

Société Parc du banc de Guérande



# PARC EOLIEN DU BANC DE GUERANDE

**LOT : HYDRODYNAMISME - HYDROSEDIMENTAIRE**

**FONDATEMENTS MONOPIEU DIAMETRE 7 M**

**RAPPORT**

ARTELIA Eau & Environnement

**Branche MARITIME**

6 rue de Lorraine

38130 - Echirolles

Tel. : +33 (0) 4 76 33 40 00

Fax : +33 (0) 4 76 33 43 33



---

**DATE : 14FEVRIER 2014    REF : 8713352 -L2-V0**

ARTELIA, L'union de Coteba et Sogreah

N° 8713352-L2 – Parc Eolien du Banc de Guérande – Lot hydrodynamisme - hydrosédimentaire					
Version	Description	Rédaction	Vérifié	Approuvé	Date
L2-v0	Première version	SAL	SLX	SLX	18/02/2014

## SOMMAIRE

<b>OBJET DE L'ETUDE</b>	<b>I</b>
<b>SYNTHESE ET CONCLUSIONS</b>	<b>II</b>
<b>SUMMARY AND CONCLUSIONS</b>	<b>VI</b>
<b>LISTE DES ABBREVIATIONS</b>	<b>IX</b>
<b>1. DONNEES DE BASE</b>	<b>1</b>
<b>1.1. DEFINITION DES ZONES D'ETUDE</b>	<b>1</b>
<b>1.2. SCHEMA D'IMPLANTATION DES EOLIENNES ET SOUS-STATION</b>	<b>2</b>
1.2.1. EOLIENNES	2
1.2.2. SOUS-STATION	3
<b>1.3. REFERENCEMENT ALTIMETRIQUE ET PLANIMETRIQUE</b>	<b>3</b>
<b>1.4. NIVEAUX DE REFERENCE</b>	<b>4</b>
<b>1.5. BATHYMETRIE</b>	<b>4</b>
1.5.1. BATHYMETRIE DE LA ZONE D'ETUDE ETENDUE	4
1.5.2. BATHYMETRIE DE LA ZONE DE PROJET	5
<b>2. IMPACT SUR L'HYDRODYNAMIQUE</b>	<b>8</b>
<b>2.1. DESCRIPTION DU REGIME HYDRODYNAMIQUE</b>	<b>8</b>
<b>2.2. METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DES IMPACTS</b>	<b>9</b>
<b>2.3. SYSTEME DE MODELISATION</b>	<b>9</b>
<b>2.4. MISE EN ŒUVRE DES MODELES HYDRODYNAMIQUES</b>	<b>9</b>
2.4.1. MODELE HYDRODYNAMIQUE DE GRANDE EMPRISE	10
2.4.2. DESCRIPTION DES MODELES HYDRODYNAMIQUES LOCAUX	11
2.4.2.1. Emprise et bathymétrie	11
2.4.2.2. Maillage	13
2.4.2.3. Conditions limites	15
2.4.3. CALAGE DU MODELE HYDRODYNAMIQUE LOCAL (ETAT ACTUEL)	15
<b>2.5. RESULTATS</b>	<b>19</b>
2.5.1. EXPLOITATION DES MODELES	19
2.5.2. INTENSITE ET DIRECTION DES COURANTS	21
2.5.3. IMPACT DES FONDATIONS D'EOLIENNES	23
2.5.3.1. Impact à l'échelle d'une fondation	23
2.5.3.2. Impact à l'échelle du parc	23
2.5.3.3. Impact à l'échelle régionale	28
2.5.4. BILAN DES IMPACTS SUR LES NIVEAUX ET COURANTS	29

<b>3. IMPACT SUR L'AGITATION</b>	<b>30</b>
<b>3.1. DESCRIPTION DU REGIME D'AGITATION</b>	<b>30</b>
3.1.1. AU LARGE DU SITE	30
3.1.2. SUR LE SITE	32
<b>3.2. IMPACT DES EOLIENNES SUR L'AGITATION A L'ECHELLE LOCALE</b>	<b>34</b>
3.2.1. PREAMBULE	34
3.2.1.1. Paramètre de diffraction D/L	35
3.2.1.2. Nombre de Keulegan-Carpenter	35
3.2.2. APPLICATION SUR LA ZONE DE PROJET	36
<b>3.3. IMPACT DES EOLIENNES SUR L'AGITATION A L'ECHELLE REGIONALE</b>	<b>38</b>
3.3.1. PROBLEMATIQUE	38
3.3.2. METHODOLOGIE	38
3.3.3. MISE EN ŒUVRE DU MODELE D'AGITATION	38
3.3.3.1. Logiciel	38
3.3.3.2. Emprise et bathymétrie	38
3.3.3.3. Maillage et représentation des éoliennes	39
3.3.4. CAS DE CALCUL	39
<b>3.4. RESULTATS</b>	<b>40</b>
3.4.1. INFLUENCE DE LA DIRECTION	40
3.4.2. CONDITIONS EXTREMES	42
3.4.3. IMPACTS A L'ECHELLE REGIONALE	43
3.4.4. RETOURS D'EXPERIENCE SUR LES PARCS EXISTANTS	44
3.4.5. BILAN DES IMPACTS SUR L'AGITATION	46
<b>4. IMPACT SUR LA TURBIDITE DU MILIEU EN PHASE CHANTIER</b>	<b>47</b>
<b>4.1. TURBIDITE NATURELLE – BRUIT DE FOND</b>	<b>47</b>
<b>4.2. METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DES IMPACTS</b>	<b>51</b>
<b>4.3. LOGICIEL</b>	<b>51</b>
<b>4.4. MODELISATION DES REJETS DES TRAVAUX DE FORAGE</b>	<b>52</b>
4.4.1. EMPRISE, BATHYMETRIE ET MAILLAGE	52
4.4.2. HYPOTHESES DE REJET	52
<b>4.5. RESULTATS</b>	<b>52</b>
<b>5. IMPACT SUR LE TRAIT DE COTE</b>	<b>55</b>
<b>5.1. DESCRIPTION DU LITTORAL DE LA ZONE D'ETUDE</b>	<b>55</b>
5.1.1. COMMUNES	55
5.1.2. CARACTERISATION	55
5.1.3. CELLULES SEDIMENTAIRES	56
5.1.3.1. Cellule sédimentaire CS I : de la pointe de Castelli à la pointe du Croisic	56
5.1.3.2. Cellule sédimentaire CS II : de la pointe du Croisic à la pointe de Chemoulin	57
5.1.3.3. Cellule sédimentaire CS III : de la pointe de Chemoulin au port de Saint-Nazaire	57

---

5.1.3.4. Cellule sédimentaire CS IV : de Saint Brévin les Pins à la pointe Saint Gildas	57
5.1.3.5. Cellule sédimentaire CS V : de la pointe Saint Gildas à la limite Est de Pornic	57
5.1.4. EVOLUTION DU TRAIT DE COTE	58
<b>5.2. IMPACTS DU PARC EOLIEN SUR LE TRAIT DE COTE</b>	<b>58</b>
5.2.1. DEFINITION DES IMPACTS	58
5.2.2. CRITERES D'IMPACT	58
5.2.3. IMPACTS SUR LE LITTORAL NON SEDIMENTAIRE (FALAISES ET OUVRAGES)	59
5.2.4. IMPACTS SUR LE LITTORAL SEDIMENTAIRE (PLAGES)	59
5.2.4.1. Points d'analyse	59
5.2.4.2. Conditions hydrodynamiques	60
5.2.4.3. Résultats	61
5.2.5. BILAN DES IMPACTS SUR LE TRAIT DE COTE	61
<b>6. IMPACT SEDIMENTAIRE REGIONAL</b>	<b>62</b>
<b>6.1. CONDITIONS DE SOL</b>	<b>62</b>
6.1.1. NATURE DES FONDS	62
6.1.2. MATRICE ROCHEUSE	63
6.1.3. MOBILITE DES SEDIMENTS	64
<b>6.2. IMPACT SEDIMENTAIRE</b>	<b>65</b>
6.2.1. IMPACT LIE A LA MODIFICATION DES COURANTS	65
6.2.2. IMPACT LIE A LA MODIFICATION DES HOULES	65
6.2.4. BILAN DES IMPACTS SUR LA MORPHODYNAMIQUE REGIONALE	66
<b>7. IMPACT SEDIMENTAIRE LOCAL</b>	<b>67</b>
<b>7.1. CONDITIONS DE SOL</b>	<b>67</b>
7.1.1. NATURE DES FONDS	67
7.1.2. MATRICE ROCHEUSE	69
7.1.3. SEDIMENTS MEUBLES	70
7.1.4. STRUCTURES SEDIMENTAIRES	73
7.1.5. INDENTIFICATION DES ZONES A RISQUE D'AFFOUILLEMENT	74
<b>7.2. THEORIE DE L'AFFOUILLEMENT AU PIED DE FONDATIONS MONOPIEU</b>	<b>74</b>
7.2.1. MODIFICATION LOCALE DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES	74
7.2.1.1. Principe d'affouillement	74
7.2.1.2. Développement de l'affouillement	75
7.2.1.3. Dimensions de l'affouillement	77
7.2.2. APPLICATION AU SITE D'ETUDE	78
7.2.3. RETOURS D'EXPERIENCE	79
7.2.4. BILAN DES IMPACTS SUR LES FONDS LOCALEMENT	81
<b>BIBLIOGRAPHIE</b>	<b>82</b>
<b>ANNEXE A COORDONNEES ET PROFONDEUR D'IMPLANTATION DES EOLIENNES</b>	<b>84</b>
<b>ANNEXE B FIGURES CHAPITRE 1</b>	<b>87</b>

---

<b>ANNEXE C FIGURES CHAPITRE 2 – CARTES DES COURANTS (MODELISATION HYDRODYNAMIQUE)</b>	<b>88</b>
<b>ANNEXE D FIGURES CHAPITRE 3 – EPURES DE PROPAGATION (MODELISATION DE LA HOULE)</b>	<b>89</b>
<b>ANNEXE E FIGURES CHAPITRE 6 – CARTES DE CONDITIONS DE SOL</b>	<b>90</b>
<b>ANNEXE F FIGURES CHAPITRE 7 – RESULTATS CAMPAGNES IN VIVO 2011</b>	<b>91</b>

## TABLEAUX

Tableau 1 – Niveaux caractéristiques (SHOM, Références Altimétriques Maritimes 2012).....	4
Tableau 2 – Coefficients de marée au cours de la période de simulation réalisée.....	10
Tableau 3 – Coordonnées des points de calage.....	15
Tableau 4 – Coordonnées des points d'extraction des séries temporelles de niveau et courant.....	21
Tableau 5 – Courants aux pics de flot et de jusant aux points P1,P3 et P4 dans l'état actuel.....	27
Tableau 6 – Courants aux pics de flot et de jusant à P1, P3 et P4 dans l'état aménagé.....	27
Tableau 7 – Ecart absolu des vitesses en mètres par seconde (état aménagé – état actuel) aux pics de flot et de jusant aux points P1, P3 et P4.....	27
Tableau 8 – Ecart relatif des vitesses ((état aménagé – état actuel) / état actuel) aux pics de flot et de jusant aux points P1, P3 et P4.....	27
Tableau 9 – Courants aux pics de flot et de jusant aux points P1 et P5 dans l'état actuel.....	28
Tableau 10 – Courants aux pics de flot et de jusant aux points P1 et P5 dans l'état aménagé.....	28
Tableau 11 – Ecart absolu des vitesses en mètres (état aménagé – état actuel) aux pics de flot et de jusant aux points P1 et P5.....	29
Tableau 12 – Ecart relatif des vitesses ((état aménagé – état actuel) / état actuel) aux pics de flot et de jusant aux points P1 et P5.....	29
Tableau 13 – Houles extrêmes au large du site pour le secteur dominant Ouest-Sud-Ouest.....	32
Tableau 14 – Hauteurs significatives maximales sur le site pour le secteur du large dominant Ouest-sud-Ouest.....	34
Tableau 15 – Cas de calcul de houle.....	39
Tableau 16 – Conditions usuelles.....	44
Tableau 17 – Conditions extrêmes.....	44
Tableau 18 – Synthèse de l'impact sur la houle, panel de parcs éoliens offshore pour différents types de fondations. (*) P : partielle, N : non-apparue, QT : Quasi-totale, T : totale (relativement aux périodes de houle et aux profondeurs d'eau) (**) Me : Mesures, Mo : Modélisations numériques, Th : Théorie mathématiques, Si : Principe de similitude (i.e. aucune étude), n.r.: non renseigné.....	45
Tableau 19 – Synthèse des MES en différentes situations (hors agitation & hors crue, crue, agitation) – source ARTELIA, 2012.....	51
Tableau 20 – Points d'analyse du transport annuel.....	60
Tableau 21 – Conditions hydrodynamiques de calcul.....	61
Tableau 22 – Ecart relatif sur le transport solide annuel au niveau des points d'analyse.....	61
Tableau 23 – Vitesses critiques de courant pour la mise en mouvement des sédiments.....	64

Tableau 24 – Capacité des houles usuelles à mettre les sédiments en mouvement .....	65
Tableau 25 – Coordonnées de stations de prélèvement de la campagne de mars 2011 (In Vivo) .....	71
Tableau 26 – Caractéristiques granulométriques des échantillons sableux (In Vivo, 2011).....	71
Tableau 27 – Profondeur maximales d'affouillement en pied de pile large Haddorp 2005) .....	78
Tableau 28 – Profondeurs mesurées et emprises calculées du processus d'affouillement pour un panel de parcs éoliens offshore avec des structures monopiles. Source : Wallingford 2011 .....	80

## FIGURES

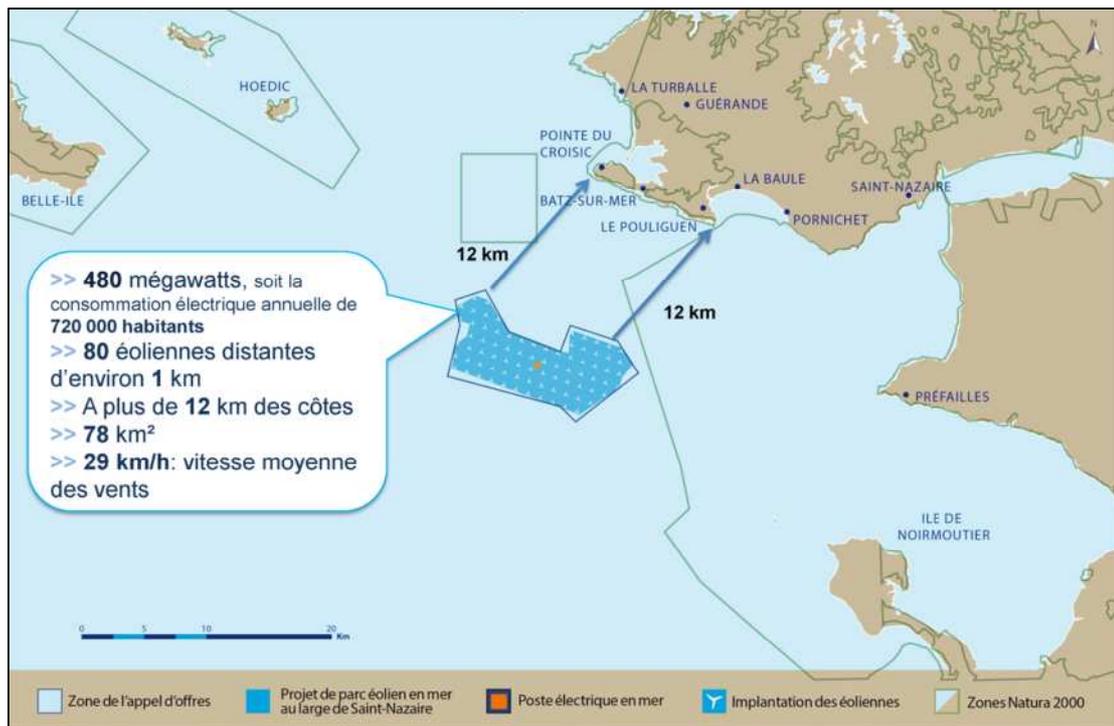
Figure 1. Localisation de la zone de projet (EMF, 2013).....	1
Figure 2. Définition des zones d'étude .....	1
Figure 3. Schéma d'implantation des éoliennes (étoiles rouges) et de la sous-station (étoile verte) (fond de carte : carte SHOM 7068).....	3
Figure 4. Bathymétrie de la zone d'étude étendue (données SHOM) .....	5
Figure 5. Bathymétrie sur la zone de projet (issue du fichier client 20110422_GEOPHYGUERANDE_sondes5x5m.xyz).....	6
Figure 6. Carte des gradients bathymétriques (In Vivo 2011).....	7
Figure 7. Champs de vitesse au pic de flot pour une marée de coefficient C93 (état actuel) – Cf Annexe C, Figure C5 .....	8
Figure 8. Champs de vitesse au pic de jusant pour une marée de coefficient C93 (état actuel) – Cf Annexe C, Figure C11 .....	8
Figure 9. Maillage et bathymétrie du modèle Atlantique - Manche .....	11
Figure 10. Emprise locale et bathymétrie (m ZH) des modèles locaux. L'emplacement des futures éoliennes est indiqué par un point noir. ....	12
Figure 11. Emprise locale et bathymétrie (m ZH) des modèles locaux. L'emplacement des futures éoliennes est indiqué par un point noir. ....	12
Figure 12. Maillage et emprise des modèles hydrodynamiques locaux.....	13
Figure 13. Zoom sur le maillage de la zone de projet (bathymétrie en m ZH en fond de carte).....	14
Figure 14. Maillage dans l'état actuel à l'emplacement d'une fondation d'éolienne .....	14
Figure 15. Maillage autour d'une fondation d'éolienne dans l'état aménagé .....	14
Figure 16. Maillage dans l'état actuel à l'emplacement de la sous-station .....	15
Figure 17. Maillage autour de la sous-station dans l'état aménagé .....	15
Figure 18. Localisation des points de mesure ADCP (propriété GPMNSN), nommés « Lambarde » et « Sites 2&3 ».....	16
Figure 19. Comparaison de la cote de la surface libre calculée avec celle mesurée sur le site de Lambarde entre le 24 septembre 2009 et le 10 octobre 2009.....	17
Figure 20. Zoom sur la comparaison de la cote de la surface libre calculée avec celle mesurée sur le site de Lambarde entre le 24 septembre 2009 et le 10 octobre 2009 .....	17
Figure 21. Comparaison de la vitesse calculée (intensité et direction) avec celle mesurée sur le site 2&3 entre le 24 septembre 2009 et le 10 octobre 2009.....	18
Figure 22. Zoom sur la comparaison de la vitesse calculée (intensité et direction) avec celle mesurée au point « sites 2&3 » entre le 24 septembre 2009 et le 10 octobre 2009.....	18
Figure 23. Localisation des points d'extraction des séries temporelles .....	21
Figure 24. Champs de vitesse maximale au flot (m/s) (C93), état actuel (Cf Annexe C, Figure C15).....	22
Figure 25. Champs de vitesse maximale au flot (m/s) (C93), état aménagé (Cf Annexe C, Figure C15) .....	22
Figure 26. Champs de vitesse maximale au jusant (m/s) (C93), état actuel (Cf Annexe C, Figure C16).....	22
Figure 27. Champs de vitesse maximale au jusant (m/s) (C93), état aménagé (Cf Annexe C, Figure C16) .	22

Figure 28. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-flot pour une marée de coefficient C93 (Cf Annexe C, Figure C68) .....	23
Figure 29. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-jusant pour une marée de coefficient C93 (Cf Annexe C, Figure C69) .....	23
Figure 30. Série temporelle du niveau et des courants (intensité et direction) au point P1, centrée autour de la marée de coefficient 93.....	24
Figure 31. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-flot pour une marée de coefficient C93. Le carré rouge correspond à la fenêtre zoom des figures de zoom de la section précédente .....	25
Figure 32. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-jusant pour une marée de coefficient C93 .....	25
Figure 33. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-flot pour une marée de coefficient C73 .....	25
Figure 34. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-jusant pour une marée de coefficient C73 .....	25
Figure 35. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-flot pour une marée de coefficient C43 .....	26
Figure 36. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-jusant pour une marée de coefficient C43 .....	26
Figure 37. Distribution annuelle des houles au large (en haut à gauche : hauteur, à droite : direction) et rose des houles au large (en bas à gauche : toute la base de données, à droite, houles supérieures à 3,5 m). Actimar 2011.....	31
Figure 38. Distribution annuelle des houles sur le site d'implantation des éoliennes (en haut à gauche : hauteur, à droite : direction) et rose des houles (en bas à gauche : toute la base de données, à droite, houles supérieures à 3,0 m). Actimar 2011. ....	33
Figure 39. Distribution conjointe Hs/Tp et différents ajustements d'une loi pour les conditions d'ouest. Actimar 2011.....	34
Figure 40. Sketch of the incident, diffracted and reflected wave fronts for a vertically placed cylinder (Sumer and Fredsoe, 2002). ....	35
Figure 41. $KC > O(6)$ – Régime d'écoulement de pile mince, (Haddorp, 2005) .....	36
Figure 42. $KC < O(1)$ – Régime d'écoulement de pile large (Haddorp, 2005) .....	36
Figure 43. $O(1) < KC < O(6)$ – Régime d'écoulement de pile intermédiaire (Haddorp, 2005).....	36
Figure 44. Représentation des conditions de houle sur le site dans le diagramme KC vs D/L où KC est le nombre de Keulegan Carpenter, D est le diamètre de la fondation et L la longueur d'onde de la houle incidente. ....	37
Figure 45. Gauche : Front d'onde pour une houle de direction OSO (Conditions de calcul H1) Droite : différentiel relatif (en %) entre état aménagé et état actuel.....	40
Figure 46. Gauche : Front d'onde pour une houle de direction O (Conditions de calcul H2) Droite : différentiel relatif entre état aménagé et état actuel .....	41
Figure 47. Gauche : Front d'onde pour une houle de direction OSO (Conditions de calcul H3) Droite : différentiel relatif (en %) entre état aménagé et état actuel.....	41
Figure 48. Carte des écarts absolus (en m) entre état aménagé et état actuel pour les petites houles dominantes (Hs=2 m au large, Tp = 8s, directions modélisées OSO, O et ONO).....	42
Figure 49. Conditions de houle annuelle (calcul H4), écart absolu et écart relatif .....	43
Figure 50. Conditions de houle cinquantennale (calcul H5), écart absolu et écart relatif .....	43
Figure 51. Source : Tessier, 2006 Moyennes mensuelles de janvier à juin des MES inorganiques de surface en mg/L à partir des mesures satellites (issues de Gohin, Ifremer) .....	48
Figure 52. Source : Tessier, 2006 Moyennes mensuelles de juillet à décembre des MES inorganiques de surface en mg/L à partir des mesures satellites (issues de Gohin, Ifremer) .....	49

Figure 53. Concentrations massiques moyennes de surface et de fond mesurées lors de campagnes en mer. Gauche : conditions calmes. Droite : conditions agitée. Source : Tessier, 2006 .....	50
Figure 54. Maximum de MES atteint en chaque point du modèle .....	53
Figure 55. Maximum de MES atteint en chaque point du modèle - Zoom .....	53
Figure 56. Littoral de la zone d'étude et cellules sédimentaires.....	56
Figure 57. Localisation des points d'analyse du transport solide annuel.....	60
Figure 58. Carte des faciès sédimentaires (Vanney, 1968) Rose = rocher. Voir détails carte sur Figure Annexe E-1 .....	63
Figure 59. Carte géologique (BRGM, 2008) - Voir détails carte sur Figure Annexe E-2 .....	64
Figure 60. Nature des fonds sur la zone d'étude (Vanney, 1968) Rose = rocher. Les points rouge représentent les prélèvements d'échantillons granulométriques lors de la campagne In Vivo 2011. Voir détails carte sur Figure Annexe E-1 .....	68
Figure 61. Carte de nature des fonds de la zone de projet, In Vivo 2011. Voir détails carte sur Figure Annexe F-1 .....	68
Figure 62. Carte géologique de la zone de projet (BRGM) Voir détails carte sur Figure Annexe E-2.....	69
Figure 63. Plan de position des stations de prélèvement de sédiment.....	70
Figure 64. Photographies de l'ensemble des échantillons bruts (In Vivo, 2011) .....	72
Figure 65. Carte des épaisseurs de sédiments, d'après IFREMER.....	72
Figure 66. In Vivo : Rubans sableux et mégarides issus de la mosaïque sonar.....	73
Figure 67. Gauche : Illustration des profils de vitesse (Sumer, 1992). Droite : Illustration des lignes de courant (Melville, 1988) .....	74
Figure 68. Gauche : Interaction structure, hydrodynamique et sédiment (Haddorp, 2005), Droite : Géométrie des fosses d'affouillement qui se développent autour d'une fondation cylindrique (source : <a href="http://www.bpp-cables.com">www.bpp-cables.com</a> ) .....	75
Figure 69. Cycle d'érosion au cours de la marée (Offshore Center Danemark, 2006).....	76
Figure 70. $KC > O(6)$ – Régime de "pile mince" .....	77
Figure 71. $KC < O(1)$ – Régime de pile large (Régime diffractif) .....	77
Figure 72. $O(1) < KC < O(6)$ – Régime de pile intermédiaire.....	77
Figure 73. Calcul du KC pour les différentes conditions de houle rencontrées sur le site d'étude au niveau des éoliennes à risque.....	79

## OBJET DE L'ÉTUDE

La SPC du Parc du Banc de Guérande, détenue par EDF-EN et Dong Energy avec le soutien de la société Nass&Wind Offshore, a pour vocation la construction puis l'exploitation d'un parc éolien en mer sur le Banc de Guérande au large du Croisic (44). Ce parc éolien en mer sera composé de 80 machines Alstom, type Haliade, ayant une capacité de production de 6 MW chacune.



**Figure 1. Localisation de la zone de projet (EMF, 2013)**

Dans le cadre des dossiers de demande d'autorisation de travaux, une étude d'impact environnemental doit être réalisée afin de vérifier la faisabilité de l'installation par rapport aux contraintes environnementales du site. Dans ce cadre, une consultation de bureaux d'études spécialisés pour la réalisation du lot Hydrodynamisme et Hydro-sédimentaire a été lancée en février 2013 et a été attribuée à ARTELIA Eau & Environnement en mai 2013 (contrats n° SNA-CON-EIA-CON-PBG-0005-E1.0, 0025-E1.0 et 0031-E1.0).

