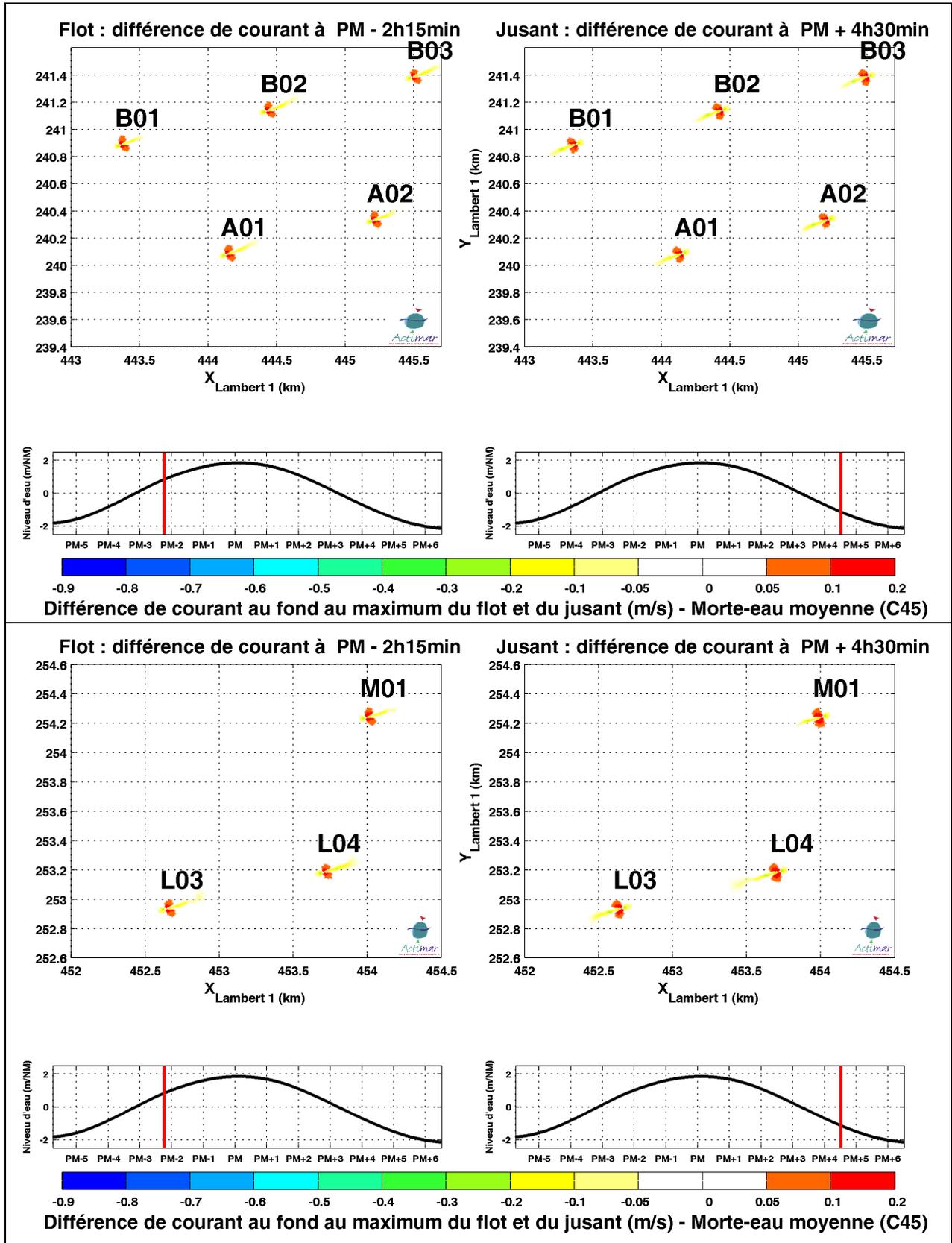


Figure A- 31 : Différences absolues (en m/s) d'intensités du courant au fond pour les fondations gravitaires à l'échelle locale des fondations, au maximum du flot (à gauche) et du jusant (à droite) pour une marée de morte-eau moyenne et pour la partie sud ouest du parc (en haut) et nord est (en bas).

Fin du rapport