L'objet de ce lot est de déterminer les impacts du futur parc éolien sur les conditions hydrauliques et hydrosédimentaires du site, à savoir :

- Impact sur les houles et courants (tranche ferme)
- Impact sur le trait de côte (tranche conditionnelle 1)
- Impact sur la turbidité du milieu en phase chantier (tranche conditionnelle 2)
- Impact sédimentaire régional (tranche conditionnelle 3)
- Impact sédimentaire local (affouillement au pied des fondations) (tranche conditionnelle 4)

Plusieurs types de fondations et schémas d'implantation ont été étudiés. Ce rapport présente les résultats de l'étude dans le cas d'un scénario d'implantation des éoliennes sur fondations monopieu de diamètre 7 (contrat n° SNA-CON-EIA-CON-PBG-0031-E1.0).

## SYNTHESE ET CONCLUSIONS

Le projet d'implantation du parc éolien en mer de Saint Nazaire, aussi appelé parc éolien de Guérande, correspond à l'installation de 80 éoliennes de 6 MW chacune sur la partie orientale du banc de Guérande, à une distance minimale des côtes de 12 km (pointe du Croisic et pointe de Penchâteau). Les éoliennes seront montées sur des monopieux de 7 m de diamètre, par des fonds en pied d'ouvrage variant entre -11,6 m ZH et -24,7 m ZH. La sous-station électrique est représentée par 4 pieux de 3 mètres de diamètre.

L'impact du parc éolien sur les conditions hydrodynamiques et hydrosédimentaires a été étudié à travers l'évaluation des impacts sur :

- Les courants et les niveaux,
- L'agitation,
- La turbidité en phase chantier,
- L'évolution du trait de côte,
- La morphodynamique régionale,
- L'évolution des fonds en pied d'ouvrage.

Ces impacts ont été évalués localement à l'échelle du parc sur la *zone de projet* et sur une zone dite *zone étendue*, s'étendant de la pointe du Castelli au Nord jusqu'à la pointe de l'Herbaudière au Sud, et de Belle-Ile à l'Ouest jusqu'à la côte à l'Est.

### A. Impact sur l'hydrodynamique

L'impact du parc éolien sur l'hydrodynamique a été appréhendé *via la modélisation numérique des niveaux et courants dans les situations actuelle et aménagée* à partir du code de calcul **TELEMAC développé par EDF-LNHE**. Après calage du modèle les courants et niveaux d'eau ont été reproduits sur un cycle de marée de 15 jours, permettant de balayer l'ensemble des coefficients de marée de mortes-eaux à vives-eaux. Dans la situation aménagée, les éoliennes ont été représentées par un hexagone de 3,5 mètres de côté (soit 7 mètres de diamètre) et les pieux de la sous-station par des hexagones (4) de 1,5 mètres de côté (soit 3 mètres de diamètre).

Le régime hydrodynamique de la zone d'étude est gouverné par les courants de marée. Les vitesses sont les plus fortes pour les coefficients de marée les plus forts. Pour une marée de vives-eaux, les vitesses sur la zone d'étude sont de l'ordre de 0,50 m/s au pic de flot, sauf dans l'estuaire de la Loire et la baie de Bourgneuf (effets de remplissage/vidange) où elles atteignent le mètre par seconde.

Les résultats de la modélisation ont été exploités *via* les cartes de courant produites heure par heure dans les situations actuelle et aménagée et *via* l'extraction des séries temporelles de niveaux et de vitesse en des points pertinents dans le parc et à l'extérieur du parc.

Il ressort de l'analyse des résultats que :

- **Les impacts des fondations d'éoliennes sur les niveaux d'eau sont nuls.**
- **Les impacts des fondations sur les courants restent localisés dans l'emprise du parc**, plus précisément à l'amont immédiat et dans le sillage des ouvrages, où les fondations constituant un point d'arrêt de l'écoulement, entraînent une réduction des vitesses. Néanmoins, ces réductions de vitesse deviennent négligeables à quelques centaines de mètres de l'ouvrage, où elles ne sont plus que de l'ordre du centimètre par seconde. Ainsi, les réductions de vitesse sont d'au plus 0,01 m/s à au plus 1,5 km de la limite de la bordure du parc dans le sillage des éoliennes en bordure du parc et la comparaison des courants

aux points de contrôle à l'extérieur du parc ne montrent aucun écart de vitesse significatif (inférieur au centimètre par seconde).

- Les augmentations locales de vitesse que l'on peut observer sont elles aussi insignifiantes (inférieures à 0,015 m/s). Elles traduisent par ailleurs un déphasage de l'ordre de quelques secondes des cycles de marée entre les états actuel et aménagé dans l'emprise du parc et à proximité immédiate et non pas une modification des intensités maximales de courant. Elles ne sont donc pas significatives en termes d'impact.

**Nous pouvons donc conclure qu'en dehors du parc et sa proximité immédiate, l'impact des fondations sur les courants et les niveaux est négligeable à nul.**

## B. Impact sur l'agitation

L'impact du parc éolien sur l'agitation a été appréhendé localement *via* des considérations théoriques sur l'interaction houle-structure puis à l'échelle du parc et à l'échelle régionale *via* une modélisation numérique de propagation de la houle du large à la côte dans les états actuel et aménagé basée sur le code de calcul TOMAWAC de la chaîne logiciel TELEMAC.

L'agitation sur la zone d'étude est caractérisée par les houles océaniques et les mers de vent levées plus localement par les dépressions d'Ouest. D'après l'étude météo-océanique réalisée dans le cadre de ce projet, le secteur de provenance dominant est centré sur l'Ouest-Sud-Ouest. Les houles supérieures à 2 m au large sont dépassées entre 30 et 40% du temps et ont des périodes en moyenne supérieures à 8 s. La houle annuelle est caractérisée par une hauteur significative au large de 7,40 m et une période de 14 s et la houle cinquantennale par une hauteur significative de 11,90 m et une période de 17,7 s. Au cours des fortes tempêtes, la houle déferle sur le banc de Guérande.

L'impact des éoliennes sur les houles dépend de la hauteur et de la période de la houle incidente. Pour les conditions usuelles et les conditions extrêmes, les périodes de la houle sont telles que les effets de diffraction au passage d'une éolienne sont négligeables, et le champ de houle incident n'est modifié que de manière négligeable. De la turbulence est néanmoins générée localement et induit une perte d'énergie. Au passage du champ, ces pertes d'énergie se cumulent et peuvent se propager à l'aval du parc.

La modélisation mise en œuvre a considéré les éoliennes comme des puits d'énergie (100% de la houle incidente sur l'ouvrage est absorbée), ce qui correspond à une approche maximaliste en termes d'impact des fondations. Les résultats de la modélisation ont été exploités *via* les épures de propagation et les cartes de différentiel entre état actuel et état aménagé.

Il apparaît ainsi que le cumul des pertes d'énergie sur le parc devient rapidement insignifiant à l'aval du parc devant les autres phénomènes qui affectent la propagation de la houle jusqu'à la côte (réfraction, déferlement). A la côte, le champ de houle initial est reconstitué (écart inférieur à 1 % pour les conditions extrêmes) et **les impacts des éoliennes sur l'agitation peuvent être considérés comme nuls à négligeables.**

## C. Impact sur la turbidité en phase chantier

L'impact du parc éolien sur la turbidité du milieu en phase chantier a été évalué *via* la modélisation du rejet de panaches turbides pendant le forage des fondations. Le code de calcul utilisé a été SISYPHE de la chaîne logiciel TELEMAC.

La turbidité naturelle de la zone (bruit de fond) est caractérisée par des concentrations de matières en suspension sur la zone d'étude de quelques mg/L en période de calme à plusieurs dizaines de mg/L en période de crue ou de forte agitation (voire quelques centaines de mg/L à la côte et proche de l'estuaire).

La modélisation du rejet de panache turbide mise en œuvre a considéré la présence de deux ateliers de forage en simultané. Le débit de rejet considéré est de 1 m<sup>3</sup>/h, ce qui est faible au vu

des volumes d'eau qui transitent sur la zone (36 000 m<sup>3</sup>/h par 20 m de fond au flot d'une marée de vives-eaux).

Les résultats des simulations mettent en évidence que les valeurs maximales des concentrations en MES sont les plus fortes au droit immédiat et à quelques mètres du point de rejet mais **redescendent très rapidement en dessous de 0,5 mg/L.**

Ces concentrations générées lors de cette phase travaux sont ainsi bien inférieures aux épisodes de moyenne ou forte agitation sur la zone et en période d'expulsion du panache turbide de l'estuaire de la Loire. Par ailleurs, les calculs ne mettent en évidence aucun dépôt du sédiment (valeurs calculées nulles).

**Il peut donc être conclu un impact nul des travaux en phase chantier sur la turbidité du milieu.**

#### D. Impact sur le trait de côte

L'impact du parc éolien sur le trait de côte a été appréhendé en fonction du type de littoral, non sédimentaire (falaises, ouvrages) et sédimentaire (plages). Pour le trait de côte non sédimentaire, le critère de non impact d'un aménagement offshore correspond à une non-augmentation des conditions d'agitation au droit du littoral. Pour le trait de côte sédimentaire, le critère de non impact correspond à une modification du transport solide annuel inférieure à 1 % afin de ne pas générer de recul du trait de côte.

Le trait de côte de la zone d'étude étendue est essentiellement une alternance de falaises vives et de plages de sables avec ponctuellement des zones artificialisées au niveau des zones d'activité portuaire. Les zones de falaises vives subissent une érosion naturelle plus ou moins rapide en fonction de leur nature géologique tandis que les plages constituent des cellules sédimentaires relativement stables subissant les fluctuations saisonnières et interannuelles dans le profil et en plan naturelles.

**Pour le littoral non sédimentaire** (falaises et ouvrages littoraux et portuaires), le parc éolien conduisant à une réduction des agents hydrodynamiques (courants et houles), par ailleurs négligeable à la côte, **aucun impact sur le trait de côte ne sera généré par le parc éolien.**

**Pour le littoral sédimentaire**, des calculs de transport annuel entre l'état actuel et l'état aménagé ont montré des variations bien inférieures à 1 %, **ce qui permet de conclure à un impact nul du parc éolien sur les évolutions actuelles du trait de côte.**

#### E. Impact sédimentaire à l'échelle régionale

L'impact sédimentaire régional a été évalué relativement à la morphodynamique de la zone d'étude. La nature des fonds a été analysée afin d'évaluer la mobilité des sédiments sous l'action des agents hydrodynamiques (houles et courants). Il est ressorti de cette analyse que la morphodynamique sur la zone d'étude en conditions usuelles est faible, car non étendue spatialement du fait de la variabilité de la nature des fonds et non continue temporellement, du fait des vitesses de courant modérées et des conditions de houle usuelles. Elle n'est pas significative au regard des évolutions de fond qui adviennent en tempête, conditions pour lesquelles les houles déferlent.

Les impacts du parc du parc sont donc négligeables puisque les impacts sur les houles de tempête sont négligeables. Par ailleurs, ces impacts conduisent à une modification du transport solide inférieure à 1% (critère de non-impact équivalent pour le trait de côte).

**On peut donc conclure à l'absence d'impact du parc éolien sur la morphodynamique régionale.**

#### F. Impact sédimentaire local

L'impact sédimentaire local a été évalué par rapport au risque d'affouillement et donc de modification des fonds en pied des fondations.

Le site d'implantation des éoliennes est caractérisé par des fonds rocheux, sauf à l'extrémité Nord-Est du parc et localement le long de la bordure Sud-Est. Sur ces zones, les sédiments en pied d'éoliennes sont érodables.

Sur les fonds rocheux, les fondations d'éoliennes n'auront aucun impact en termes d'évolution des fonds. En revanche sur les fonds érodables, une fosse d'affouillement se développera au pied des fondations. Les houles de tempête déferlant sur le banc, la profondeur maximale de la fosse d'affouillement à considérer sera de 2 fois le diamètre de la pile, soit de 14 m, à conditions que l'épaisseur de sédiments érodables soit aussi importante, et s'étendra alors sur un rayon d'environ 50 mètres autour de la pile.

## SUMMARY AND CONCLUSIONS

The offshore wind farm project of *Saint-Nazaire*, also named *Guérande* offshore wind farm, consists in installing 80 wind turbines of 6 MW each, on the western part of the bank of *Guérande*, offshore *Saint-Nazaire*. The shortest distance between the turbines and the coast will be 12 km (between the farm and *Le Croisic* and *Penchâteau* headlands). The offshore wind turbines (OWTs) will be mounted on 7 meters diameter monopile foundations, by water depths ranging from -11,6 m ZH and -24.7 m ZH. The electrical sub-station will be mounted on four 3 meters diameter pile foundations.

The impact of the offshore wind farm on the hydrodynamic and hydrosedimentary regime has been studied through the appraisal of the impacts on:

- Water levels and currents,
- Wave agitation,
- Turbidity during installation works,
- Shoreline,
- Regional scale morphodynamics,
- Local changes of seabed in the vicinity of the foundations.

These impacts have been evaluated locally over the wind farm area (*project area*) and over a larger zone, called *regional study area*, spanning North to South from the *Castelli* Headland to the *Herbaudière* headland and West to East from *Belle-Ile* to the coast.

### A. Impacts on the hydrodynamics

The wind farm impacts on the hydrodynamics have been assessed through numerical modeling of currents and water levels in the present (no farm) and future (farm) configurations. The numerical code used was TELEMAC, developed by EDF-LNHE. After the model was calibrated, current and water levels were modeled over a 15-days period, to have a complete tidal cycle from neap to spring tides. In the future configuration, the offshore wind turbine foundations are represented by an hexagon with sides of 3,5 meters, *ie* diagonal of 7 meters and the sub-station piles by hexagons with sides of 1,5 meters.

The hydrodynamic regime at the regional scale is governed by the tidal regime. Current speeds are larger for the highest tide coefficients. During spring tides, current speeds are in the order of 0.50m/s during flood over the project area, except in the *Loire* estuary and *Bourgneuf* bay, where they reach speeds in the order of 1 m/s).

Model outputs were processed through the production of hourly current maps in present and future configuration, differential current maps and through the extraction of time series of water levels and currents (speed and direction) at relevant locations within and outside the wind farm.

The results show that:

- There is no impact of the OWT on the water levels;
- The impacts of the OWT on the currents are localized within the wind farm area, in the immediate vicinity of the wind turbines, upstream and in the lee-wake of the foundations that induce a flow breakpoint. However, the decrease in current speed is negligible at a few hundred meters from the foundations, where the reduction in current speed is in the order of a few centimeters per second. At less than 1,5 km from the outer OWTs, the decrease in current speed is lower than 0.01 m/s. The comparison of currents intensity at the control points outside the wind farm show differences less than 0.01 cm/s.

- Local increases in current speeds can be seen in the comparative current maps. They are less than 0.015 m/s and correspond to a phase difference of a few seconds rather than an increase in the maximal flood (or ebb) speed.

**It can therefore be concluded that outside the wind farm and its immediate vicinity, the impact of the OWTs on the water levels and currents is negligible.**

#### **B. Impacts on wave climate**

The impacts of the wind farm on the wave climate have been assessed locally by a desk-study analysis and at the regional scale, through numerical modeling with the software TOMAWAC from the numerical package TELEMAC.

The wave climate over the regional study area is characterized by North Atlantic swells and wind seas generated locally by the low pressure fronts from West. According to the metocean study specific to this project, the dominant wave regime is from West-South-West. The exceeding frequency of 2 meters offshore waves is 30 to 40%, with an average wave period larger than 8 s. The wave conditions with a return period of 1 year are characterized by an offshore wave height of 7.4 m and a period of 14 s while the 50-yr return period wave height is 11.9 m with an associated period of 17.7 s. During strong storms, waves break over the bank of *Guérande*.

The impacts of the OWTs on the waves depend on the wave height and on the wave period. For usual and storm wave conditions, the wave periods are such that diffraction effects are negligible and the incident wave field is not altered significantly. Nevertheless, local turbulence is generated and leads to local energy loss. As the waves pass through the wind farm, the local energy losses accumulate and propagate downstream.

The numerical modeling implemented represent the OWTs as energy sinks (100 % on the incident wave energy on the foundation is absorbed), which leads to maximizing the impacts of the OWTs on the wave field. The results of the numerical modeling were interpreted through the analysis of wave field and differential maps.

It appears that the cumulative energy loss downstream the wind farm rapidly becomes insignificant compared to the other physical phenomena that affect the wave propagation (refraction, wave breaking) up to the coast. In front of the coast, the wave field is back to initial conditions (difference less than 1 % for extreme wave conditions) and **the impacts of the OWTs on wave conditions can be considered nil to negligible.**

#### **C. Impacts on turbidity during works**

The impacts of the wind farm works on the turbidity have been evaluated through numerical modeling of plume dispersion during the drilling works. The numerical code used was SISYPHE from the numerical chain TELEMAC.

The initial turbidity in the area of the wind farm is characterized by suspended matter concentrations of a few mg/L during average meteorological conditions up to ten to a hundred or so mg/L during severe events (winter storms, Loire floods).

The numerical modeling assumed two drilling platforms simultaneously. The output of solid matters per platform was set to 1 m<sup>3</sup>/h, which is low with respect to the water circulation in the area (36 000 m<sup>3</sup>/h by water depths of 20 m during spring flood).

The results show that the suspended matter concentrations are maximal at and in the immediate vicinity of the drilling location but decrease within a very short distance below 0.5 mg/L. These concentrations are much less than concentrations observed during medium to storm wave conditions and when the estuarine turbidity maximum is flushed from the Loire estuary during high runoffs. Furthermore, the calculations do not show any deposit of the rejected matters (calculated thickness of deposit is nil).

**It can therefore be concluded that the impact of the drilling works on the turbidity is nil.**

#### **D. Impacts on the shoreline**

The impacts of the wave field on the shoreline have been studied according to the shoreline type : non-sedimentary shoreline (cliffs, manmade structures) or sedimentary one (beaches). For the non-sedimentary shoreline, the criterion of no impact corresponds to a non-increase of wave conditions in front of the shoreline. For the sedimentary shoreline, the criterion of no impact corresponds to a change in annual solid transport less than 1 % in order to avoid additional shoreline retreat.

The shoreline of the regional study area is alternating between cliffs and sand beaches with locally artificial areas near harbors development zones. The cliffs are eroding at a time rate variable according to their geological composition. The sand beaches are relatively stable sedimentary cells, adjusting naturally to seasonal and inter-annual metocean fluctuations.

**For the non-sedimentary shoreline** (cliffs and man-made structures), the offshore wind farm inducing (very slight) reductions in the hydrodynamics (waves and currents) along the coast, **the wind farm will have no impact** along this type of shoreline.

**For the sedimentary shoreline**, annual transport calculations for the actual and future conditions show reductions much less than 1%, which allows to conclude that the wind farm will have still **no impact on the current shoreline fluctuations**.

#### **E. Sedimentary impact at regional scale**

The sedimentary impact of the offshore wind farm at regional scale has been assessed with respect to the morphodynamics over the regional study area. The seabed composition has been described in order to quantify the sediment mobility under the hydrodynamic forcing (waves and currents). This analysis showed that due to the spatial variability of the seabed composition, the moderate speeds of the currents and the time variability of wave conditions, the usual conditions morphodynamic regime over the regional study area is weak, and spatially restricted. It is not significant compared to seabed evolutions that take place during storms, when waves break.

The impacts of the wind farm are therefore negligible the impacts of the wind farm on storm wave conditions are weak. Furthermore, these impacts lead to changes in annual solid transport less than 1 %, equivalent to the criterion of no impact for the shoreline.

**It can therefore be concluded that the offshore wind farm has no sedimentary impact at regional scale.**

#### **F. Local sedimentary impact**

The local sedimentary impact refers to scour processes leading to seabed modifications around the foundations.

The wind farm area is characterized by a rocky seabed, except along the North-East limit and locally along the South-East border. On these areas, the seabed at the OWTs locations may be eroded.

Over the rocky seabed, the offshore wind turbine foundations will not have impact on the seabed levels. On the other hand, over erodible seabed, scour processes will take place at the bottom of the foundations. Storm waves breaking over the *Guérande* bank, the maximum scour depth of the scour pit will be around two times the pile diameter, that is to say 14 meters, provided that the thickness of erodible sediment is sufficient. The scour pit radius to consider will be about 50 meters.

## LISTE DES ABBREVIATIONS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
AO	Appel d'Offres
BMME	Basse Mer de Mortes-Eaux
BMVE	Basse Mer de Vives-Eaux
BRGM	Bureau de Recherches Géologiques et Minières
DNV	Det Norske Veritas
DREAL	Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
EDF-EN	Electricité De France- Energies Nouvelles
EMF	Eolien Maritime France
GIP	Groupement d'Intérêt Public
GPMNSN	Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire
HSE	Health & Safety Executive
IGN	Institut Géographique National
IMDC	International Marine & Dredging Consultants
LCHF	Laboratoire Central d'Hydraulique de France
MES	Matières En Suspension
NM	Niveau Moyen
OWT	Offshore Wind Turbine
PHMA	Plus Haute Mer Astronomique
PBMA	Plus Basse Mer Astronomique
PMVE	Pleine Mer de Vives-Eaux
PMME	Pleine Mer de Mortes-Eaux
SHOM	Service Hydrographique et Océanographique de la Marine
UTM	Universal Transverse Mercator
WGS	World Geodetic System
ZH	Zéro Hydrographique

## 1. DONNEES DE BASE

### 1.1. DEFINITION DES ZONES D'ETUDE

Pour les besoins de l'étude, les zones géographiques suivantes sont définies :

La **zone d'appel d'offre**, ou **zone de projet**, qui correspond au polygone définissant les limites de la zone d'implantation des éoliennes, fixée par l'Etat ;

La **zone d'étude étendue**, aire *a priori* suffisamment étendue pour inclure les impacts potentiels des éoliennes, en mer et à la côte. Cette zone s'étend du nord au Sud de la pointe du Castelli à la pointe de l'Herbaudière et d'Ouest en Est, de Belle-Ile jusqu'à la côte.

La **zone de modélisation**, qui correspond à l'aire sur laquelle les modèles hydrodynamiques (niveau, courant et agitation) sont mis en œuvre et qui permet d'avoir des conditions limites non perturbées par le projet tout en étant suffisamment étendue pour assurer une bonne mise en régime de l'hydrodynamique.



**Figure 2. Définition des zones d'étude**

## 1.2. SCHEMA D'IMPLANTATION DES EOLIENNES ET SOUS-STATION

### 1.2.1. Eoliennes

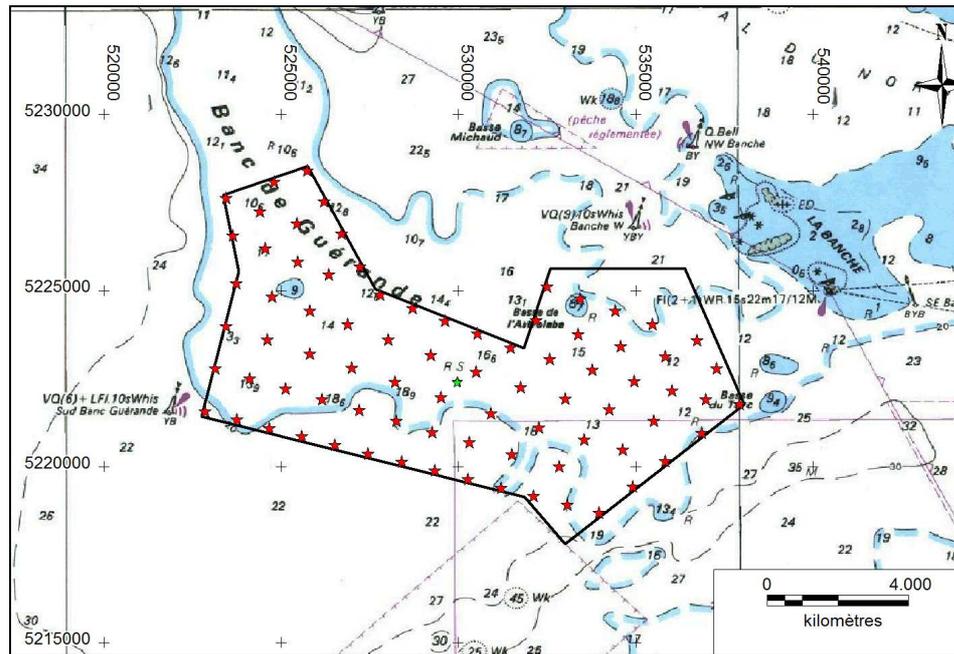
La zone d'implantation des éoliennes, telle que définie dans l'appel d'offre du gouvernement français, est délimitée par le périmètre formé par les points suivants :

- A      2°39,60' W      47°12,59' N
- B      2°41,50' W      47°12,15' N
- C      2°41,20' W      47°11,00' N
- D      2°42,00' W      47°08,80' N
- E      2°34,80' W      47°07,50' N
- F      2°33,90' W      47°06,80' N
- G      2°29,90' W      47°08,90' N
- H      2°31,20' W      47°10,30' N
- I      2°34,20' W      47°11,00' N
- J      2°34,80' W      47°09,78' N
- K      2°38,10' W      47°10,70' N

Cette zone couvre environ 78 km<sup>2</sup>. Quatre-vingt (80) éoliennes seront implantées dans ce périmètre selon l'organisation illustrée sur la figure suivante. La distance inter-éolienne est de l'ordre de 1200 m dans la direction du vent dominant. Les coordonnées<sup>1</sup> de chaque éolienne sont fournies en Annexe A. Les profondeurs aux centres des éoliennes varient entre -11,62 m ZH et -24,66 m ZH.

---

<sup>1</sup> Coordonnées issues du fichier 20131030\_SNA\_S01-L05\_S01\_L06\_Coordonnées.xlsx mis à jour le 30 octobre 2013 et fourni par EDF-EN le 14 janvier 2014



**Figure 3. Schéma d'implantation des éoliennes (étoiles rouges) et de la sous-station (étoile verte) (fond de carte : carte SHOM 7068)**

### 1.2.2. Sous-station

La sous-station électrique correspond à une plate-forme supportée par une fondation jacket quadripode constituée de 4 pieux de 2,5 à 3 m de diamètre (un schéma de principe est présenté ci-contre).

Pour cette étude, il est fait l'hypothèse de pieux de 3 m de diamètre, disposés selon un quadrilatère de 18 m de côté



## 1.3. REFERENCEMENT ALTIMETRIQUE ET PLANIMETRIQUE

Sauf mention contraire :

- les altitudes données dans le présent document sont référencées par rapport au zéro hydrographique (0 m ZH) de Saint Nazaire, situé 3,159 m sous le zéro IGN69.
- les localisations sont données dans la projection WGS 84 UTM Zone 30 N.

## 1.4. NIVEAUX DE REFERENCE

Sur le littoral atlantique, la marée est de type semi-diurne (période 12h25 min). L'onde de marée se propage du sud vers le nord sur toute la façade atlantique et possède des caractéristiques différentes le long des côtes en raison de son interaction avec les fonds lors de sa propagation.

Le SHOM fournit les niveaux caractéristiques en plusieurs sites le long du littoral. Ils sont présentés ci-après aux ports de référence du Croisic et de Saint Nazaire.

**Tableau 1 – Niveaux caractéristiques (SHOM, Références Altimétriques Maritimes 2012)**

	PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA
<b>Coefficient Caractéristique</b>	<b>120</b>	<b>95</b>	<b>45</b>		<b>45</b>	<b>95</b>	<b>120</b>
<b>Saint Nazaire</b>	+6.59 m ZH	+5.85 m ZH	+4.65 m ZH	+3.57 m ZH	+2.20 m ZH	+0.85 m ZH	-0.02 m ZH
<b>Le Croisic</b>	+6.13 m ZH	+5.40 m ZH	+4.25 m ZH	+3.30 m ZH	+2.00 m ZH	+0.70 m ZH	-0.03 m ZH

## 1.5. BATHYMETRIE

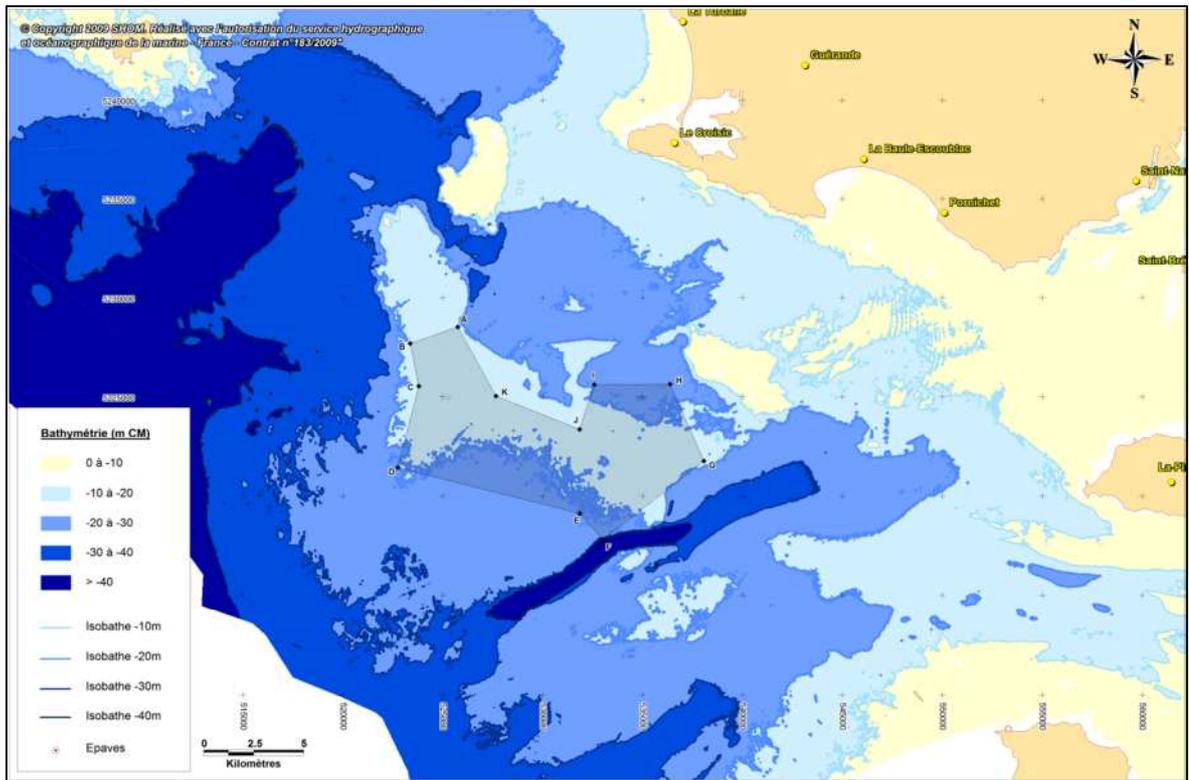
Les données bathymétriques utilisées dans cette étude sont issues :

- Des sondes SHOM et cartes marines SHOM 7068 (*De la presque île de Quiberon aux sables d'Olonne*, échelle 1 :162 400, édition n°2, 2010) et SHOM 7395 (*Du Croisic à Noirmoutier – Estuaire de la Loire*, échelle 1 :50300, édition n°2, 2009)
- Du levé bathymétrique sur la zone d'étude fourni par le Client (fichier 20110422\_GEOPHYGUERANDE\_sondes5x5m.xyz : points de sonde selon une grille de 5 m, référencés par rapport au zéro hydrographique dans le système de coordonnées WGS84 UTM zone 30N)

### 1.5.1. Bathymétrie de la zone d'étude étendue

Les fonds de la zone d'étude étendue, comprise au sens large entre Belle-Ile et l'île de Noirmoutier, sont généralement peu profonds (la majeure partie des fonds sont situés au-dessus de la cote -30 m ZH ) et particulièrement irréguliers en présentant de nombreux points singuliers tels que les îles (Belle-Île en Mer, île d'Houat, île du Hoëdic, île Dunet, île de Noirmoutier) et les hauts-fonds (plateau du Four, plateaux de la Blanche et de la Lambarde, les écueils entre la pointe de Penchâteau et le Grand Charpentier qui ferment la baie de La Baule, la Chaussée des Bœufs) ou les chenaux de navigation de l'estuaire de la Loire. Le banc de Guérande repose sur des fonds par -20 m ZH et culmine à environ -13 m ZH.

Les zones de profondeurs les plus faibles se retrouvent au niveau du débouché de l'estuaire de la Loire et dans la baie de Bourgneuf. Plus au large, l'isobathe -50m ZH se situe selon une ligne orientée Nord-Ouest/Sud-Est comprise entre Belle-Île-en-Mer et l'Île d'Yeu.



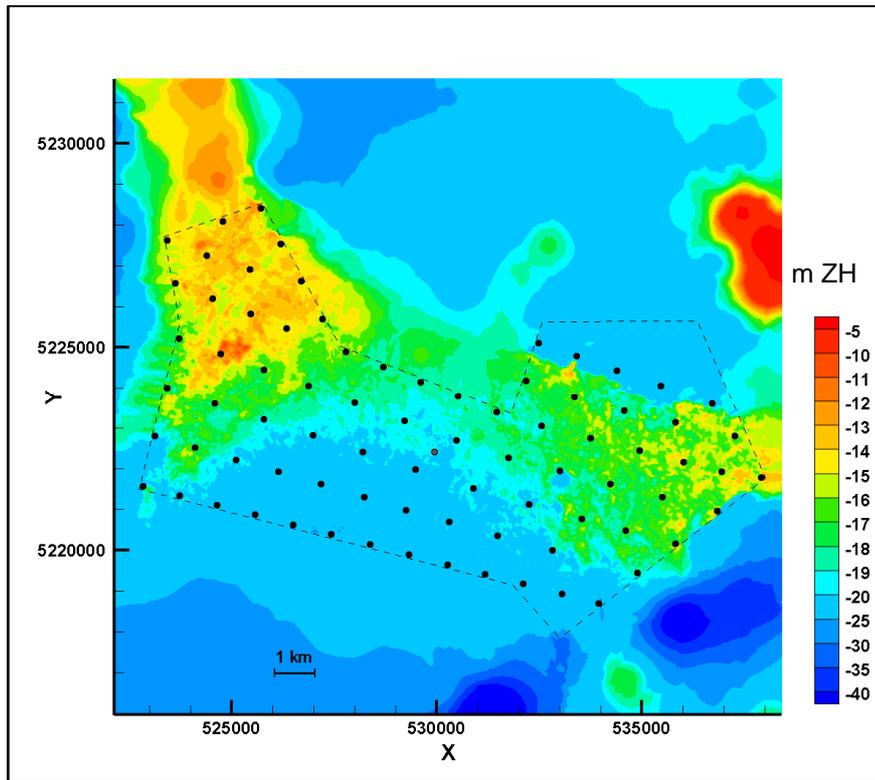
**Figure 4. Bathymétrie de la zone d'étude étendue (données SHOM)**

### 1.5.2. Bathymétrie de la zone de projet

La bathymétrie sur la zone de projet (issue du traitement du fichier de points de sonde fourni par le Client) est illustrée sur la figure ci-après.

La zone de projet se situe sur la partie orientale du banc de Guérande. Sur cette zone, les profondeurs varient de -10 m ZH sur les points les plus hauts du platier au Nord-Ouest de la zone, à -25 m ZH sur le bord externe du banc au Sud de la zone. Au nord-Est, on distingue une étendue sableuse relativement plane sur des fonds de -20 m ZH à -22 m ZH. La limite entre cette « plaine » sous-marine et le banc de Guérande est marquée par une falaise abrupte de 4m de dénivelé (In Vivo 2011).

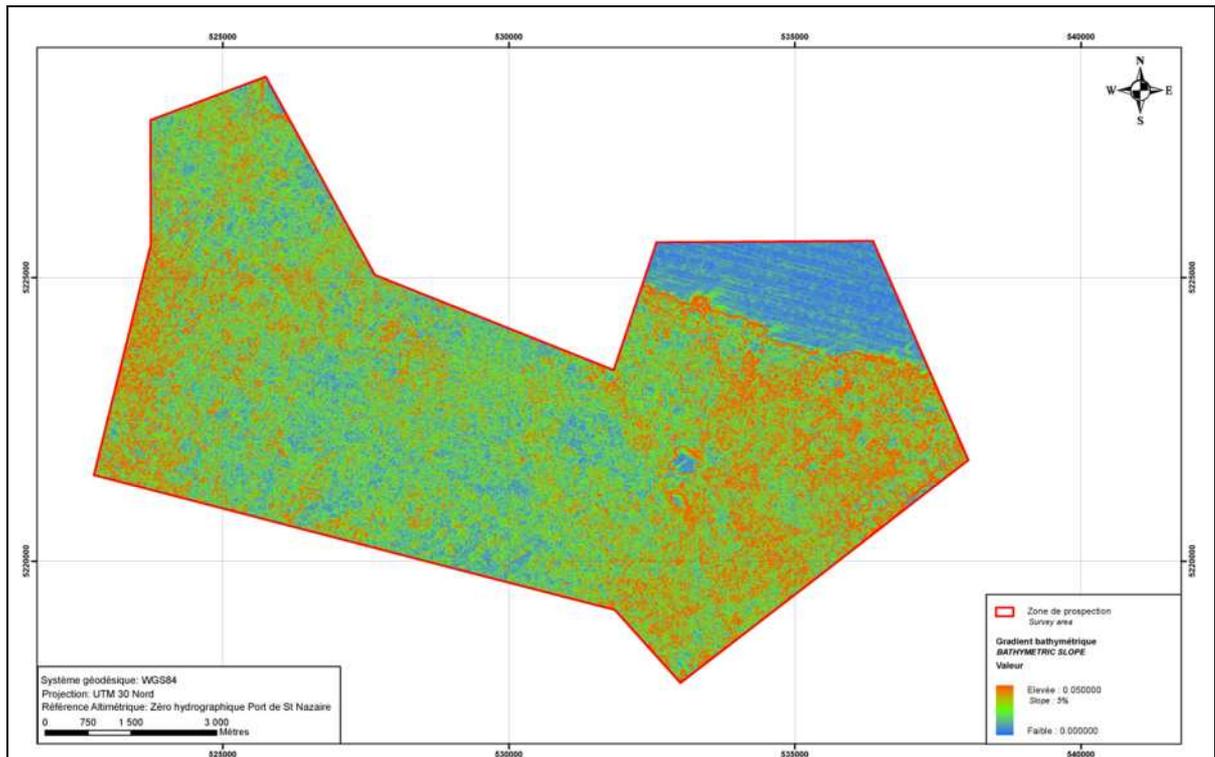
Les profondeurs d'implantation des éoliennes varient entre -11,62 m ZH et -24,66 m ZH. La profondeur moyenne d'implantation est -18,51 m ZH, la médiane -18,84 m ZH et l'écart-type 3,10 m.



**Figure 5. Bathymétrie sur la zone de projet (issue du fichier client 20110422\_GEOPHYGUERANDE\_sondes5x5m.xyz )**

La carte suivante présente la déclivité des fonds cartographiés au cours de la campagne de mesures géophysiques réalisée par In Vivo au printemps 2011 (In Vivo, 2011). Elle est également présentée sur l'annexe B-1. Elle représente le gradient bathymétrique, soit la pente du terrain, sur un rayon de 10 m. L'échelle de contour évolue du bleu pour les fonds plats au orange lorsque la pente est supérieure ou égale à 5%. Cette carte permet d'apprécier l'intensité du relief bathymétrique à l'échelle de la zone de projet. Elle met en évidence :

- Au nord-Est, des fonds relativement plans au pied du banc ;
- A l'Est et à l'Ouest de la zone, des fonds très accidentés, le plateau rocheux présentant des affleurements plus ou moins élevés, dont la déclivité peut être supérieure à un mètre ;
- Au centre de la zone, des fonds semblant moins accidentés.



**Figure 6. Carte des gradients bathymétriques (In Vivo 2011)**

## 2. IMPACT SUR L'HYDRODYNAMIQUE

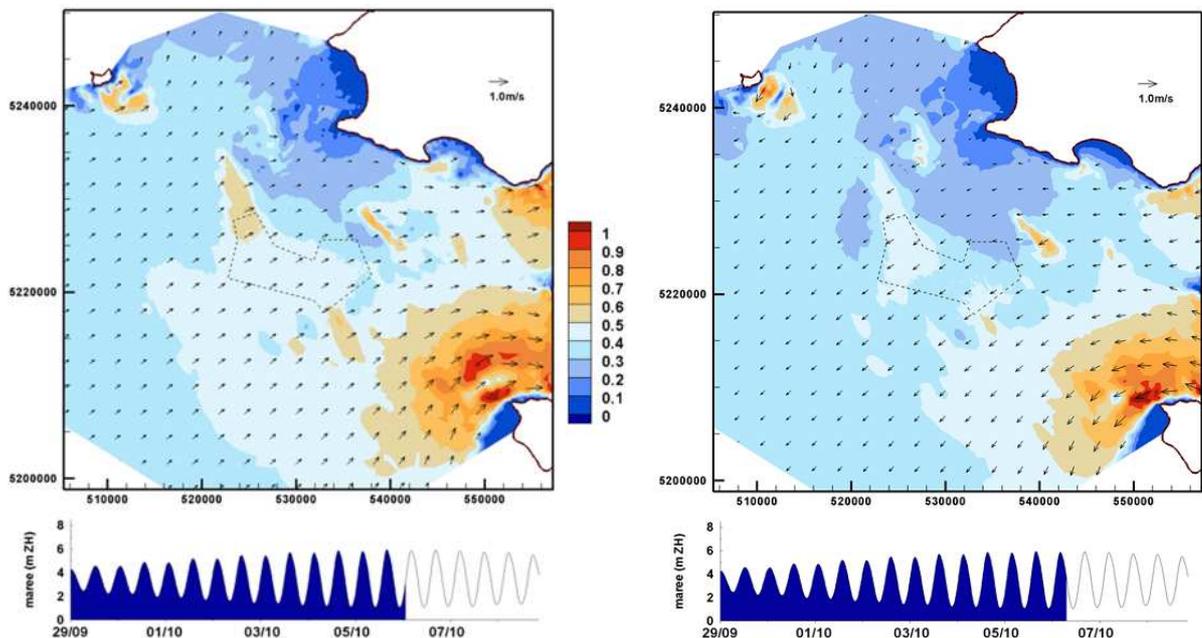
L'objet de cette tâche est de déterminer les impacts sur les courants induits par l'implantation du champ d'éoliennes. Ces impacts sont évalués en comparant les résultats de modèles numériques de courant entre les états initial et aménagé, sur la zone de projet et au voisinage (aire d'étude étendue).

### 2.1. DESCRIPTION DU REGIME HYDRODYNAMIQUE

La composante principale des courants sur le site est la composante astronomique, liée au phénomène de marée. Les intensités maximales de courant augmentent avec le coefficient de marée. Les pics de vitesse sont plus élevés au flot et au jusant pour les marées de vives-eaux et plus faibles pour les marées de mortes-eaux.

Dans la zone d'étude étendue, les courants sont alternatifs (alternance de flot et de jusant autour des étales de marée). Au flot, ils sont orientés vers l'ENE tandis qu'au jusant, ils sont orientés vers l'OSO. Ces directions peuvent être localement modifiées au voisinage d'accidents bathymétriques, comme les plateaux de la Banche et de la Lambarde.

Les figures suivantes illustrent les champs de courants sur la zone d'étude étendue aux pics de flot et de jusant pour une marée de coefficient 93. Il apparaît que sur la majeure partie de la zone, les courants restent inférieurs à 0,50 m/s, sauf vers l'estuaire de la Loire et l'entrée de la baie de Bourgneuf et chaussée des bœufs où les effets de remplissage et vidange conduisent à des vitesses atteignant, voire dépassant localement 1 m/s.



**Figure 7. Champs de vitesse au pic de flot pour une marée de coefficient C93 (état actuel) – Cf Annexe C, Figure C5**

**Figure 8. Champs de vitesse au pic de jusant pour une marée de coefficient C93 (état actuel) – Cf Annexe C, Figure C11**

## 2.2. METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DES IMPACTS

La méthodologie mise en œuvre pour étudier l'impact du champ d'éoliennes sur les conditions hydrodynamiques de la zone d'étude s'appuie sur une modélisation numérique des niveaux et des courants, dans l'état actuel et l'état aménagé (avec éoliennes) sur un minimum de 15 jours. Cette durée permet de balayer l'ensemble des coefficients de marée habituellement observés, de mortes-eaux à vives-eaux.

## 2.3. SYSTEME DE MODELISATION

Les modèles hydrodynamiques construits et exploités dans le cadre de l'étude sont basés sur le système TELEMAC, propriété d'EDF. TELEMAC, est développé par le LNHE (Electricité de France) et en est sa propriété. ARTELIA Eau & Environnement contribue à son développement.

Le « système TELEMAC » comporte un certain nombre de modules/logiciels qui sont mis en œuvre en fonction des besoins et objectifs de l'étude. Les logiciels du système TELEMAC utilisent tous la méthode aux éléments finis sur des maillages horizontaux triangulaires. L'intérêt d'utiliser une technique aux éléments finis est la possibilité de représenter finement le terrain (bathymétrie, côte, ouvrages portuaires, etc.). Il est ainsi possible d'affiner la précision du modèle en fonction des objectifs de l'étude, notamment pour représenter finement la bathymétrie à proximité du banc de Guérande, ou encore la fondation d'une éolienne au sein du modèle.

Pour les besoins de la présente étude, les courants et niveaux sont calculés à l'aide du logiciel TELEMAC-2D qui résout les équations régissant la dynamique des écoulements dits à surface libre dans une approche bidimensionnelle. Cette approche bidimensionnelle est adaptée dans la mesure où les profondeurs sont relativement faibles et ne justifient pas la mise en œuvre d'une modélisation tridimensionnelle (absence de stratification verticale comme confirmé par les mesures ADCP sur la zone).

Ce logiciel calcule donc, en tout point de la zone d'étude, les évolutions temporelles du niveau d'eau et des courants moyennés sur la hauteur d'eau. Pour les courants, le calcul restitue à la fois la direction et l'intensité (c'est-à-dire la vitesse de l'écoulement) en chacun des points du maillage.

## 2.4. MISE EN ŒUVRE DES MODELES HYDRODYNAMIQUES

Deux modèles régionaux, centrés sur le banc de Guérande, ont été construits : l'un représentant la situation actuelle, *i.e.* le banc de Guérande vierge de tout aménagement, le second représentant la situation aménagée, *i.e.* le banc de Guérande accueillant un parc de 80 éoliennes de fondation type monopieu de diamètre égal à 7 m.

Ces modèles ont la même emprise, donc le même frontière océanique, la même bathymétrie, un maillage identique en tous points hormis au niveau des éoliennes, considérées comme des obstacles dans le modèle de la configuration aménagée, maillées dans le modèle de la situation actuelle, cela afin que le différentiel des deux courantologies soit calculé aux mêmes nœuds de maillage.

Les deux modèles ont reproduit la même période : du 15 septembre au 21 octobre 2009. Pour cette période, qui présente une large gamme de coefficients de marée, de 43 (mortes-eaux) à 109 (vives-eaux exceptionnelles) (cf [Tableau 2](#)), nous disposons en effet de mesures de courant au droit du futur parc. Ces mesures ont permis de caler et valider le modèle de courantologie actuel (cf section 2.4.3).

**Tableau 2 – Coefficients de marée au cours de la période de simulation réalisée**

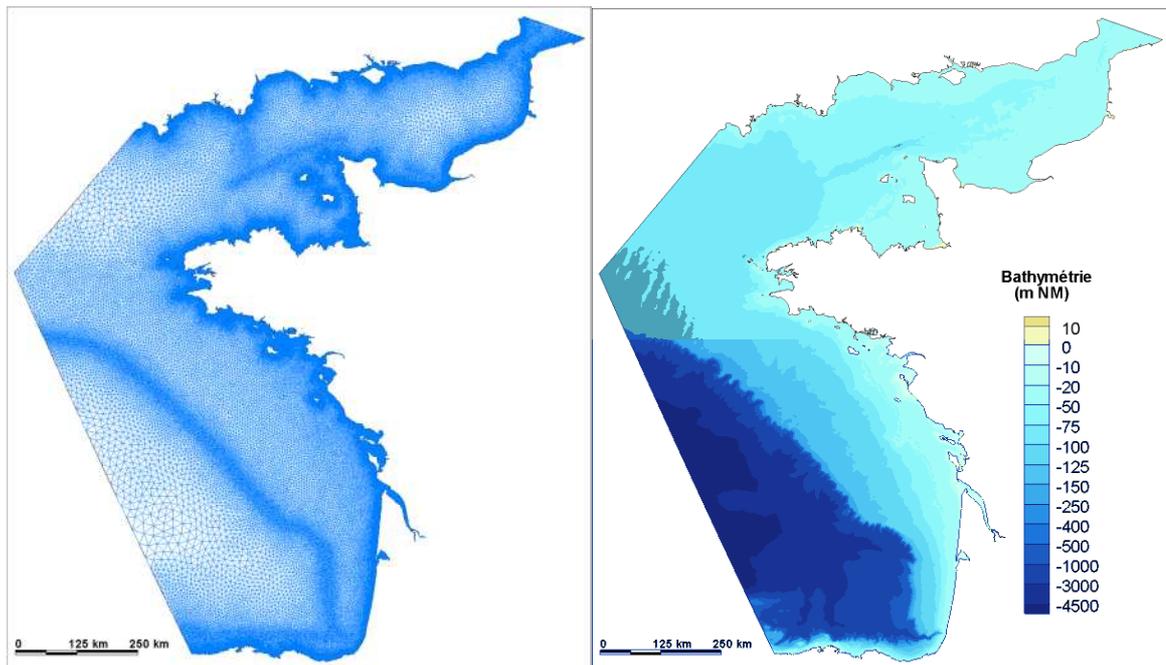
Site :	Saint-Nazaire	Matin			Soir		
Système horaire	TU + 1	Coeff.	Heures		Coeff.	Heures	
Mois/Année	Jour		Pleine Mer	Basse Mer		Pleine Mer	Basse Mer
sept-09	Mar. 15	52	01:53	07:22	60	14:16	20:09
sept-09	Mer. 16	69	02:45	08:32	78	15:03	21:09
sept-09	Jeu. 17	86	03:27	09:28	93	15:41	22:00
sept-09	Ven. 18	100	04:01	10:17	104	16:13	22:47
sept-09	Sam. 19	107	04:31	11:03	109	16:45	23:30
sept-09	Dim. 20	109	05:02	11:46	107	17:17	
sept-09	Lun. 21	104	05:34	00:12	99	17:48	12:28
sept-09	Mar. 22	93	06:05	00:52	87	18:20	13:08
sept-09	Mer. 23	80	06:37	01:31	72	18:51	13:48
sept-09	Jeu. 24	64	07:10	02:11	56	19:23	14:30
sept-09	Ven. 25	48	07:47	02:54	41	20:01	15:19
sept-09	Sam. 26	34	08:36	03:47	29	21:02	16:20
sept-09	Dim. 27	26	12:17	04:54			17:38
sept-09	Lun. 28	26	01:08	06:13	30	13:20	18:58
sept-09	Mar. 29	35	01:55	07:27	41	14:04	20:01
sept-09	Mer. 30	47	02:27	08:23	54	14:35	20:47
oct-09	Jeu. 01	60	02:50	09:06	66	15:03	21:25
oct-09	Ven. 02	72	03:14	09:44	77	15:31	22:00
oct-09	Sam. 03	81	03:41	10:19	85	16:00	22:34
oct-09	Dim. 04	88	04:10	10:52	91	16:30	23:06
oct-09	Lun. 05	92	04:40	11:26	93	17:01	23:39
oct-09	Mar. 06	93	05:10	12:00	92	17:32	
oct-09	Mer. 07	90	05:42	00:14	87	18:04	12:36
oct-09	Jeu. 08	83	06:15	00:51	78	18:39	13:15
oct-09	Ven. 09	73	06:51	01:32	66	19:18	13:59
oct-09	Sam. 10	60	07:33	02:19	54	20:12	14:53
oct-09	Dim. 11	48	08:36	03:17	44	23:21	16:00
oct-09	Lun. 12	43	11:51	04:28			17:20
oct-09	Mar. 13	45	00:38	05:50	49	13:02	18:43
oct-09	Mer. 14	56	01:38	07:08	63	13:59	19:54
oct-09	Jeu. 15	71	02:26	08:13	78	14:44	20:50
oct-09	Ven. 16	85	03:03	09:08	90	15:19	21:40
oct-09	Sam. 17	94	03:33	09:57	98	15:49	22:24
oct-09	Dim. 18	100	04:02	10:42	100	16:20	23:06
oct-09	Lun. 19	100	04:34	11:24	98	16:52	23:46
oct-09	Mar. 20	95	05:06	12:04	91	17:24	
oct-09	Mer. 21	86	05:40	00:24	81	17:56	12:43

Les deux modèles ont été forcés en chacun des nœuds de calcul composant leurs frontières liquides par les niveaux d'eau et vitesses calculés en ces mêmes points par un modèle de grande emprise.

Le modèle de grande emprise ainsi que les deux modèles locaux centrés sur Guérande sont présentés dans les sections suivantes : bathymétrie, maillage, conditions limites. La phase de calage est ensuite détaillée avant de présenter les résultats des simulations sur les états actuel et aménagés.

#### 2.4.1. Modèle hydrodynamique de grande emprise

Le modèle de grande emprise est présenté sur la [Figure 9](#). Le but de ce modèle est de représenter la dynamique des courants de marée à l'échelle globale de la Manche et l'Atlantique et de fournir des conditions limites (en niveaux et vitesses) au modèle local de Guérande.



**Figure 9. Maillage et bathymétrie du modèle Atlantique - Manche**

Ce modèle de grande emprise est un modèle de propagation de la marée forcée par les harmoniques de marée. Il a été réalisé à l'aide du logiciel TELEMAC-2D. La validation du modèle est réalisée par comparaison des résultats de simulation avec des mesures marégraphiques, cela en 174 points répartis le long des côtes de la Manche et de l'Atlantique.

Pour les besoins de notre étude, une vérification de ce calage a été effectuée sur les prédictions du SHOM disponibles dans l'emprise des modèles locaux pour la période de calcul (septembre – octobre 2009).

A l'issue de ces vérifications, les cotes de la surface libre ainsi que les vitesses calculées par le modèle de grande emprise ont été extraites aux localisations des nœuds composant la frontière océanique des modèles locaux.

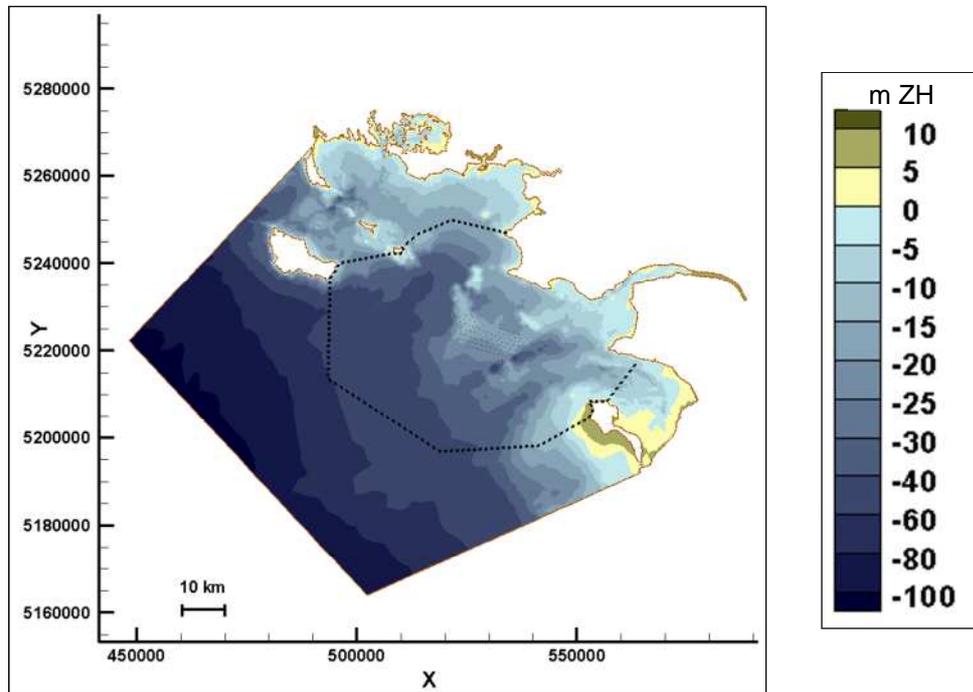
Ainsi le modèle de grande emprise a fourni les données de forçage astronomique aux deux modèles locaux.

## **2.4.2. Description des modèles hydrodynamiques locaux**

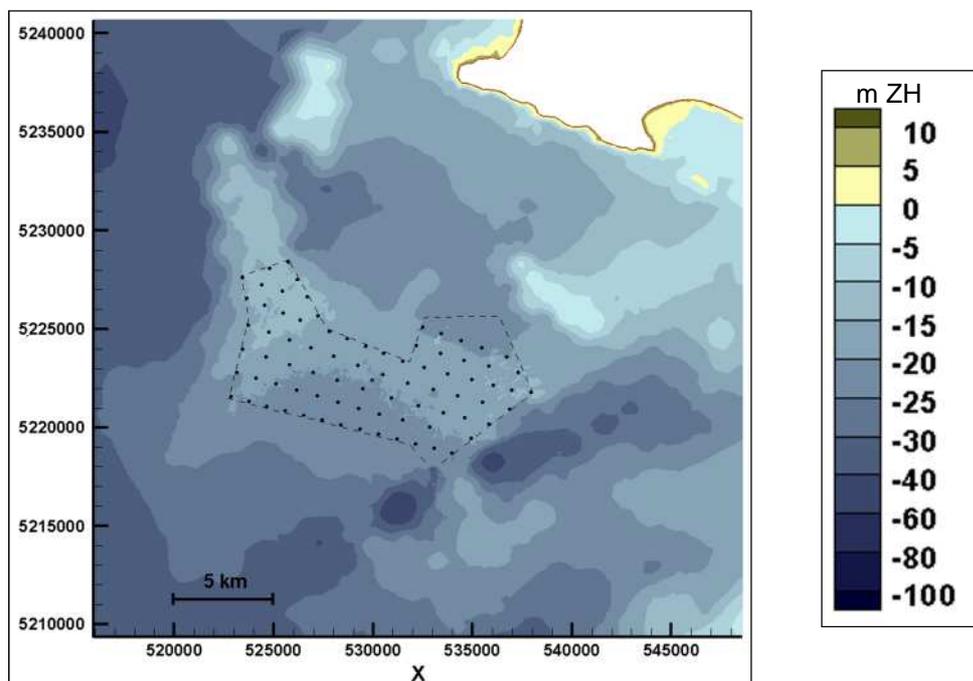
### **2.4.2.1. Emprise et bathymétrie**

L'emprise des modèles locaux (situation actuelle et aménagée) est centrée sur la future zone du projet et s'étend sur une centaine de kilomètres le long de la côte Atlantique, de Belle-Ile au nord à la presqu'île de Noirmoutier au Sud. Elle s'étend sur près de 80 km au large.

La bathymétrie des modèles locaux est issue d'une compilation des sondes SHOM, des cartes marines et du levé bathymétrique fourni par le client. Elle est illustrée sur la [Figure 10](#) ci-après. Les pointillés délimitent la zone d'étude étendue.



**Figure 10.** Emprise locale et bathymétrie (m ZH) des modèles locaux. L'emplacement des futures éoliennes est indiqué par un point noir.



**Figure 11.** Emprise locale et bathymétrie (m ZH) des modèles locaux. L'emplacement des futures éoliennes est indiqué par un point noir.

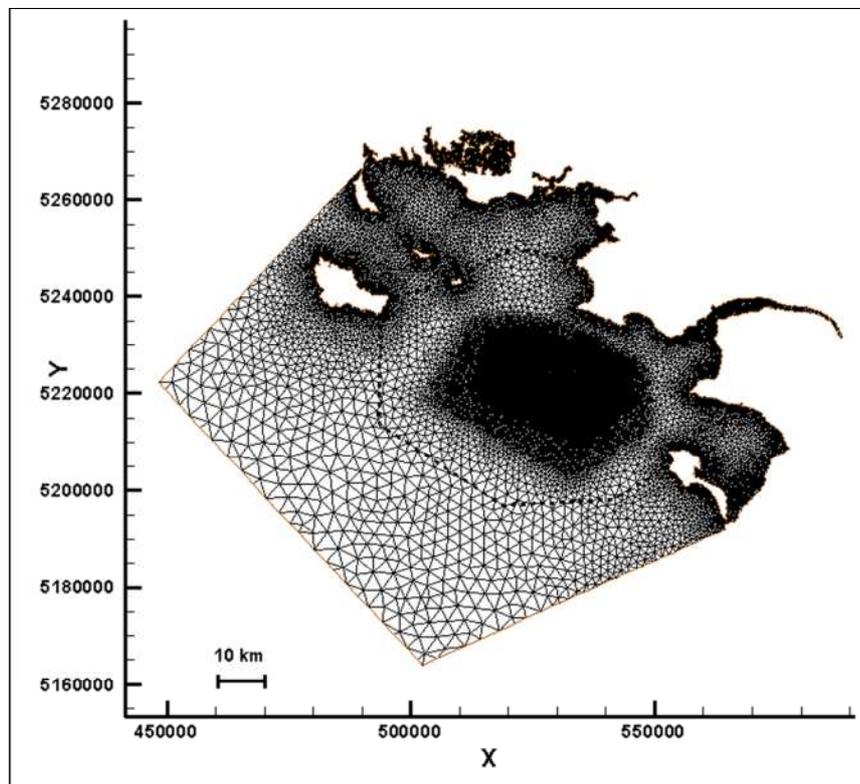
### 2.4.2.2. Maillage

La technique aux éléments finis offre la possibilité de représenter finement le terrain (bathymétrie, côte, ouvrages portuaires, etc.). Dans le cas de cette étude le maillage a été particulièrement raffiné afin de :

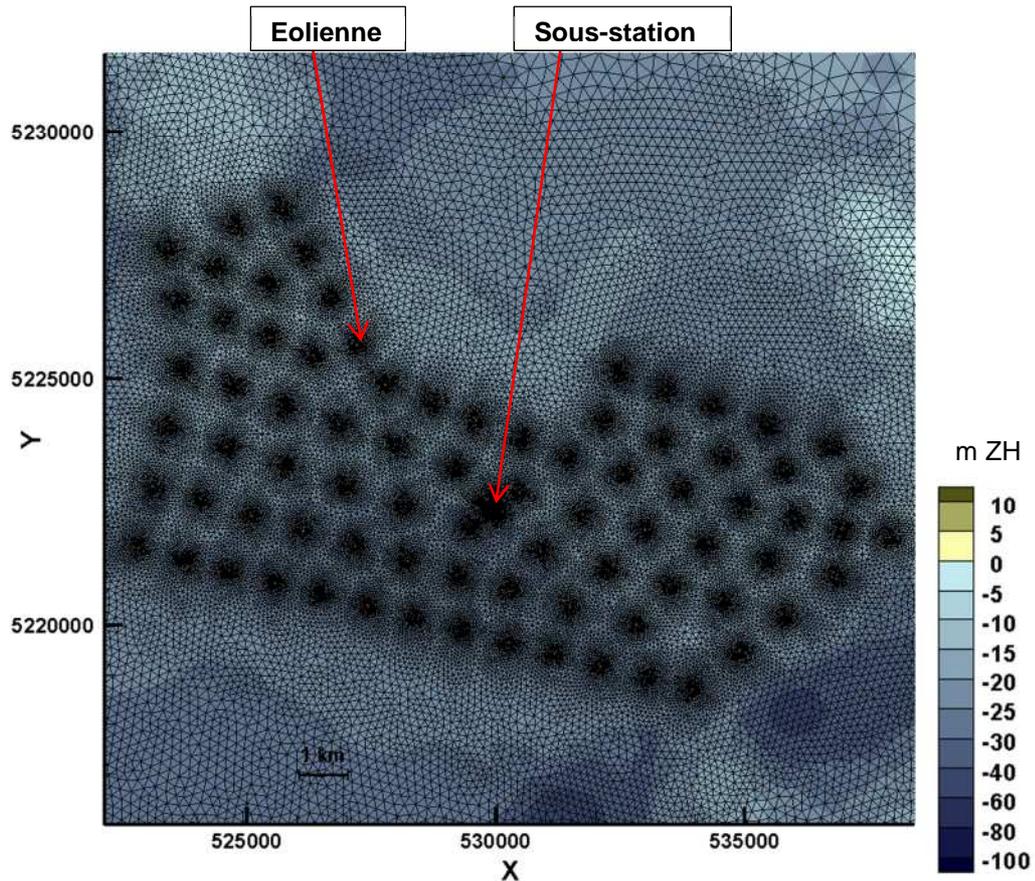
- décrire finement la bathymétrie du banc de Guérande, en cohérence avec la précision du levé bathymétrique local et
- décrire également finement le champ proche de chaque éolienne pour une meilleure représentation de l'écoulement au sein du futur parc.

La taille de la maille minimale est de 3,50 m au niveau des fondations des futures éoliennes et de 1,50 m au niveaux des pieux de la future sous-station.

Le maillage comporte au final environ 50 000 nœuds et est illustré sur la [Figure 12](#) et la [Figure 13](#) suivantes

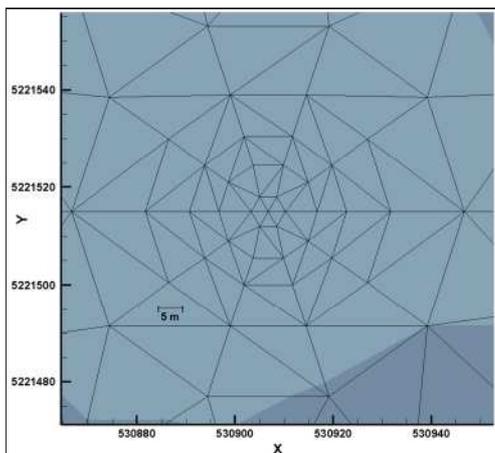


**Figure 12. Maillage et emprise des modèles hydrodynamiques locaux**

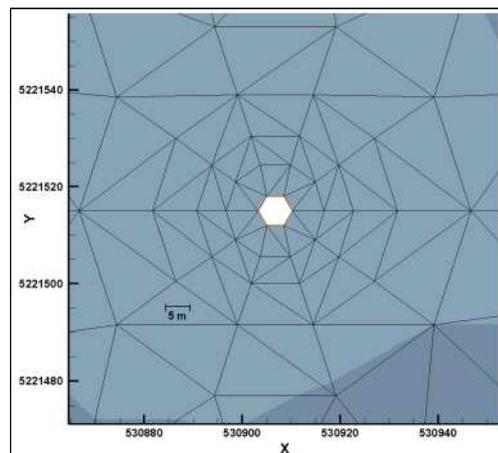


**Figure 13.** Zoom sur le maillage de la zone de projet (bathymétrie en m ZH en fond de carte)

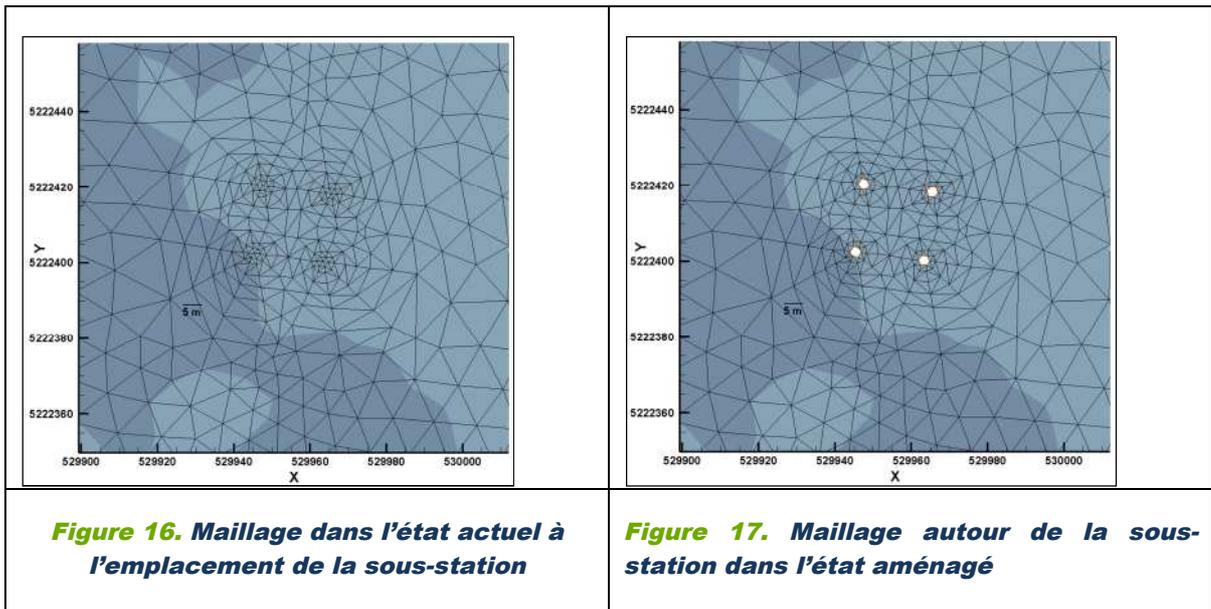
Le maillage est identique pour la situation actuelle et la situation aménagée, différant seulement au niveau des fondations des éoliennes et des pieux de la sous-station. Les fondations d'éoliennes de 7 m de diamètre sont représentées dans le maillage par un hexagone de 3,50 m de côté. Les pieux de 3 m de diamètre de la sous-station sont représentés par un hexagone de 1,50 m de côté. Dans la configuration actuelle, l'intérieur des hexagones est maillé. Le maillage avec et sans éolienne est illustré sur la Figure 14 et la Figure 15 suivantes.



**Figure 14.** Maillage dans l'état actuel à l'emplacement d'une fondation d'éolienne



**Figure 15.** Maillage autour d'une fondation d'éolienne dans l'état aménagé



### 2.4.2.3. Conditions limites

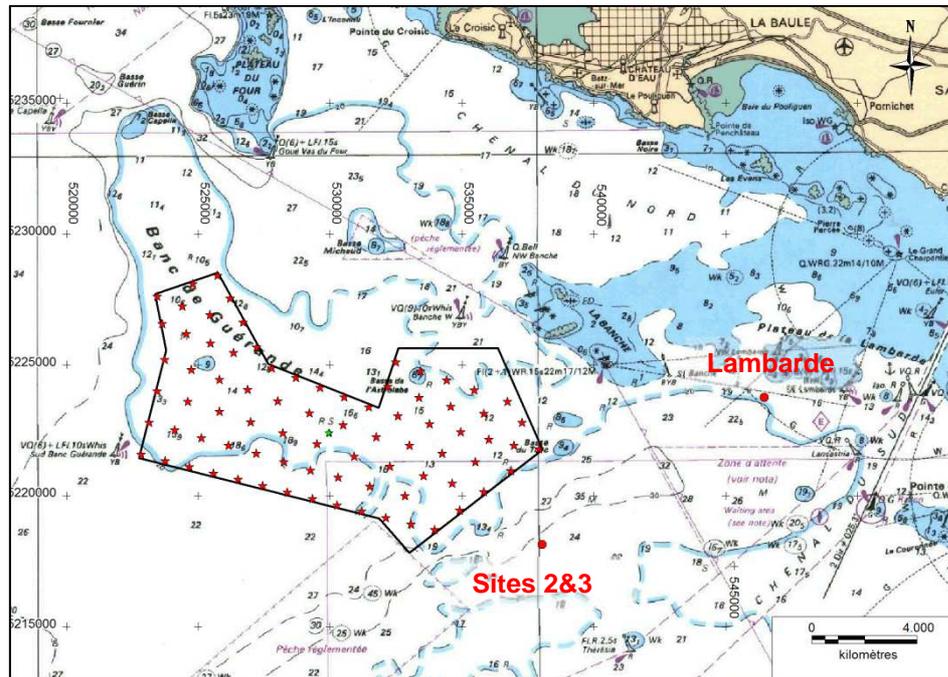
Les modèles locaux sont forcés en leurs frontières océaniques par les hauteurs d'eau et vitesses issues des résultats hydrodynamiques du modèle de grande emprise. D'après les études précédentes réalisées par ARTELIA dans l'estuaire externe de la Loire (ARTELIA 2008, 2012) l'influence du débit de la Loire sur les courants sur la zone d'intérêt (zone projet) est négligeable : on néglige les débits de la Loire et de la Vilaine dans nos simulations de l'hydrodynamique locale.

### 2.4.3. Calage du modèle hydrodynamique local (état actuel)

Le modèle mis en œuvre pour le projet du parc éolien de Guérande est une adaptation du modèle existant (courant et agitation) de l'estuaire externe de la Loire développé par ARTELIA dans le cadre des différentes études menées pour le compte du GIP Loire Estuaire et du Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire (GPMNSN), notamment les études de devenir des clapages sur le site de la Lambarde. Aussi disposons-nous, pour le calage du présent modèle local de Guérande des mesures ADCP réalisées à proximité du site de la Lambarde du 24 septembre 2009 au 14 octobre 2009 (IMDC, 2010). La localisation des ADCP utilisés pour le calage est donnée dans le tableau ci-après.

**Tableau 3 – Coordonnées des points de calage**

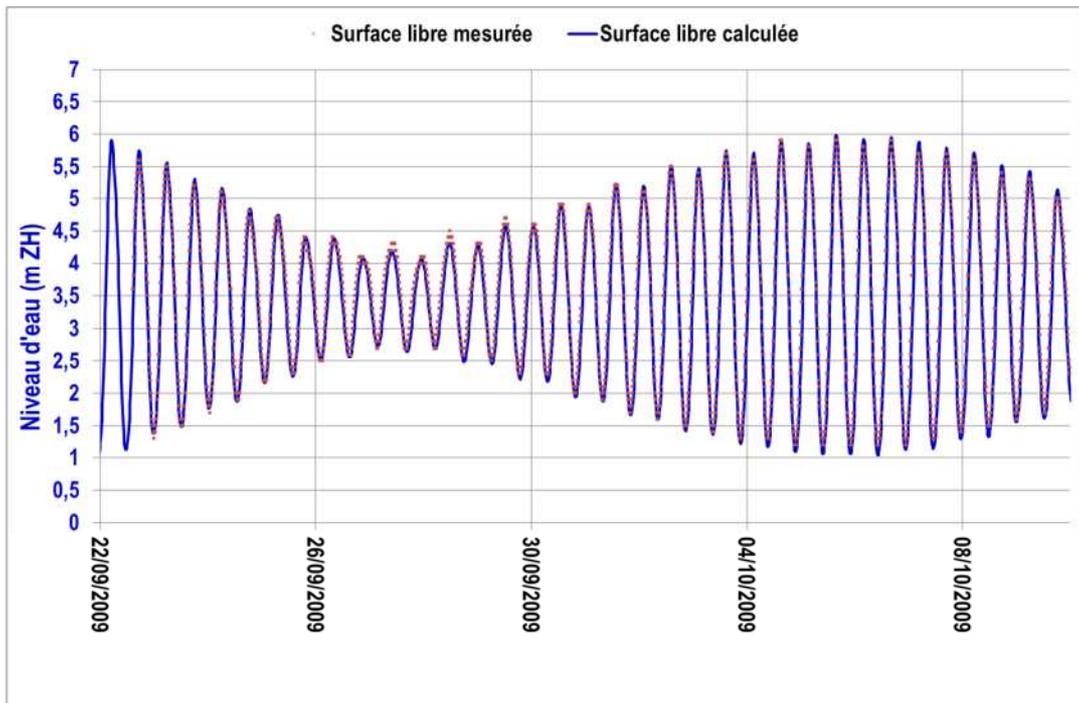
	X (WGS84 UTM 30N)	Y (WGS84 UTM 30N)	Latitude	Longitude
<b>Lambarde</b>	546 458,15	5 223 758,00	47°9,937'N	2°23,221'O
<b>Sites 2&amp;3</b>	538 034,35	5 218 134,24	47°6,937'N	2°29,918'O



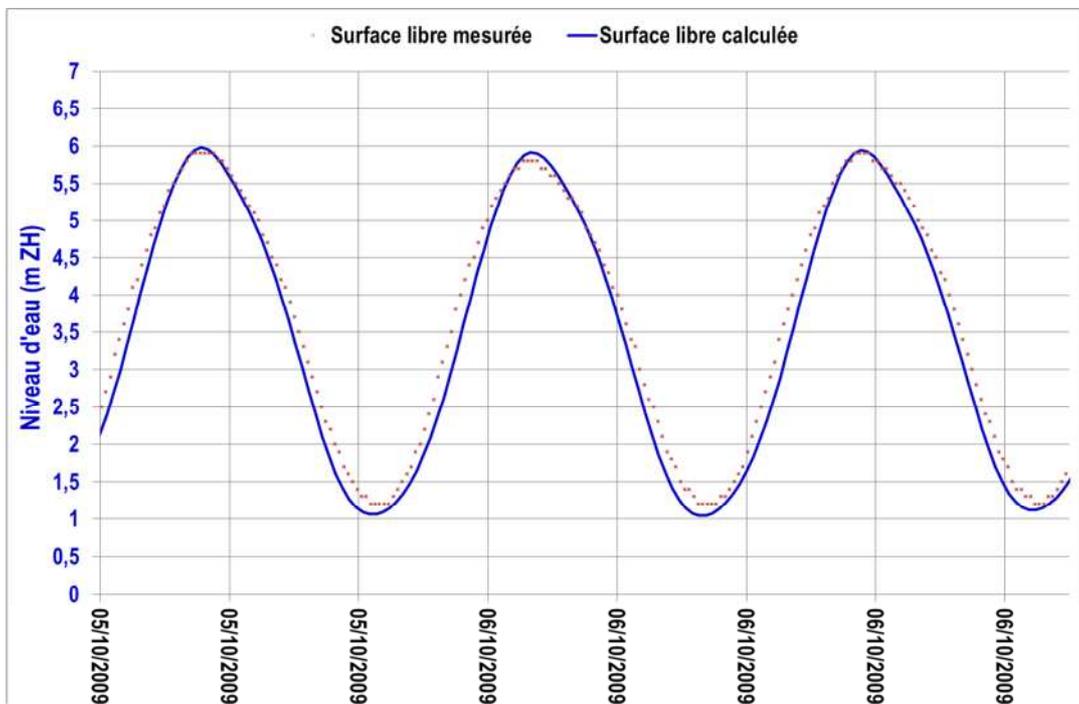
**Figure 18. Localisation des points de mesure ADCP (propriété GPMNSN), nommés « Lambarde » et « Sites 2&3 »**

Pour le calage, la période de simulation choisie est celle des mesures disponibles : du 24 septembre au 14 octobre 2009. Cette période, outre la comparaison possible des cotes d'eau et vitesses calculées avec des mesures in situ, offre une large gamme de coefficients de marée pour l'exploitation de la courantologie, reproduisant des marées de vives-eaux exceptionnelles, vives-eaux et mortes-eaux.

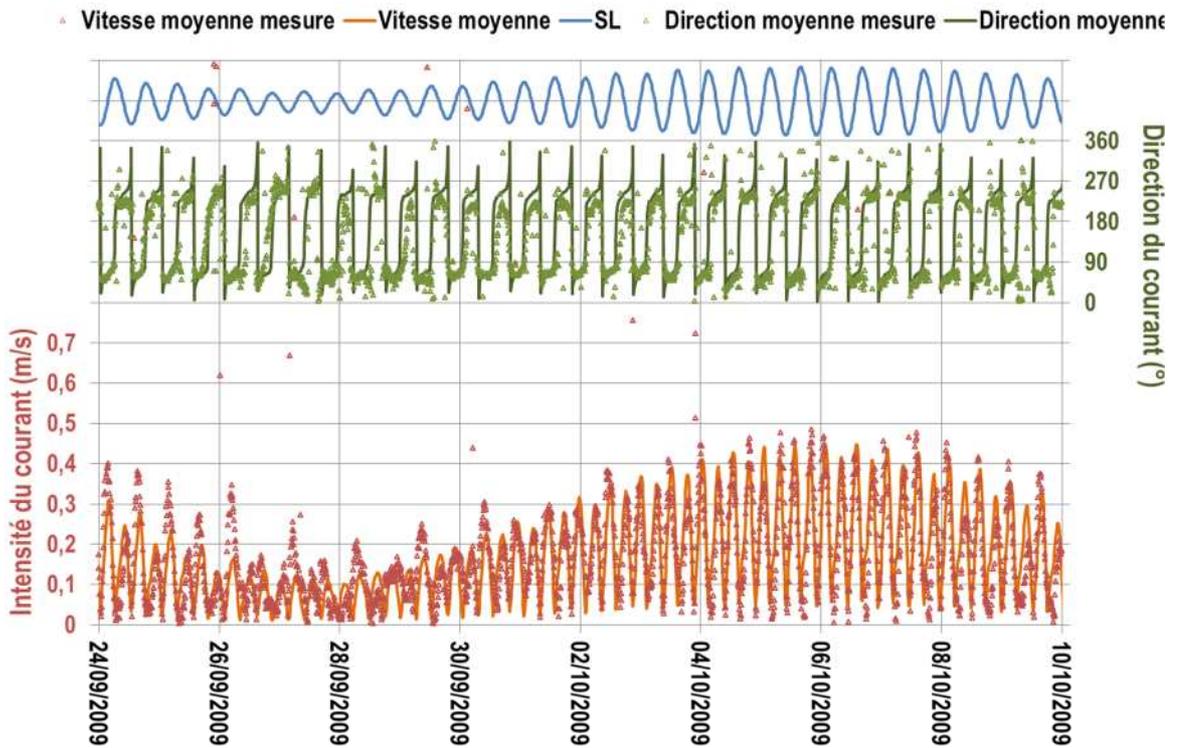
Les résultats du calage sur les mesures ADCP sont présentés sur les Figure 19, Figure 20, Figure 21 et Figure 22.



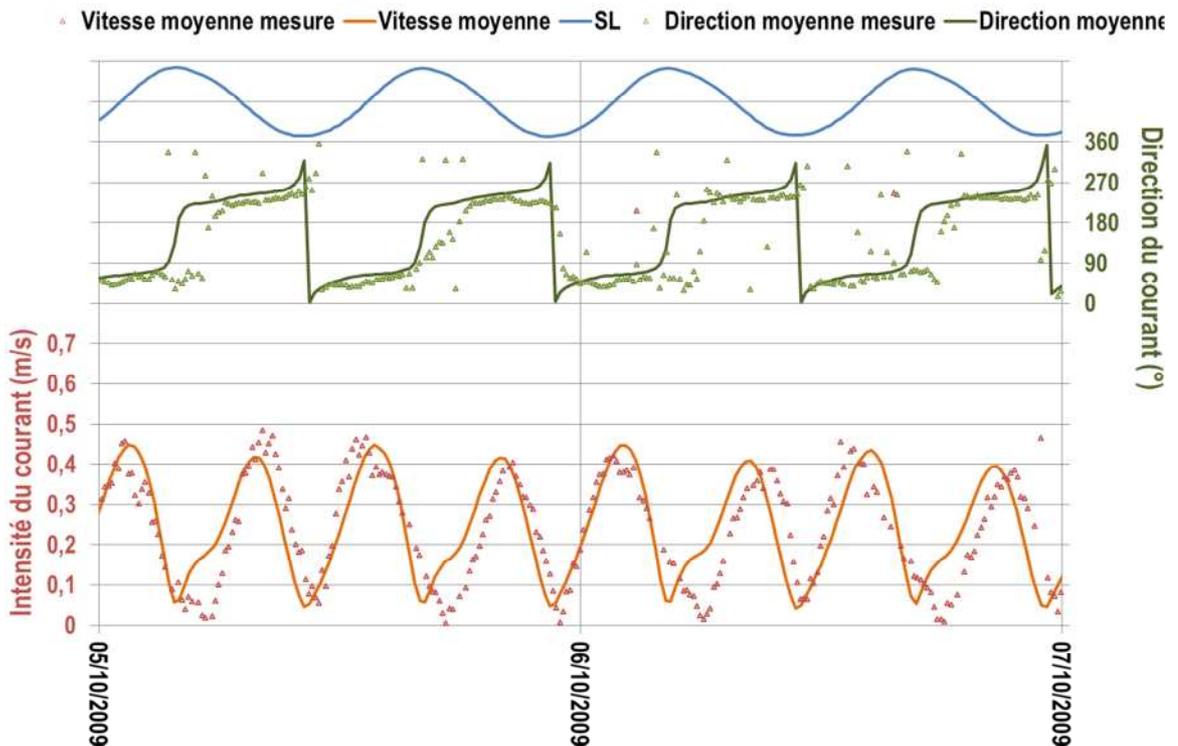
**Figure 19.** Comparaison de la cote de la surface libre calculée avec celle mesurée sur le site de Lambarde entre le 24 septembre 2009 et le 10 octobre 2009



**Figure 20.** Zoom sur la comparaison de la cote de la surface libre calculée avec celle mesurée sur le site de Lambarde entre le 24 septembre 2009 et le 10 octobre 2009



**Figure 21.** Comparaison de la vitesse calculée (intensité et direction) avec celle mesurée sur le site 2&3 entre le 24 septembre 2009 et le 10 octobre 2009



**Figure 22.** Zoom sur la comparaison de la vitesse calculée (intensité et direction) avec celle mesurée au point « sites 2&3 » entre le 24 septembre 2009 et le 10 octobre 2009

Les niveaux d'eau sont mesurés à la station située à l'intérieur de la zone de clapage de la Lambarde. A ce point, le fond est à la cote -17,4m ZH. Le point de mesure « Lambarde » est localisé sur la [Figure 18](#).

Les niveaux d'eau mesurés sont comparés aux résultats de la modélisation sur la période des mesures : 24 septembre 2009 au 14 octobre 2009 sur la [Figure 19](#). Un zoom sur les marées de vives-eaux du 5 au 7 octobre est effectué sur la [Figure 20](#). La comparaison est bonne, les niveaux de pleine mer et de basse mer étant bien reproduits, notamment pour les forts coefficients de marée. Les niveaux de basse mer sont légèrement sous-estimés.

D'autre part, le signal de marée calculé présente un jusant légèrement en avance sur les mesures, et à l'inverse un léger retard durant le flot : ces phénomènes peuvent être imputés à la bathymétrie moins finement décrite par le modèle en ce point éloigné de la zone d'étude et d'intérêt, et où le maillage est donc plus lâche et non couvert par les données bathymétriques de détail. On juge cependant le calage en niveau tout à fait satisfaisant pour les besoins de l'étude,

Les vitesses sont mesurées par un ADCP placé à la station située sur le site dit « 2 & 3 » (nommé ainsi dans la précédente étude), à une cote de -33,4m ZH dans un paléo-lit de la Loire assez étroit. Ce point de mesure dit « 2&3 » est localisé sur la [Figure 18](#).

Les courbes de vitesses temporelles au site 2&3 sont présentées sur la [Figure 21](#) et la [Figure 22](#), pour la période des mesures et avec un zoom de 48 h centré sur les vives eaux. Ces figures comparent les mesures des vitesses moyennes avec les vitesses moyennes calculées par le modèle en ce point. On observe que le modèle représente correctement l'intensité de la vitesse moyenne sur la colonne d'eau, au niveau de la station de mesure « site 2&3 ». La direction est moins bien représentée avec des différences qualitatives de comportement des courants et des écarts de direction aux pics de vitesse atteignant 45°. Cela est certainement dû aux effets géométriques du paléo-lit car d'une part, l'appareil de mesure se trouvait sur une pente et d'autre part les effets de densité peuvent devenir prépondérants sur ce type de géométrie très marquée. Il est à noter que ce phénomène a d'ailleurs été mis en évidence lors de la précédente étude (ARTELIA 2012).

Notons également que le modèle mis en œuvre est un modèle de marée prédictif, qui ne tient pas compte des vents existants au moment des mesures et qui peuvent influencer sur l'intensité et la direction des courants mesurés.

Ainsi, malgré ce léger décalage en direction, le modèle est jugé parfaitement calé, et permet de reproduire de manière satisfaisante les processus hydrauliques sur la zone et de déterminer les impacts potentiels du projet (approche comparative).

## 2.5. RESULTATS

### 2.5.1. Exploitation des modèles

Les modèles locaux (état actuel et état aménagé) sont exploités sur la période du 15 septembre 2009 au 21 octobre 2009.

Trois marées sont analysées plus particulièrement :

- Marée de coefficient 93 du 06 octobre 2009,
- Marée de coefficient 73 du 09 octobre 2009,
- Marée de coefficient 43 du 12 octobre 2009.

Pour la marée de coefficient 93, les résultats sont présentés en annexe C sous forme :

- Cartes de champs de courant dans les états actuel et aménagé, à l'échelle de la zone d'étude étendue, *heure par heure* (Annexe C, Figures C-2 à C-13);

- Cartes de champs de courant dans les états actuel et aménagé à mi- flot et à mi- jusant<sup>2</sup>, à l'échelle du parc, (Annexe C, Figures C-15 à C-16)
- Cartes de champs de courant dans les états actuel et aménagé, à l'échelle du parc, *heure par heure* (Annexe C, Figures C-18 à C-29)
- Cartes de différentiel des intensités de courant : état aménagé – état actuel, à l'échelle du parc, à mi- flot et à mi- jusant (Annexe C, Figures C-31 à C-32),
- Cartes de différentiel des intensités de courant : état aménagé – état actuel, à l'échelle du parc, *heure par heure* (Annexe C, Figures C-34 à C-45).
- Séries temporelles des niveaux et courants en 5 points P1 à P5. (Annexe C, Figures C-47 à C-54)
- Zoom local de différentiel des vitesses (Annexe C, Figures C-68 à C-69).

Pour les marées de coefficient 73 et 43, les résultats sont présentés en Annexe C sous forme :

- Cartes de champs de courant dans les états actuel et aménagé à mi- flot et à mi- jusant, à l'échelle du parc, (Annexe C, Figures C-56 à C-57, C-62 à C-63)
- Cartes de différentiel des intensités de courant : état aménagé – état actuel, à l'échelle du parc, à mi- flot et à mi- jusant (Annexe C, Figures C-59 à C-60, C-65 à C-66)

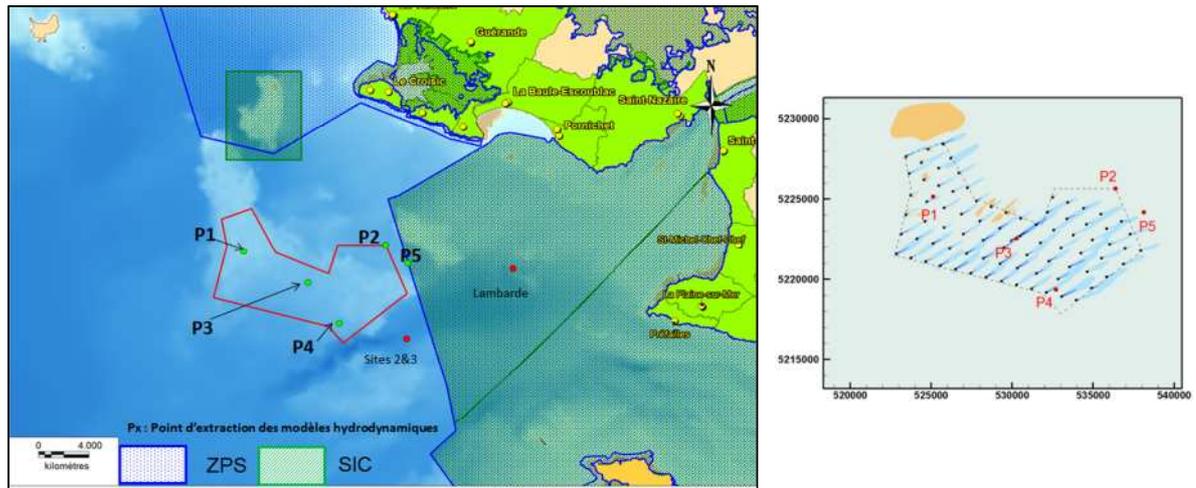
Les points d'extraction des séries temporelles de courant ont été choisis de manière à :

- Etudier la courantologie au sein du parc :
  - Point P1, localisé au-dessus d'une zone de faible profondeur dans la partie nord-ouest de la zone d'implantation,
  - Point P3, localisé à proximité de la future sous-station,
  - Point P4, localisé par des profondeurs de -20,0 m ZH environ, dans la partie sud-est de la zone d'implantation.
- Etudier la courantologie entre le parc et la côte :
  - Point P2, point de la zone d'appel d'offres le plus proche de la côte,
  - Point P5, en limite de la Zone de Protection Spéciale (Natura 2000).

La localisation de ces points est illustrée sur la [Figure 23](#) et les coordonnées sont données dans le [Tableau 4](#). Les résultats sont présentés dans le paragraphe suivant.

---

<sup>2</sup> Les conditions mi-flot, définie par basse-mer + 3h et mi-jusant, définie par pleine mer + 3h sont représentatives, sur l'ensemble de la zone, des pics de flot et de jusant. Rappelons néanmoins que les pics d'intensité ne sont pas atteints au même instant t en chaque point du domaine de calcul, du fait du caractère progressif de l'onde de marée. Ainsi les cartes à mi-flot et mi-jusant représentatives des courants en tout point au même instant t ne représentent pas exactement les intensités maximales en tout point, mais lorsque non exactes, sont proches



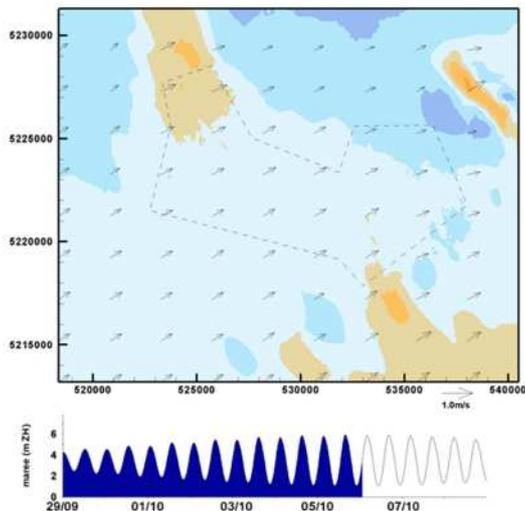
**Figure 23.** Localisation des points d'extraction des séries temporelles

**Tableau 4 – Coordonnées des points d'extraction des séries temporelles de niveau et courant**

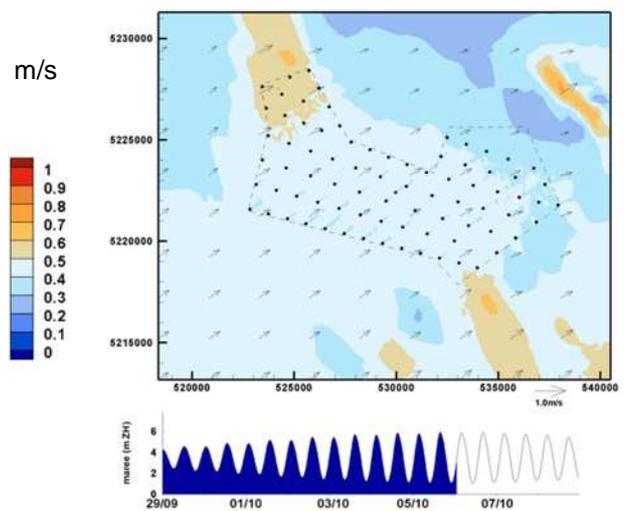
Point	X (WGS84 UTM 30N)	Y (WGS84 UTM 30N)	Profondeur (m ZH)
P1	525 116,57	5 225 152,50	-12,4
P2	536 381,79	5 225 653,99	-21,6
P3	530 232,89	5 222 622,31	-20,0
P4	532 700,11	5 219 366,98	-20,8
P5	538 130,89	5 224 186,20	-18,9

### 2.5.2. Intensité et direction des courants

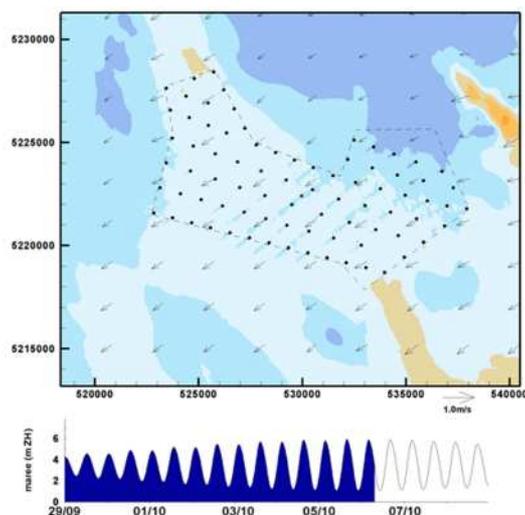
La Figure 24, la Figure 25, la Figure 26, la Figure 27 présentent les champs de vitesse à BM+3 (basse-mer + 3h) et PM+3 (pleine-mer + 3h), ce qui correspond environ aux pics de flot et de jusant dans l'état actuel et l'état aménagé, pour la marée de coefficient 93.



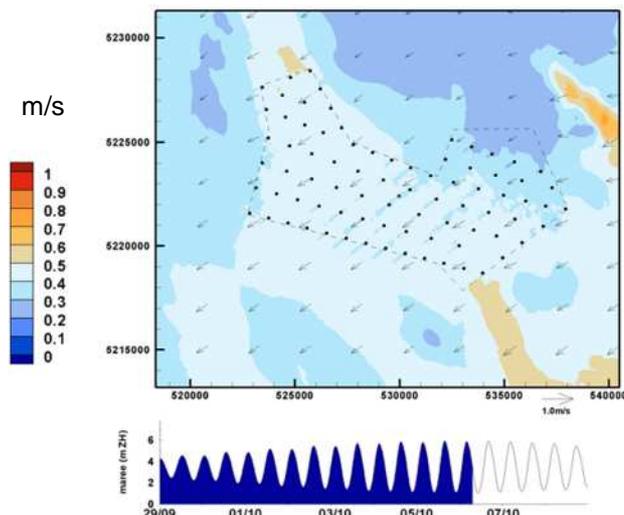
**Figure 24. Champs de vitesse maximale au flot (m/s) (C93), état actuel (Cf Annexe C, Figure C15)**



**Figure 25. Champs de vitesse maximale au flot (m/s) (C93), état aménagé (Cf Annexe C, Figure C15)**



**Figure 26. Champs de vitesse maximale au jusant (m/s) (C93), état actuel (Cf Annexe C, Figure C16)**



**Figure 27. Champs de vitesse maximale au jusant (m/s) (C93), état aménagé (Cf Annexe C, Figure C16)**

Les vitesses de courant sont globalement uniformes sur la zone d'implantation, plus fortes au flot qu'au jusant. Les vitesses maximales en chaque point ne dépassent pas 0,60 m/s sur la partie centrale du parc. Dans le coin nord-ouest, où les fonds diminuent, les vitesses maximales sont plus fortes, sans toutefois dépasser 0,70 m/s. Dans le coin nord-est à l'inverse, les profondeurs sont plus importantes et les courants sont ralentis : les vitesses maximales ne dépassent pas 0,50 m/s. La direction des courants est uniforme. Les courants portent à l'ENE au flot et à l'OSO au jusant.

Pour les marées de coefficient 73 et 43, les mêmes observations peuvent être faites, avec des intensités de courant réduites.

Sur les figures dans l'état aménagé, sont visibles des réductions de vitesse dans le sillage des éoliennes.

### 2.5.3. Impact des fondations d'éoliennes

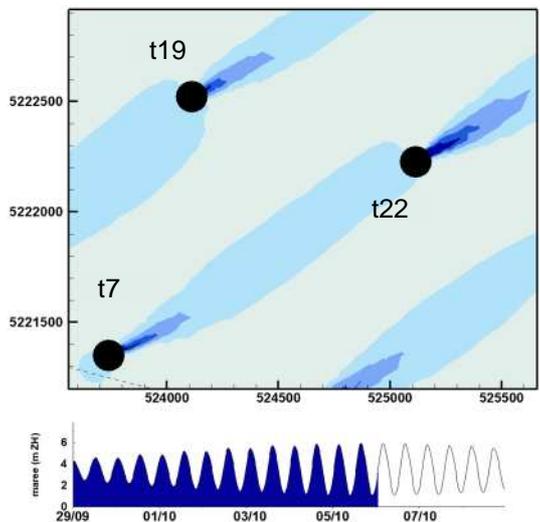
#### 2.5.3.1. Impact à l'échelle d'une fondation

Les figures suivantes illustrent l'impact des fondations d'éoliennes sur les courants à l'échelle locale. Ces figures correspondent aux pics de flot et de jusant pour la marée de coefficient 93 et sont centrées autour des éoliennes t7, t19 et t22 (cf Annexe A, localisation sur la Figure 31) et sont commentées ci-après.

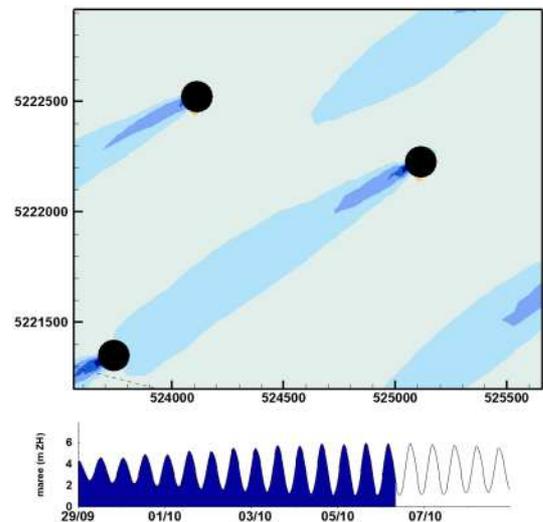
A l'amont et à l'aval des éoliennes, les vitesses d'écoulement sont réduites.

**A l'amont** de l'écoulement, les vitesses sont réduites car la fondation constitue un point d'arrêt du fluide. En dehors du champ proche (non modélisé), la vitesse est réduite d'au plus 0,03 m/s, ce qui correspond à une réduction de 6 à 7,5 % du courant incident. Pour l'éolienne t7, située en bordure sud du parc et donc à l'amont de l'écoulement au flot, c'est-à-dire en dehors de tout sillage d'éoliennes, la vitesse n'est plus réduite que de 0,01 m/s (soit 2 à 2,5 %) à une distance de ~160 m pour la marée de coefficient 93 au flot. Cette distance se réduit tandis que le coefficient de marée diminue.

La réduction des vitesses **à l'aval** de la fondation est liée à la zone d'ombre constituée par l'éolienne. Cette réduction de vitesse, dans le sillage de l'éolienne, s'étend à l'aval de l'écoulement. La réduction de vitesse est d'au plus 0,05 m/s (soit entre 10 et 12,5 % de la vitesse initiale) à une distance de 220 m et est d'au plus 0,03 m/s à ~390 m dans le sillage de l'éolienne t7 au flot. Cette distance est de ~450 m dans le sillage de l'éolienne t22 au jusant. Ces distances se réduisent tandis que le coefficient de marée diminue.



**Figure 28. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé - état actuel) à mi-flot pour une marée de coefficient C93 (Cf Annexe C, Figure C68)**



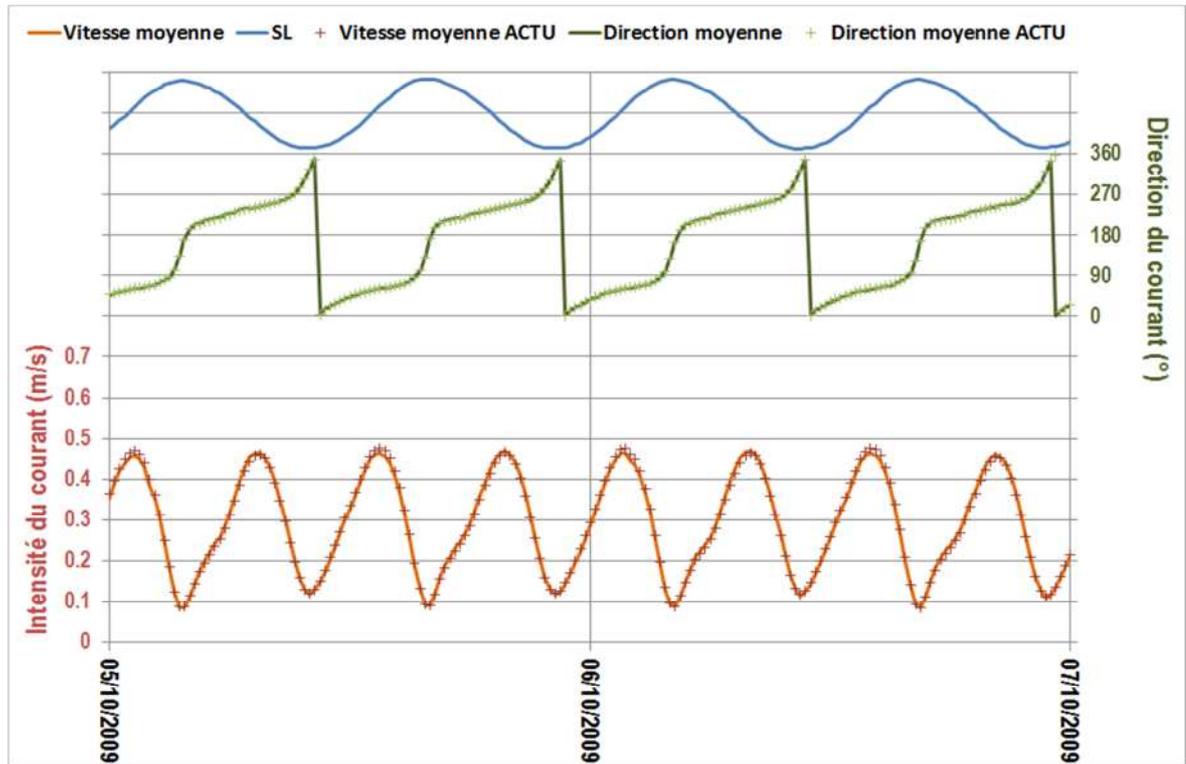
**Figure 29. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé - état actuel) à mi-jusant pour une marée de coefficient C93 (Cf Annexe C, Figure C69)**

#### 2.5.3.2. Impact à l'échelle du parc

Les impacts du champ d'éoliennes sur l'hydrodynamique concernent les courants uniquement. La variation du niveau d'eau au cours de la simulation est identique dans les configurations actuelle et aménagée, ainsi que les directions des courants.

D'après les figures de différentiel heure par heure réalisées pour la marée de coefficient 93, il apparaît que les impacts sur les courants sont les plus forts lorsque les vitesses d'écoulement sont les plus fortes. L'impact est donc plus important aux pics d'intensité des courants et pour les marées de plus fort coefficient.

Ceci est confirmé par les séries temporelles de vitesse aux différents points d'extraction (Annexe C, Figures C-47 à C-54), dont celle du point P4 est présentée ci-après.



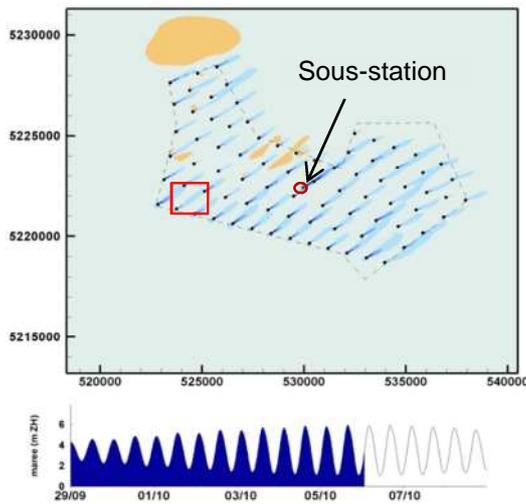
**Figure 30. Série temporelle du niveau et des courants (intensité et direction) au point P1, centrée autour de la marée de coefficient 93.**

Les figures ci-dessous présentent les cartes d'impacts aux pics de flot et de jusant pour les trois marées étudiées. Elles sont également présentées en (Annexe C, Figures C31 et C-32).

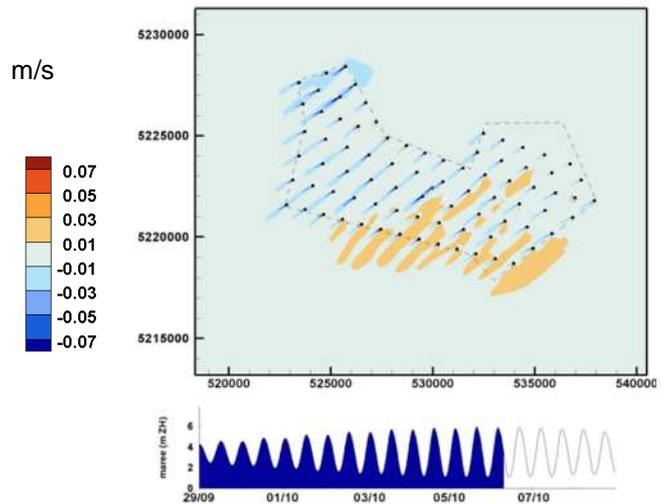
Il apparaît que les impacts restent confinés à l'intérieur du parc, dans le sillage des éoliennes où les vitesses sont réduites (cf section précédente). Ces vitesses sont réduites d'au plus 0,01 m/s à une distance d'au plus 1,5 km au delà de la bordure du parc pour les marées de coefficient 93, d'au plus 1,2 km pour la marée de coefficient 73 et d'au plus 570 m pour la marée de coefficient 43.

Les augmentations locales de vitesse que l'on observe sur les cartes (zones oranges) ne sont pas liés aux turbines à proprement dit mais sont liées au fait que les cartes d'impact sont produites exactement au même instant t, par exemple au pic de flot et de jusant *dans l'état actuel*. Or l'aménagement peut induire localement un infime déphasage (quelques secondes) qui conduit à atteindre le pic de flot (ou de jusant) quelques secondes avant ou après dans l'état aménagé. Ce phénomène est visible sur les séries temporelles de courant notamment au point P4.

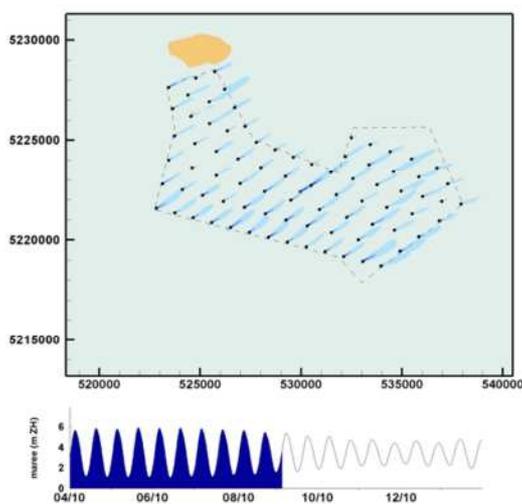
Les variations temporelles de vitesse étant très rapides à mi-flot et mi-jusant, faire le différentiel des courants au même instant peut générer de légers écarts de vitesse qui correspondent à un déphasage et non un ralentissement ou accélération des courants au passage de l'aménagement. Dans le cas présent, ces écarts restent dans tous les cas très faibles, et ne dépassent pas +0,015 m/s (mais inclus dans la gamme de couleurs 0,01 – 0,03).



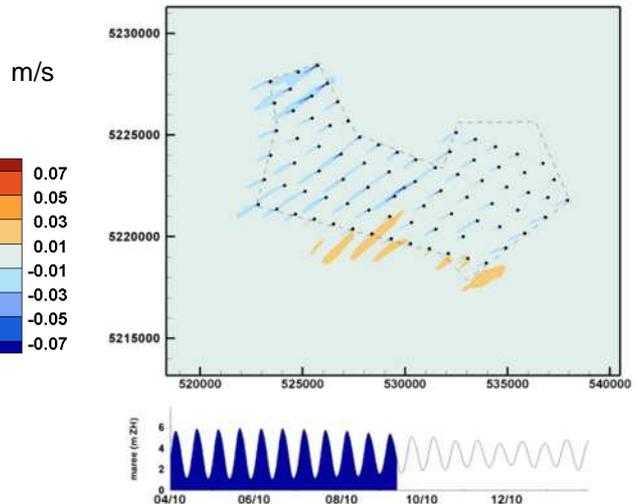
**Figure 31.** Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-flot pour une marée de coefficient C93. Le carré rouge correspond à la fenêtre zoom des figures de zoom de la section précédente



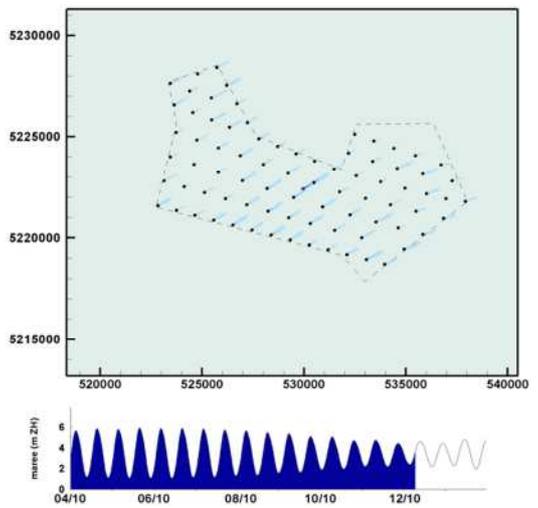
**Figure 32.** Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-jusant pour une marée de coefficient C93



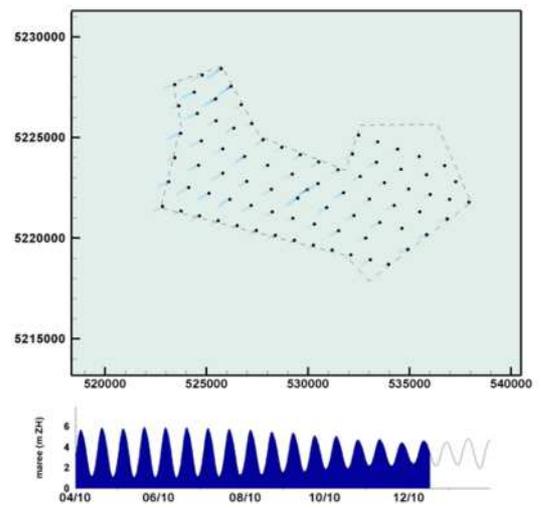
**Figure 33.** Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-flot pour une marée de coefficient C73



**Figure 34.** Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-jusant pour une marée de coefficient C73



**Figure 35. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-flot pour une marée de coefficient C43**



**Figure 36. Différentiel des vitesses de courant (état aménagé – état actuel) à mi-jusant pour une marée de coefficient C43**

Les tableaux ci-dessous donnent, en chacun des points P1, P3 et P4 dans l'emprise du parc, les vitesses maximales de courant à mi-flot et mi-jusant, pour les trois conditions de marée analysées. Puis les écarts absolus (en m/s) (état aménagé – état actuel) et les écarts relatifs (en %) ((état aménagé – état actuel)/état actuel) en intensité. Notons que le point P3 est positionné dans le sillage de la sous-station / éolienne entre lesquelles il est.

**Tableau 5 – Courants aux pics de flot et de jusant aux points P1,P3 et P4 dans l'état actuel**

	Marée de coefficient 93				Marée de coefficient 73				Marée de coefficient 43			
	Flot		Jusant		Flot		Jusant		Flot		Jusant	
	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)
<b>P1</b>	0,489	68	0,491	247	0,380	67	0,384	250	0,229	67	0,198	244
<b>P3</b>	0,441	60	0,415	236	0,345	61	0,326	238	0,201	61	0,165	238
<b>P4</b>	0,475	62	0,464	243	0,373	61	0,360	242	0,220	61	0,183	241

**Tableau 6 – Courants aux pics de flot et de jusant à P1, P3 et P4 dans l'état aménagé**

	Marée de coefficient 93				Marée de coefficient 73				Marée de coefficient 43			
	Flot		Jusant		Flot		Jusant		Flot		Jusant	
	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)
<b>P1</b>	0,488	69	0,498	247	0,382	68	0,389	250	0,226	67	0,200	244
<b>P3</b>	0,400	61	0,396	235	0,315	62	0,310	238	0,182	64	0,158	237
<b>P4</b>	0,465	61	0,468	243	0,366	60	0,368	243	0,218	60	0,188	241

**Tableau 7 – Ecart absolu des vitesses en mètres par seconde (état aménagé – état actuel) aux pics de flot et de jusant aux points P1, P3 et P4**

Ecart absolu (m/s)	Marée de coefficient 93		Marée de coefficient 73		Marée de coefficient 43	
	Flot	Jusant	Flot	Jusant	Flot	Jusant
<b>P1</b>	-0,001	0,007	0,002	0,005	-0,003	0,002
<b>P3</b>	-0,041	-0,019	-0,030	-0,016	-0,019	-0,007
<b>P4</b>	-0,010	0,004	-0,007	0,008	-0,002	0,005

**Tableau 8 – Ecart relatif des vitesses ((état aménagé – état actuel) / état actuel) aux pics de flot et de jusant aux points P1, P3 et P4**

Ecart relatif (%)	Marée de coefficient 93		Marée de coefficient 73		Marée de coefficient 43	
	Flot	Jusant	Flot	Jusant	Flot	Jusant
<b>P1</b>	-0,20%	1,43%	0,53%	1,30%	-1,31%	1,01%
<b>P3</b>	-9,30%	-4,58%	-8,70%	-4,91%	-9,45%	-4,24%
<b>P4</b>	-2,11%	0,86%	-1,88%	2,22%	-0,91%	2,73%

Aux points P1 et P4, situés *légèrement décalés par rapport au sillage direct des éoliennes*, les variations de vitesse absolues entre état actuel et état aménagé sont inférieures au cm/s, et correspondent à des variations de vitesse comprises entre -2,1% et +2,7%, selon le coefficient et l'instant de marée.

Les variations au point P3 sont plus marquées, ce point étant situé à environ 300 m de l'éolienne et de la sous-station entre lesquelles il est situé, dans la direction dominante des écoulements, soit *dans la zone d'influence directe des ouvrages*. A ce point, les réductions de vitesses atteignent 0,04 m/s et correspondent à une réduction relative de la vitesse d'écoulement de -9,30 %.

### 2.5.3.3. Impact à l'échelle régionale

L'analyse des figures d'impact à l'échelle du parc montre que les impacts restent très localisés dans le parc éolien et aux abords immédiats des turbines (*cf* paragraphe précédent). En dehors de la zone du parc, les effets sont négligeables.

Les tableaux ci-dessous donnent, en chacun des points P1 et P5 définis précédemment, les vitesses maximales de courant à mi-flot et mi-jusant, les écarts absolus (en m/s) (état aménagé – état actuel) et les écarts relatifs (en %) (état aménagé – état actuel)/état actuel) en intensité pour les trois conditions de marée analysées.

**Tableau 9 – Courants aux pics de flot et de jusant aux points P1 et P5 dans l'état actuel**

	Marée de coefficient 93				Marée de coefficient 73				Marée de coefficient 43			
	Flot		Jusant		Flot		Jusant		Flot		Jusant	
	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)
<b>P2</b>	0,301	73	0,262	261	0,237	74	0,2	267	0,141	76	0,112	259
<b>P5</b>	0,379	83	0,426	274	0,297	85	0,319	276	0,183	86	0,134	264

**Tableau 10 – Courants aux pics de flot et de jusant aux points P1 et P5 dans l'état aménagé**

	Marée de coefficient 93				Marée de coefficient 73				Marée de coefficient 43			
	Flot		Jusant		Flot		Jusant		Flot		Jusant	
	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)	Vit. (m/s)	Dir. (°N)
<b>P2</b>	0,301	74	0,261	260	0,238	75	0,199	267	0,142	77	0,111	257
<b>P5</b>	0,374	84	0,425	274	0,294	85	0,319	276	0,185	87	0,133	264

**Tableau 11 – Ecart absolu des vitesses en mètres (état aménagé – état actuel) aux pics de flot et de jusant aux points P1 et P5**

Ecart absolu (m)	Marée de coefficient 93		Marée de coefficient 73		Marée de coefficient 43	
	Flot	Jusant	Flot	Jusant	Flot	Jusant
<b>P2</b>	0,000	-0,001	0,001	-0,001	0,001	-0,001
<b>P5</b>	-0,005	-0,001	-0,003	0,000	0,002	-0,001

**Tableau 12 – Ecart relatif des vitesses ((état aménagé – état actuel) / état actuel) aux pics de flot et de jusant aux points P1 et P5**

Ecart relatif (%)	Marée de coefficient 93		Marée de coefficient 73		Marée de coefficient 43	
	Flot	Jusant	Flot	Jusant	Flot	Jusant
<b>P2</b>	0,00%	-0,38%	0,42%	-0,50%	0,71%	-0,89%
<b>P5</b>	-1,32%	-0,23%	-1,01%	0,00%	1,09%	-0,75%

Aux points P2 et P5, en dehors de l'emprise du parc, les variations de vitesse modélisées sont très inférieures au centimètre par seconde et ne dépassent pas 0,005 m/s. En écarts relatifs, on arrive à des valeurs de l'ordre de 1 % mais compte-tenu des vitesses initiales, on peut conclure à l'absence d'influence des éoliennes sur les courants en dehors de l'emprise du parc.

#### 2.5.4. Bilan des impacts sur les niveaux et courants

Les impacts des fondations d'éoliennes sur les niveaux d'eau sont nuls.

Les impacts des fondations sur les courants restent localisés dans l'emprise du parc, plus précisément à l'amont immédiat et dans le sillage des ouvrages, où les fondations constituant un point d'arrêt de l'écoulement, entraînent une réduction des vitesses. Néanmoins, ces réductions de vitesse deviennent négligeables à quelques centaines de mètres de l'ouvrage, où elles ne sont plus que de l'ordre du centimètre par seconde. Ainsi, les réductions de vitesse sont d'au plus 0,01 m/s à au plus 1,5 km de la limite du parc dans le sillage des éoliennes en bordure du parc et la comparaison des courants aux points de contrôle à l'extérieur du parc ne montrent aucun écart de vitesse significatif (inférieur au centimètre par seconde).

Les augmentations locales de vitesse que l'on peut observer sur les figures sont elles aussi insignifiantes (inférieures à 0,015 m/s). Elles traduisent par ailleurs un déphasage de l'ordre de quelques secondes des cycles de marée entre les états actuel et aménagé dans l'emprise du parc et à proximité immédiate et non pas une modification des intensités maximales de courant. Elles ne sont donc pas significatives en termes d'impact.

**Nous pouvons donc conclure qu'en dehors du parc et sa proximité immédiate, l'impact des fondations sur les courants et les niveaux est nul.**

### **3. IMPACT SUR L'AGITATION**

L'objet de cette tâche est de déterminer les impacts sur l'agitation induits par l'implantation du champ d'éoliennes. Ces impacts sont évalués d'une part à l'échelle locale, à partir d'une revue de la littérature sur le sujet, et d'autre part à l'échelle régionale, en comparant les résultats de modèles numériques de propagation d'états de mer entre les états initial et aménagé, sur la zone de projet et au voisinage (aire d'étude étendue).

#### **3.1. DESCRIPTION DU REGIME D'AGITATION**

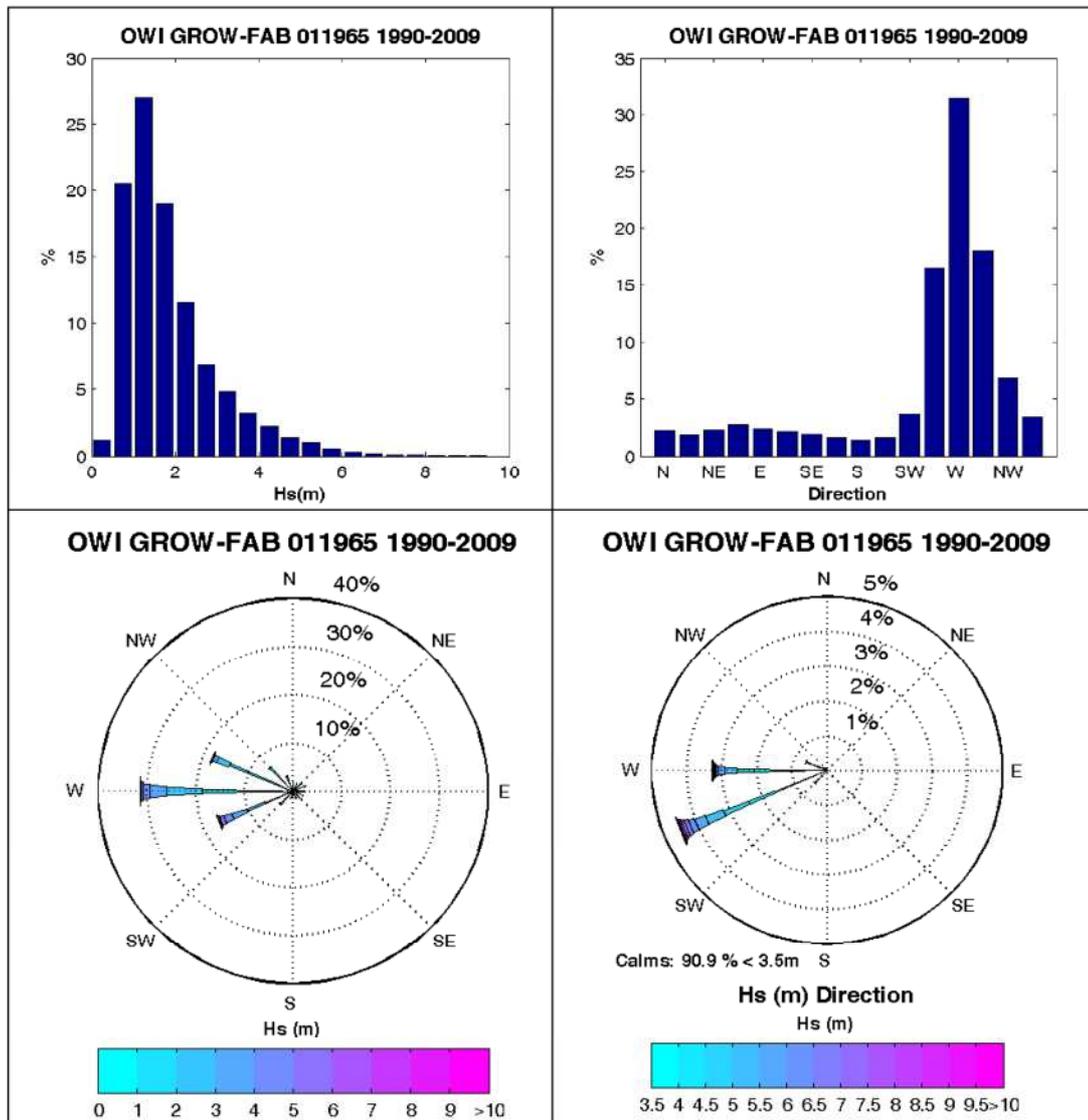
Le climat d'agitation sur la zone de projet et sur la zone d'étude est caractérisé par des houles en provenance du secteur OSO à ONO, générées sur l'Océan Atlantique lors du passage des dépressions vers l'Est. Ces houles sont souvent associées à des mers de vent générées plus localement, principalement du secteur Ouest.

L'agitation au large du site et sur la zone d'implantation des éoliennes est décrit dans l'étude météo-océanographique réalisée dans le cadre de ce projet (Actimar, 2011). Les principaux résultats sont présentés ci-après.

##### **3.1.1. Au large du site**

Le climat de houle au large du site a été extrait de la base de données GROW-FAB de la société OceanWeather Inc. (Etats-Unis) au point GROW-FAB 11965 de coordonnées 47°N, 3°O. Cette base de données fournit les conditions de vent et de houle (paramètres caractéristiques) entre 1990 et 2009 avec un pas de temps tri-horaire.

Les statistiques usuelles issues du traitement de cette base de données sont illustrées sur la [Figure 37](#).



**Figure 37. Distribution annuelle des houles au large (en haut à gauche : hauteur, à droite : direction) et rose des houles au large (en bas à gauche : toute la base de données, à droite, houles supérieures à 3,5 m). Actimar 2011.**

Les conditions extrêmes sur le site ont été calculées sur cette base de données par secteur directionnel de 30° pour les périodes de retour de 1 à 100 ans (Actimar 2011). Les résultats pour le secteur directionnel le plus énergétique, c'est-à-dire OSO, sont présentés dans le tableau suivant.

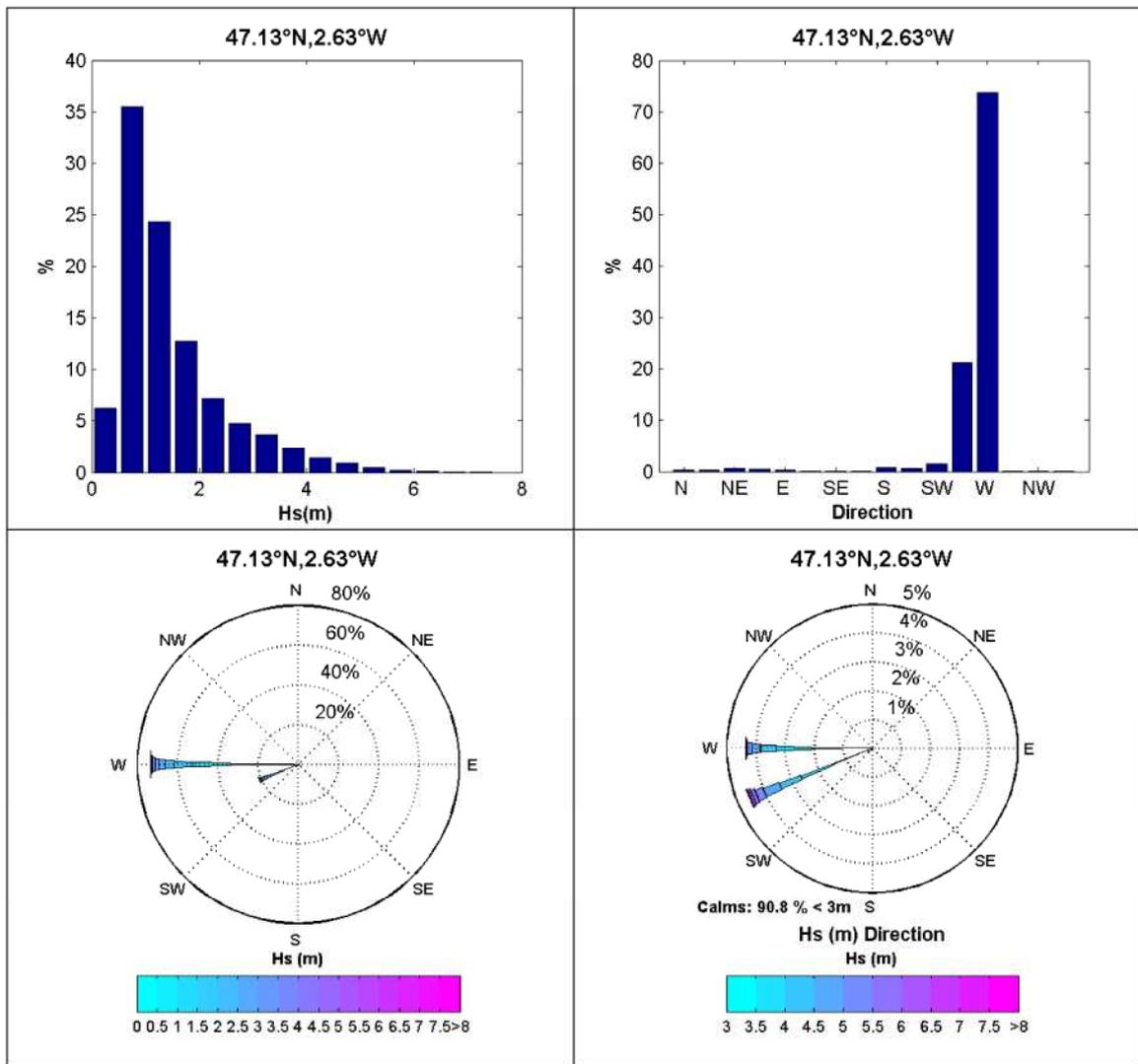
**Tableau 13 – Houles extrêmes au large du site pour le secteur dominant Ouest-Sud-Ouest**

Période de retour (ans)	Hs (m)	Tp (s)
1	7,40	14,0
5	9,20	15,6
10	10,00	16,2
20	10,85	16,9
50	11,90	17,7
100	12,75	18,3

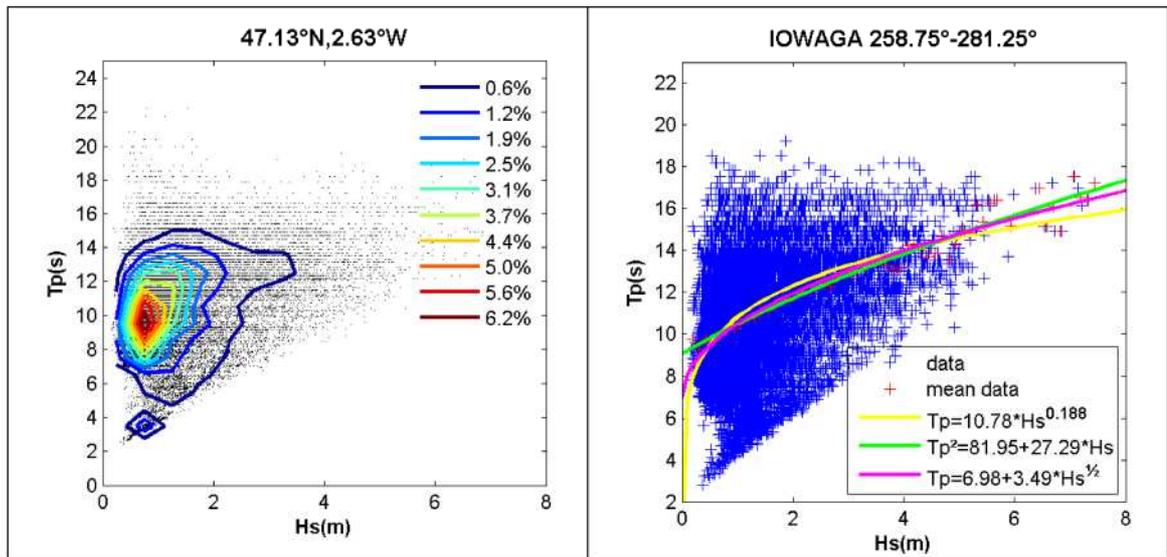
### 3.1.2. Sur le site

Le climat de houle sur le site d'implantation des éoliennes a été extrait de la base de données IOWAGA de l'Ifremer au point de coordonnées 47°08'N, 2°38'O. Cette base de données fournit les conditions de houle (paramètres caractéristiques) entre 2002 et 2010 avec un pas de temps tri-horaire sur la Manche et le Golfe de Gascogne sur une grille de résolution spatiale de 2 minutes d'angle.

Les statistiques usuelles sont illustrées sur la [Figure 38](#) et la [Figure 39](#).



**Figure 38.** Distribution annuelle des houles sur le site d'implantation des éoliennes (en haut à gauche : hauteur, à droite : direction) et rose des houles (en bas à gauche : toute la base de données, à droite, houles supérieures à 3,0 m). Actimar 2011.



**Figure 39. Distribution conjointe Hs/Tp et différents ajustements d'une loi pour les conditions d'ouest. Actimar 2011.**

Les houles extrêmes du large de secteur OSO ont été propagées sur le site à l'aide d'un modèle numérique de propagation (Actimar 2011). Les hauteurs significatives maximales sur le site associées à chacune des périodes de retour sont données dans le tableau ci-après.

**Tableau 14 – Hauteurs significatives maximales sur le site pour le secteur du large dominant Ouest-sud-Ouest**

Période de retour (ans)	Hs (m)	Tp (s)
1	8,5	14,0
5	10,3	15,6
10	11,2	16,2
20	11,7	16,9
50	12,0	17,7
100	12,2	18,3

## 3.2. IMPACT DES EOLIENNES SUR L'AGITATION A L'ECHELLE LOCALE

### 3.2.1. Préambule

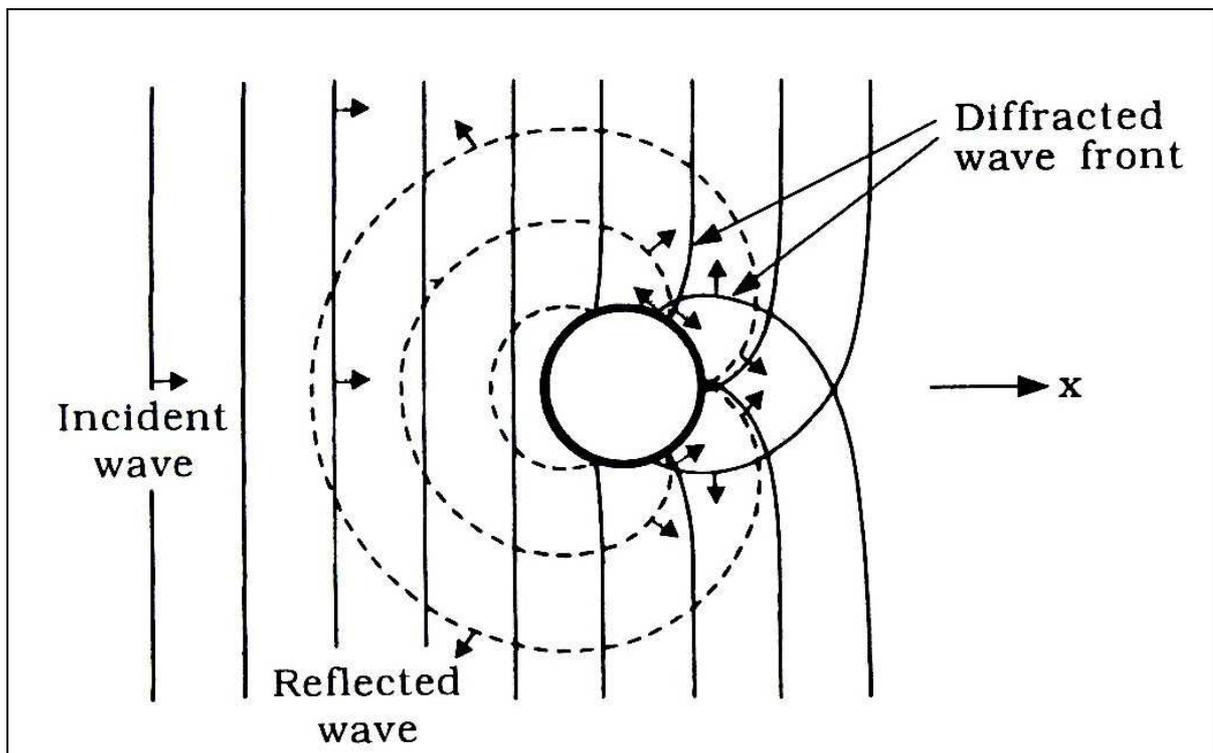
Dans le cas de la houle, deux nombres adimensionnels sont utilisés pour caractériser le régime d'écoulement et les interactions houle-structure :

- Le paramètre de diffraction  $D/L$  ( $D$  étant le diamètre de la structure et  $L$  la longueur d'onde de la houle) qui caractérise la taille relative de la structure par rapport à la longueur d'onde et qui indique l'importance du phénomène de diffraction au passage de l'obstacle ;
- Le nombre de Keulegan-Carpenter  $KC=uoT/D$  ( $uo$  étant la vitesse orbitale de la houle et  $T$  la période) qui caractérise le ratio entre le diamètre orbital de la vague incidente (distance

parcourue par une particule d'eau pendant une période) et le diamètre de la structure, et qui indique ainsi le type d'écoulement autour de la structure et l'importance des forces de viscosité.

### 3.2.1.1. Paramètre de diffraction D/L

Au passage d'une structure, le champ de houle est modifié selon les phénomènes de réflexion et de diffraction (cf Figure 40). Néanmoins, lorsque la taille de la structure (diamètre D) est petite par rapport à la longueur d'onde L ( $D/L \leq 0,2$ ), il est considéré que les phénomènes de diffraction ne modifient pas le champ de houle incident (Isaacson 1979<sup>3</sup>). Dans le cas inverse, le champ de houle incident est modifié par l'apparition d'ondes diffractées.



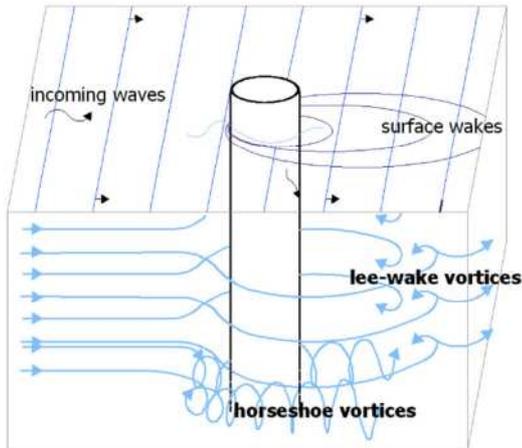
**Figure 40.** Sketch of the incident, diffracted and reflected wave fronts for a vertically placed cylinder (Sumer and Fredsoe, 2002).

### 3.2.1.2. Nombre de Keulegan-Carpenter

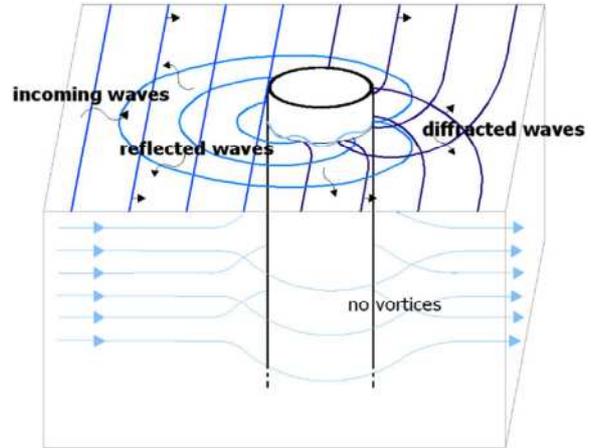
Le nombre de Keulegan-Carpenter permet de caractériser la formation des tourbillons et des vortex à l'aval de la structure. Pour les faibles valeurs de KC ( $KC < O^4(1)$ ), les forces de viscosité sont faibles et l'écoulement « contourne » l'obstacle pour se rétablir rapidement à l'aval. Lorsque KC augmente ( $O(1) < KC < O(6)$ ), des tourbillons se forment dans l'ombre de la structure (lee-wake vortices) et enfin, pour les fortes valeurs de KC ( $KC > O(6)$ ), le phénomène de *vortex shedding* apparaît : génération alternative de tourbillons qui se détachent de la structure et se propagent à l'aval.

<sup>3</sup> Les normes DNV OSJ101, ainsi que Sumer et Fredsoe (2002) indiquent toujours cette valeur limite de 0,2 mais le Coastal Engineering Manual (2003) indique une valeur limite de 0,1.

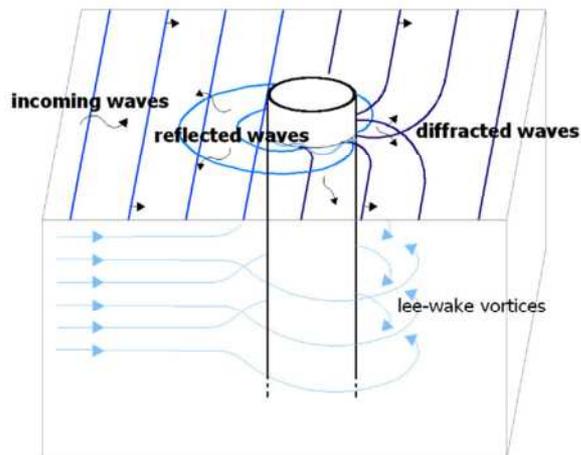
<sup>4</sup> Le O signifie « ordre de grandeur ». Les valeurs peuvent évoluer en fonction du nombre de Re.



**Figure 41.  $KC > 0(6)$  – Régime d'écoulement de pile mince, (Haddorp, 2005)**



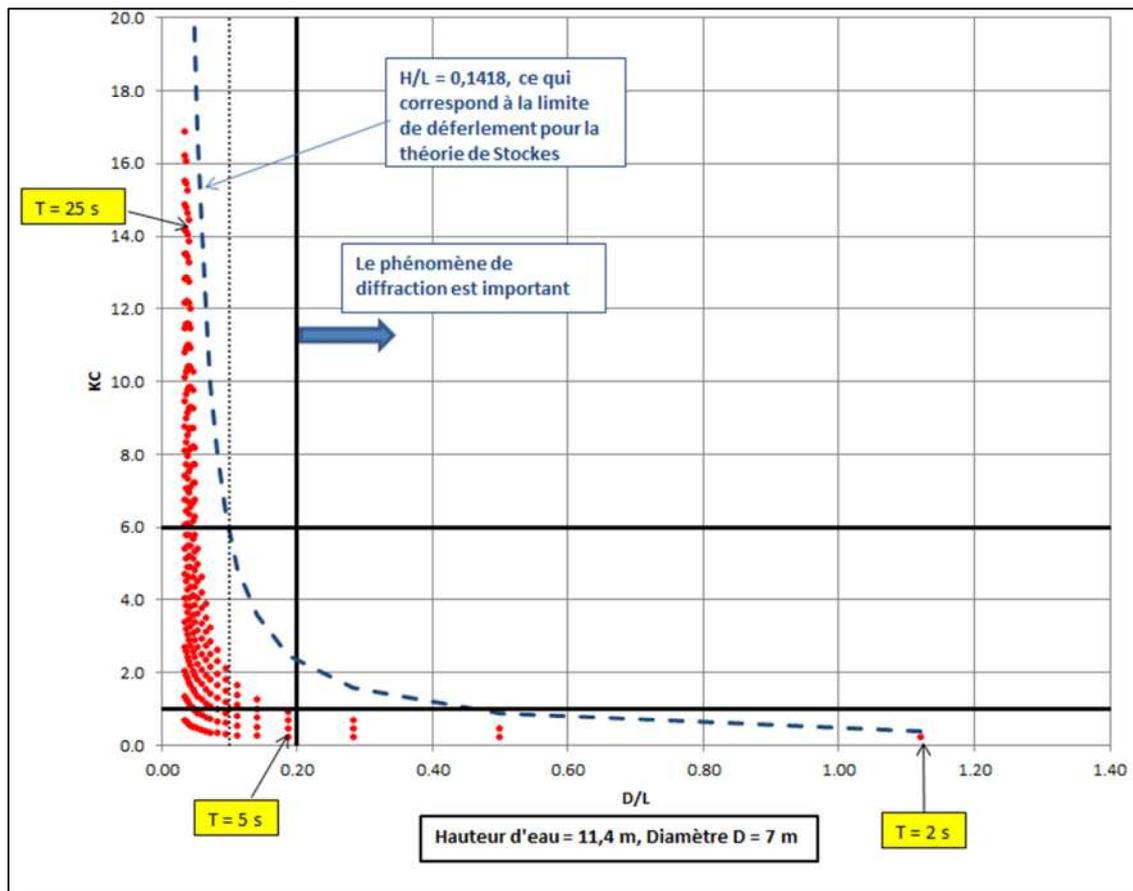
**Figure 42.  $KC < 0(1)$  – Régime d'écoulement de pile large (Haddorp, 2005)**



**Figure 43.  $0(1) < KC < 0(6)$  – Régime d'écoulement de pile intermédiaire (Haddorp, 2005)**

### 3.2.2. Application sur la zone de projet

La figure suivante présente, pour chaque couple (hauteur de houle, période) représentatif des conditions opérationnelles et extrêmes sur la zone d'implantation des éoliennes (cf section 3.1.2), le ratio  $D/L$  et le nombre de Keulegan Carpenter calculé pour une hauteur d'eau de 11,40 m (associée à la profondeur d'implantation la plus faible des 80 éoliennes et le niveau d'eau le plus bas, soit aux longueurs d'onde les plus faibles au droit des éoliennes).



**Figure 44.** Représentation des conditions de houle sur le site dans le diagramme  $KC$  vs  $D/L$  où  $KC$  est le nombre de Keulegan Carpenter,  $D$  est le diamètre de la fondation et  $L$  la longueur d'onde de la houle incidente.

Il apparaît ainsi que :

- Le phénomène de réflexion et de diffraction ne sont pas négligeables pour les houles de périodes inférieures à 5 s. Ces houles représentent moins de 3% de la population de vagues et sont inférieures à 2 m, la majorité étant inférieures à 1 m (2,4% de la population totale). Pour ces conditions de houle,  $KC$  reste inférieur à 1 et l'écoulement à l'aval de la structure est laminaire (phénomènes de viscosité négligeables) (cf Figure 42).
- Pour les conditions de houle plus fréquentes, les phénomènes de diffraction sont négligeables (ratio  $D/L < 0,20$ ) et il peut être considéré qu'ils modifient le champ de houle incident uniquement dans le champ proche de la structure. Le nombre  $KC$  reste inférieur à 6 et l'écoulement à l'aval immédiat de la structure est caractérisé par la présence de tourbillons (cf Figure 43).
- Pour les conditions de houle extrêmes (houles de période de retour supérieure ou égale à 1 an), le phénomène de diffraction est négligeable (ratio  $D/L < 0,20$ ) et le nombre  $KC$  est supérieur à 6. Dans ce cas, les ondes diffractées sont négligeables et l'écoulement autour de la structure peut être schématisé selon la Figure 41, caractérisé par la présence de tourbillons en fer à cheval, et de tourbillons périodiques dans le sillage de la structure.

### **3.3. IMPACT DES EOLIENNES SUR L'AGITATION A L'ECHELLE REGIONALE**

#### **3.3.1. Problématique**

L'impact des éoliennes sur l'agitation à l'échelle régionale est évalué pour déterminer dans quelle mesure le régime de houle est modifié et, si ces modifications sont susceptibles de contribuer à une modification de la dynamique morphosédimentaire des fonds et du littoral.

A l'échelle locale (une seule fondation d'éolienne), il apparaît que pour les houles de période supérieure ou égales à 5 s (soit pour les conditions de houles significatives en termes de forçage hydrodynamique pour la dynamique sédimentaire), les phénomènes de diffraction et réflexion sont négligeables c'est-à-dire que le champ de houle incident n'est pas modifié au passage de la structure. Néanmoins, bien que de manière négligeable, une partie de l'énergie de la houle est dissipée lors du contournement de l'obstacle dans les phénomènes d'interaction houle-structure via les forces d'inertie et de traînée et les phénomènes de viscosité.

Aussi, au passage du champ d'éoliennes, les pertes d'énergies négligeables localement se cumulent-elles et il convient alors de vérifier, à l'échelle du champ, les ordres de grandeurs associés.

#### **3.3.2. Méthodologie**

Afin d'estimer l'impact des fondations d'éoliennes à l'échelle du parc et à l'échelle régionale (jusqu'à la zone littorale), une modélisation numérique de propagation de la houle, dans les états actuel et aménagé (avec éoliennes) a été mis en place. La modélisation a été réalisée pour des houles opérationnelles (régime moyen) et des houles de tempête.

Compte-tenu des échelles spatiales (taille des structures et emprise de la zone d'étude) et des ordres de grandeur des phénomènes locaux, les éoliennes sont modélisées comme des « puits d'énergie », c'est-à-dire que toute l'énergie de la houle incidente sur la structure est absorbée. Les pertes d'énergie sont donc maximalistes. Cette approche est imposée par l'incapacité des modèles numériques de propagation des états de mer de représenter finement les interactions houle-structure sur des obstacles aussi petits.

Les modèles de propagation fournissent ainsi des résultats conservatifs sur les pertes d'énergie de la houle après passage à travers le champ d'éoliennes.

#### **3.3.3. Mise en œuvre du modèle d'agitation**

##### **3.3.3.1. Logiciel**

Le logiciel TOMAWAC a été utilisé pour la propagation de la houle depuis le large jusqu'à la côte; il modélise l'évolution en espace et en temps du spectre d'énergie des vagues de vent et de la houle pour des applications en domaine océanique, sur des mers continentales, ainsi qu'en zone côtière. Ce logiciel a été utilisé pour les calculs de propagation de houle dans la configuration actuelle puis dans la configuration aménagée.

##### **3.3.3.2. Emprise et bathymétrie**

L'emprise et la bathymétrie sont identiques à celles des modèles hydrodynamiques locaux (section 2.4.2.1).

### 3.3.3.3. Maillage et représentation des éoliennes

Les maillages des états actuel et aménagé sont identiques à ceux des modèles hydrodynamiques locaux (section 2.4.2.2).

Les éoliennes sont prises en compte dans le calcul de propagation comme des obstacles avec 100% d'absorption d'énergie sur leurs frontières.

### 3.3.4. Cas de calcul

Les cas de calcul d'agitation représentent les conditions à la frontière du modèle numérique de propagation. Ils sont définis par :

- Un niveau d'eau
- Un état de mer caractérisé par ses paramètres spectraux :
  - Hauteur significative spectrale
  - Période de pic
  - Direction de pic.

Ces cas de calcul (présentés dans le **Tableau 15**) ont été définis de manière à :

- Etudier l'influence de la direction,
- Modéliser les petites houles dominantes les plus fréquentes responsables des évolutions du littoral à moyen et long terme,
- Modéliser les conditions de dimensionnement (conditions extrêmes).

Les roses de houle présentées **Figure 37** correspondent au climat de houle au large du site (en limite du modèle). Pour les houles usuelles, trois secteurs de provenance sont identifiés : ONO, O et OSO, ces secteurs représentant 66 % des agitations. Pour les houles de tempêtes, la direction prédominante est l'OSO. La houle de design sélectionné est la houle cinquantennale (houle utilisée dans la définition des cas de charge des DNV-OS-J101).

Les petites houles dominantes sont issues du recoupement de plusieurs sources de données (études ARTELIA sur le site de la Lambarde (ARTELIA 2008, 2012) et étude ACTIMAR (2011)) et correspondent à des hauteurs d'agitation dépassées entre 30 et 40 % du temps selon les sources.

**Tableau 15 – Cas de calcul de houle**

Cas de calcul	Fréquence d'apparition/ Période de retour	Hs (m)	Tp (s)	Dir (°N)	Niveau (m ZH)
H1	Usuel	2,0	8,0	OSO	+6,0
H2	Usuel	2,0	8,0	O	+6,0
H3	Usuel	2,0	8,0	ONO	+6,0
H4	Annuelle	7,4	14,0	OSO	+6,0
H5	Cinquantennale	11,9	17,7	OSO	+6,0

### 3.4. RESULTATS

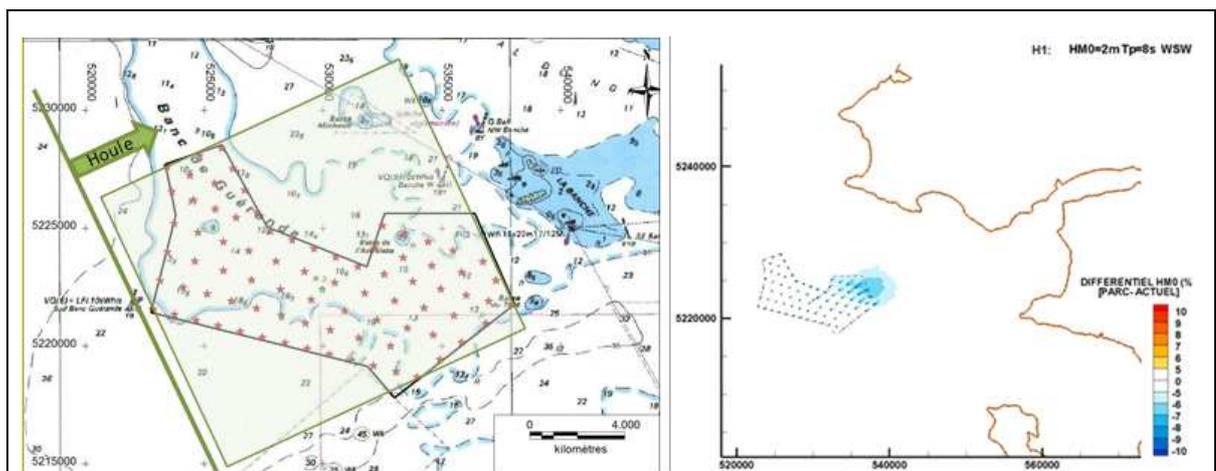
Les résultats ont été exploités sous la forme d'épures de propagation, de différentiels de houle (cartes) et de pertes d'énergie sur l'ensemble du domaine de calcul.

Les épures de propagation dans la situation actuelle sont présentées dans l'annexe D. Les directions de la houle n'étant pas impactées par les éoliennes, les épures en l'état aménagé n'ont pas été produites mais des figures de différentiel sur la hauteur d'agitation ont été produites :

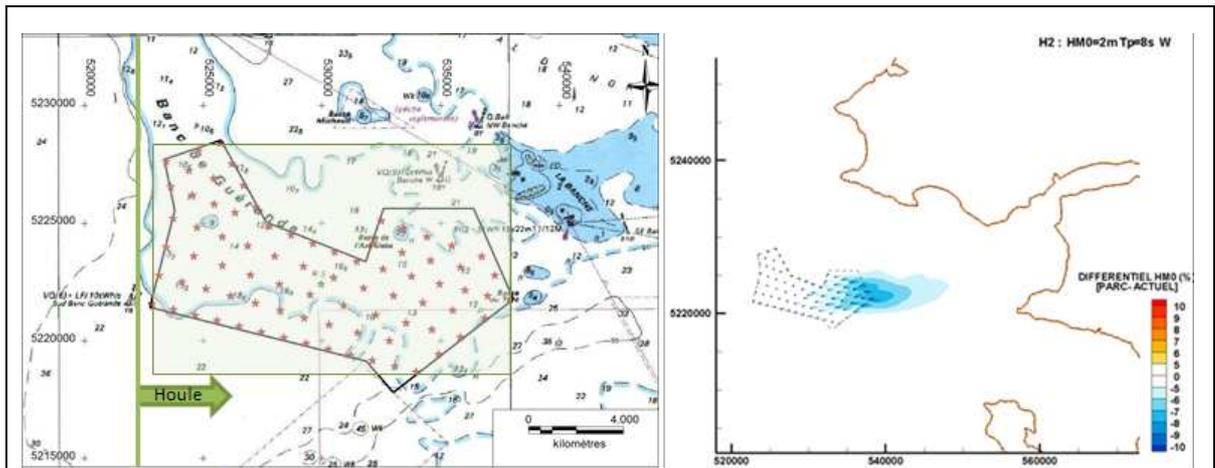
- Le différentiel absolu (en mètres) défini par :  $HS_{\text{éoliennes}} - HS_{\text{actuel}}$ ,
- Le différentiel relatif (en pourcentage) défini par :  $\frac{HS_{\text{éoliennes}} - HS_{\text{actuel}}}{HS_{\text{actuel}}}$  où  $HS_{\text{éoliennes}}$  est la hauteur significative de la houle dans la configuration du parc éolien aménagé et  $HS_{\text{actuel}}$  est la hauteur significative de la houle dans la configuration actuelle.

#### 3.4.1. Influence de la direction

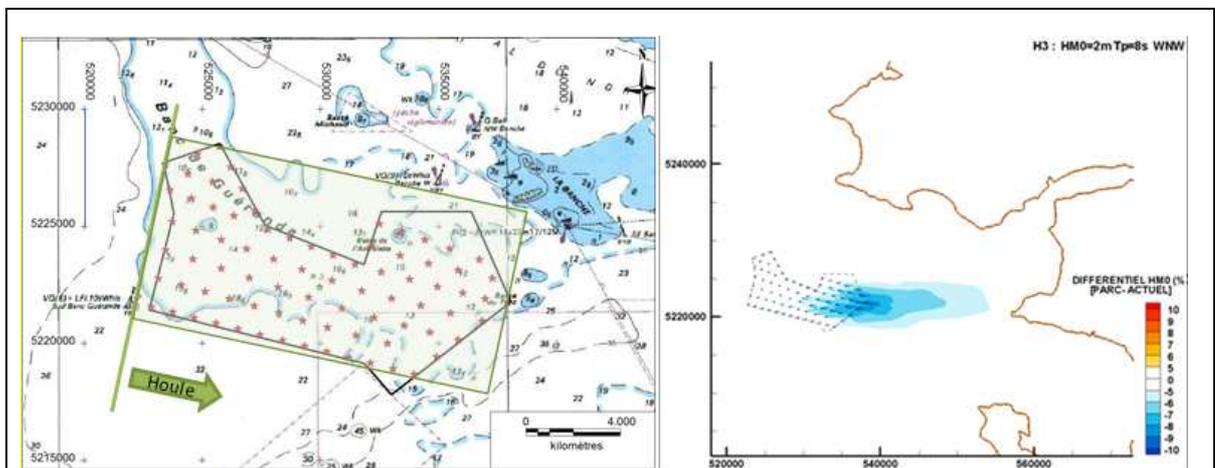
Les figures de différentiel produites permettent d'illustrer la zone d'influence du parc éolien. Tandis que la houle passe de l'Ouest Sud-Ouest à l'Ouest Nord-Ouest, la largeur du front d'onde de la houle qui traverse le parc diminue et le nombre de rangées d'éoliennes traversées augmentent. Les impacts des éoliennes se cumulant à l'aval des rangées, la zone d'influence des éoliennes est plus étroite mais s'étend plus à l'aval du parc lorsque l'on regarde des différentiels relatifs.



**Figure 45. Gauche : Front d'onde pour une houle de direction OSO (Conditions de calcul H1) Droite : différentiel relatif (en %) entre état aménagé et état actuel**

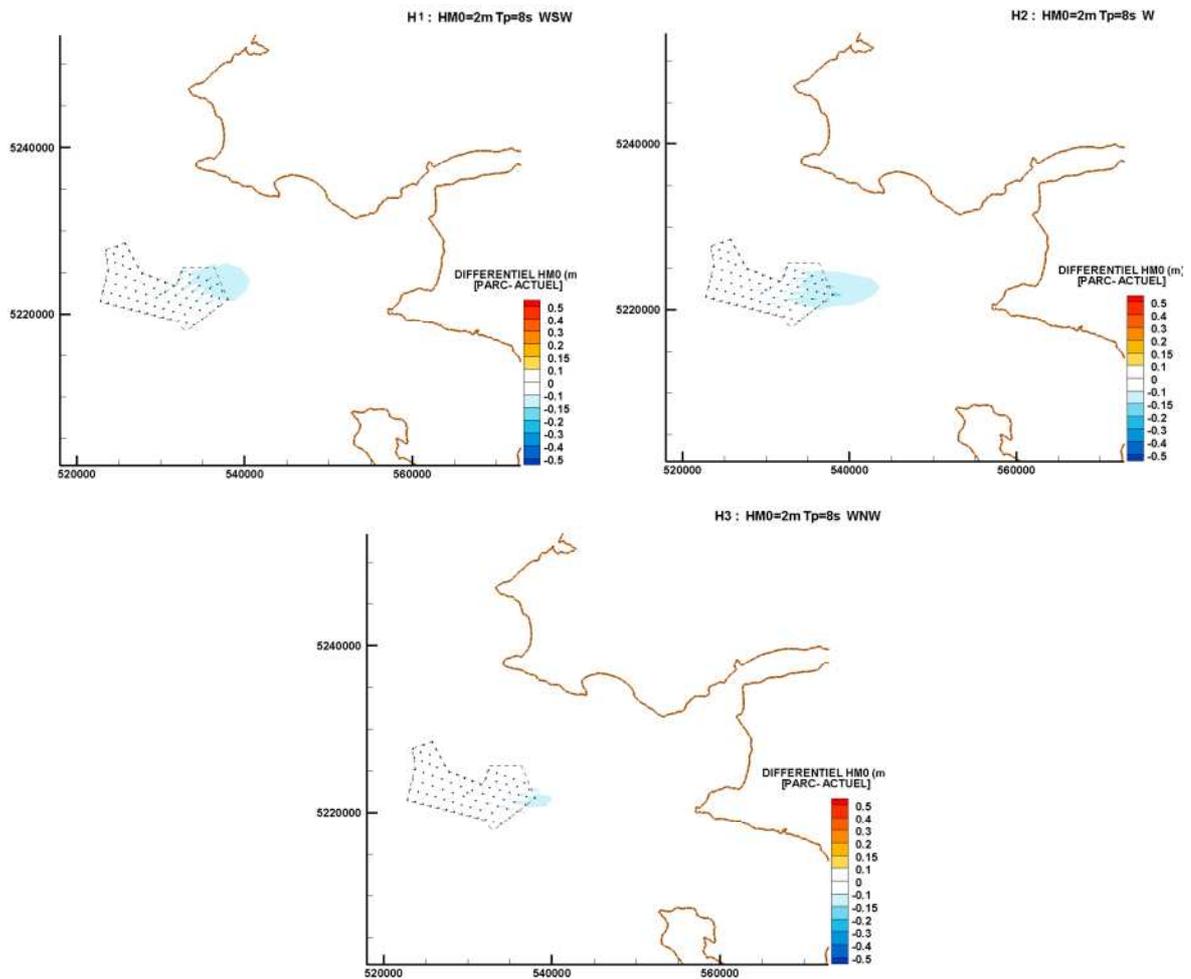


**Figure 46. Gauche : Front d'onde pour une houle de direction O (Conditions de calcul H2) Droite : différentiel relatif entre état aménagé et état actuel**



**Figure 47. Gauche : Front d'onde pour une houle de direction OSO (Conditions de calcul H3) Droite : différentiel relatif (en %) entre état aménagé et état actuel**

Néanmoins, du fait des phénomènes de réfraction sur les fonds, pour une même hauteur de houle incidente au large (et une même période), la hauteur de houle sur le parc diminue tandis que la houle incidente tourne vers le nord-ouest. Ainsi, pour une houle de 2 m au large, la houle sur le parc est toujours de l'ordre de 2 m pour les conditions d'OSO, mais n'est plus que de l'ordre de 1,80 m pour les houles d'O et de l'ordre de 1,40 m pour les houles d'ONO. Les pertes d'énergie au passage du parc étant proportionnelle au carré de la hauteur, la diminution de la hauteur de la houle au passage du parc est plus importante pour les plus fortes houles. Ceci apparaît en comparant le différentiel absolu entre les houles d'OSO et les houles d'ONO présentés sur la figure suivante.

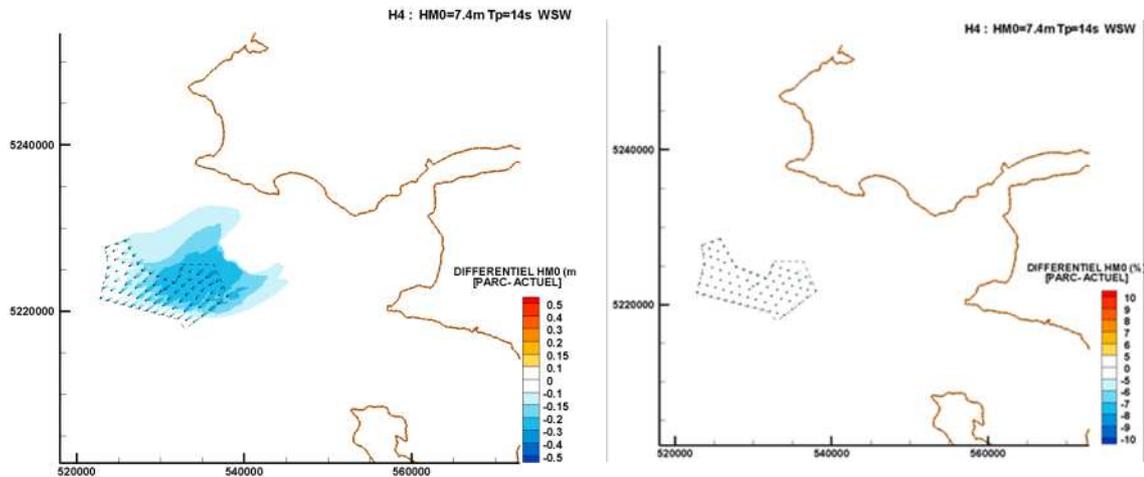


**Figure 48. Carte des écarts absolus (en m) entre état aménagé et état actuel pour les petites houles dominantes ( $H_s=2$  m au large,  $T_p = 8$  s, directions modélisées OSO, O et ONO).**

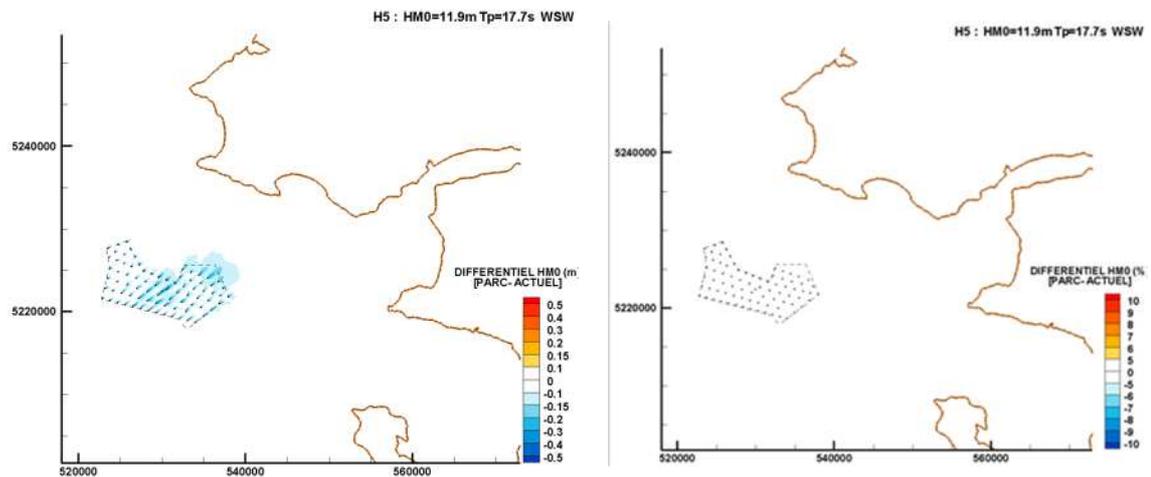
Enfin, l'énergie totale de la houle sur l'ensemble du modèle numérique a été calculée dans l'état actuel et dans l'état aménagé. Il apparaît que les pertes d'énergies totales entre les états initial et aménagé sont bien inférieures à 1% et sont du même ordre de grandeur pour les trois directions : de l'ordre de -0,45 % pour les houles d'Ouest Sud-Ouest et d'Ouest et de -0,30% pour les houles d'Ouest Nord-Ouest.

### 3.4.2. Conditions extrêmes

Les houles annuelle et cinquantiennale ont été propagées au travers du parc éolien. Par rapport aux conditions usuelles, compte-tenu du niveau d'eau pris pour les simulations, nous sommes à la limite du déferlement dans les zones les moins profondes pour la houle annuelle et nous sommes en conditions déferlantes pour la houle cinquantiennale. La Figure 49 et la Figure 50 ci-après présentent les écarts absolus et relatifs d'agitation entre les états actuel et aménagé.



**Figure 49. Conditions de houle annuelle (calcul H4), écart absolu et écart relatif**



**Figure 50. Conditions de houle cinquantennale (calcul H5), écart absolu et écart relatif**

Les remarques suivantes peuvent être faites :

- Les pertes d'énergie absolues augmentent entre les conditions de houle usuelles de 2 m d'OSO et les conditions de houle annuelle. Ceci est dû à la forte différence de hauteur des vagues.
- Les pertes d'énergie absolues liées aux éoliennes sont minimales pour les conditions de houle cinquantennale. Ceci est dû au déferlement, qui est le processus prépondérant de perte d'énergie sur le parc éolien.

Le calcul des pertes d'énergie totales sur l'ensemble du domaine de calcul entre les états initial et aménagé indique des pertes de -0,25 % pour la houle annuelle et -0,05 % pour la houle cinquantennale.

### 3.4.3. Impacts à l'échelle régionale

Les pertes d'énergies se cumulent à l'intérieur du parc au passage de chaque éolienne et se « propagent » à l'aval du parc dans la direction d'incidence de la houle. La direction du régime de houle dominant étant l'OSO, c'est en direction de la côte entre la presqu'île du Croisic et la pointe de Chemoulin que des impacts potentiels seraient possibles. La distance minimale entre la

dernière rangée d'éolienne et la côte est de 12 km environ. Vers l'Est, la distance entre la dernière éolienne et la côte (pointe de Saint Gildas) est de 19 km.

Les tableaux suivants indiquent les distances au parc pour laquelle la diminution de la houle est inférieure à différents seuils (en valeur absolue ou en %).

**Tableau 16 – Conditions usuelles**

Conditions au large	Distance au parc pour laquelle l'écart sur la hauteur des houles est inférieur à la quantité X.			Distance de la côte la plus proche
	L'écart relatif <sup>5</sup> est		L'écart absolu est	
	< 5 %	< 7%	< 10 cm	
Hs = 2m, Tp=8s Dir = OSO	3,2 km	0,6 km	3,0 km	12 km
Hs = 2m, Tp=8s Dir = O	10,9 km	3,2 km	5,4 km	19 km
Hs = 2m, Tp=8s Dir = ONO	16,0 km	3,2 km	2,0 km	19 km

Le champ de houle se rétablit à l'aval du parc sur une distance plus ou moins courte selon la direction incidente du fait du phénomène de réfraction sur les fonds (cf section 3.4.1). Dans tous les cas, à la côte, les écarts entre la situation initiale et la situation aménagée sont négligeables.

**Tableau 17 – Conditions extrêmes**

Conditions au large	Distance au parc pour laquelle l'écart sur la hauteur des houles est inférieur à la quantité X.				Distance de la côte la plus proche
	L'écart relatif est		L'écart absolu est		
	< 2 %	< 5 %	< 10 cm	< 20 cm	
Hs = 7,4 m, Tp=14 s Dir = OSO	6,0 km	0 km	7,3 km	2,7 km	12 km
Hs = 11,9m, Tp=17,7s Dir = OSO	2,4 km	0 km	2,0 km	0 km	12 km

Pour les houles extrêmes, les écarts restent inférieurs à 1% à la côte (ils sont même < 0,5% dans le cas de la houle cinquantennale), et on peut donc conclure à l'absence d'impact du parc éolien sur les houles à la côte.

### 3.4.4. Retours d'expérience sur les parcs existants

Dans le cadre de travaux R&D menés par ARTELIA sur la thématique des impacts physiques des parcs éoliens en mer, nous avons analysés les retours d'expérience issus de plusieurs parcs réalisés (examen des suivis si disponibles) ou en projet en Europe (examen des études et/ou modélisations réalisées). Ces parcs sont indiqués dans le tableau suivant.

<sup>5</sup> Il s'agit en réalité d'une diminution

**Tableau 18 – Synthèse de l'impact sur la houle, panel de parcs éoliens offshore pour différents types de fondations.** (\*) P : partielle, N : non-apparue, QT : Quasi-totale, T : totale (relativement aux périodes de houle et aux profondeurs d'eau) (\*\*) Me : Mesures, Mo : Modélisations numériques, Th : Théorie mathématiques, Si : Principe de similitude (i.e. aucune étude), n.r.: non renseigné.

Nature du sol	Fondation	Site	Protection anti-affouillement		Nombre turbines	Diamètre structure D (m)	Hauteur d'eau (m ZH)	Distance à la côte (km)	Vitesse des courants (m/s)	Houle H <sub>m</sub> (m) T <sub>z</sub> (s)	Diffraction par les éoliennes (*)	Type de données (**)	Impact sur la houle
Argile avec couverture sable fin	Monopile	Kentish Flats		non	30	5	3 – 4	8.5	0.9	0.6 – 3.9 m 5 s	P	n.r.	<b>Négligeable</b> (pour Kentish 2, à l'étude)
Sable	avec dépôts de moraine argileuse	GBS	Nysted	oui	72	16 (fonds) 4.2 (col. d'eau)	6 – 9	10.8	n.r.	0.7 – 2.5 m 5 – 6 s	N	Mo	Diminution max de <b>4%</b> de la hauteur de houle, <b>Non-significatif</b>
	avec argile et gavas	GBS	Beatrice	oui	142 – 277	n.r.	35 – 50	26	0.25 – 0.5	5 m 6.7 – 10 s	n.r.	Mo	Diminution max de <b>5 à 15%</b> de la hauteur de houle, <b>Non-négligeable</b>
		Jacket		non							n.r.	Mo	Diminution max de <b>5%</b> de la hauteur de houle, <b>Négligeable</b>
	fin à grossier	Monopile	Horns Rev 1	oui	80	4.25	6 – 13	18	0.5 – 0.8	5 – 5.4 m 2 – 5 s	P	Th	Diminution max de <b>3.3%</b> de la hauteur de houle, <b>Négligeable</b>
		Monopile	Horns Rev 2	oui	91	6	9 – 17	32			P	Si	<b>Négligeable</b>
		Monopile	Burbo	oui	25	4	0.5 – 6	7	1 – 2	4 – 5 m 5 s	P	Mo	Diminution max de <b>3%</b> de la hauteur de houle, <b>Négligeable</b>
		Monopile	Burbo 2	oui	36 – 69	n.r.	2 – 14	8			N	n.r.	<b>Négligeable</b>
	fin	Monopile	Gunfleet Sands	oui	48	5 – 6	0.5 – 13	7 – 9	> 1	< 1 m < 6 s	P	Mo	Diminution max de <b>4%</b> de la hauteur de houle, <b>Négligeable</b>
	moyen	Monopile	OWEZ	oui	36	4.6	15 – 18	10	n.r.	0.5 – 2 m 2.5 – 4.5 s	QT	Me	n.r.
		GBS	Thornton Bank	oui	6	23.5 (fonds) 6.5 (surface)	13 – 19	26 – 28	1	1 – 4 m 3 – 6 s	P	n.r.	n.r.
Jacket		non		48	0.5 – 0.9 (tubes)	6 – 20	T				n.r.	n.r.	

Aucune information issue de suivi autre que théorique n'a été trouvée sur l'impact des éoliennes sur la houle pour les parcs éoliens avec fondations monopieus existants.

La plupart des études ou modélisations réalisées concluent sur l'absence d'impact sur ce paramètre en dehors des parcs.

Sur le parc de OWEZ, au Pays-Bas, deux campagnes de mesures de la houle de 1 an avant et après construction ont été conduites mais les résultats publiés et accessibles ne donnent que des valeurs moyennes et ne peuvent pas être exploités dans ce cadre.

### **3.4.5. Bilan des impacts sur l'agitation**

Le passage des houles à travers le parc éolien induit localement, pour les houles usuelles significatives et les houles extrêmes, des pertes d'énergie du fait de l'interaction houle-structure. Ces pertes d'énergie sont néanmoins très ponctuelles et leur cumul, sur le parc, devient rapidement insignifiant à l'aval devant les autres phénomènes qui affectent la propagation de la houle jusqu'à la côte (réfraction, déferlement).

A la côte, le champ de houle initial est reconstitué (écart inférieur à 1 % pour les conditions extrêmes) et **les impacts des éoliennes sur l'agitation peuvent être considérés comme nuls.**

## **4. IMPACT SUR LA TURBIDITE DU MILIEU EN PHASE CHANTIER**

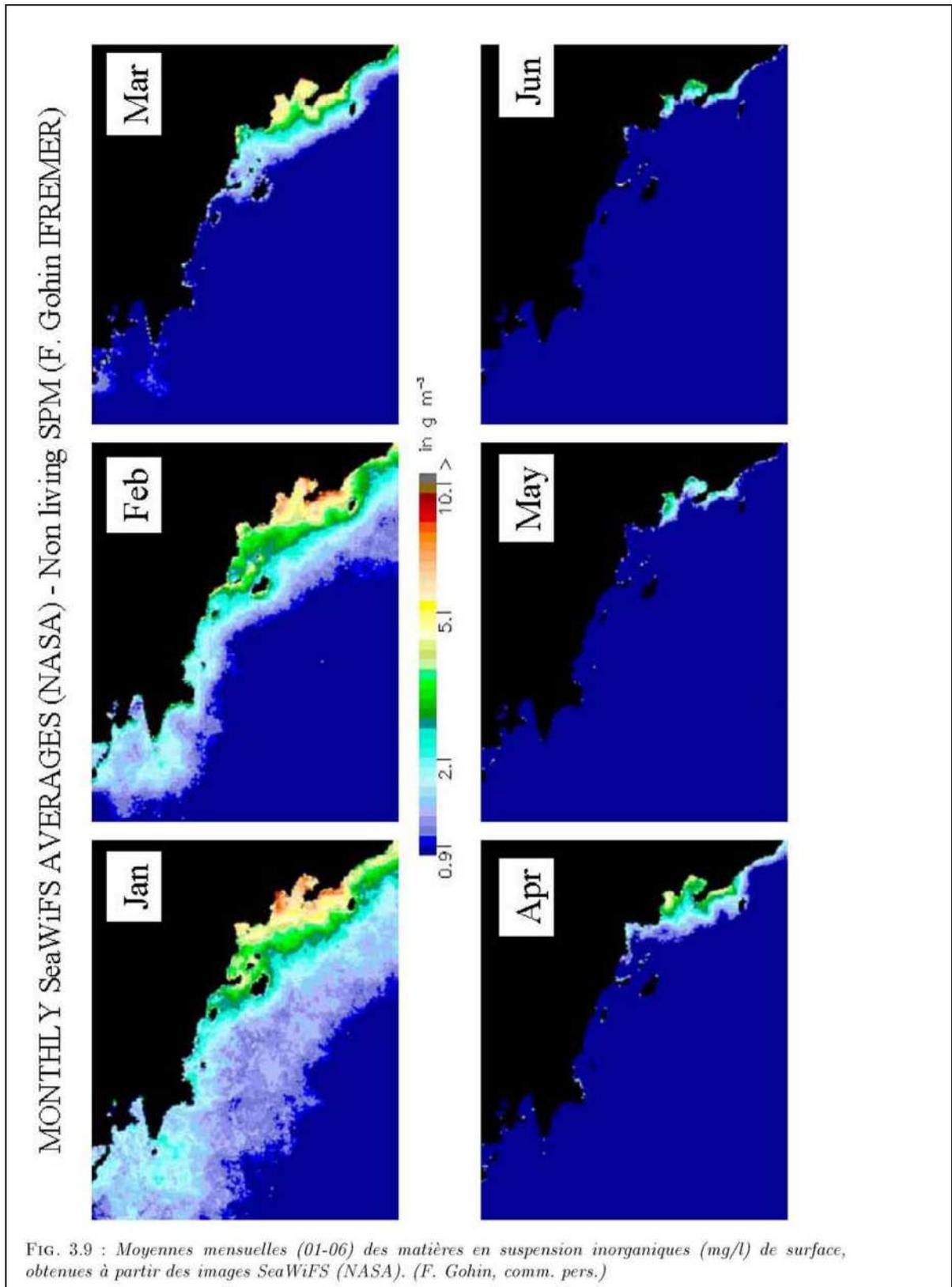
### **4.1. TURBIDITE NATURELLE – BRUIT DE FOND**

Dans la zone d'étude, la turbidité de l'eau, conséquence de la présence de matières en suspension dans la colonne d'eau, est principalement liée :

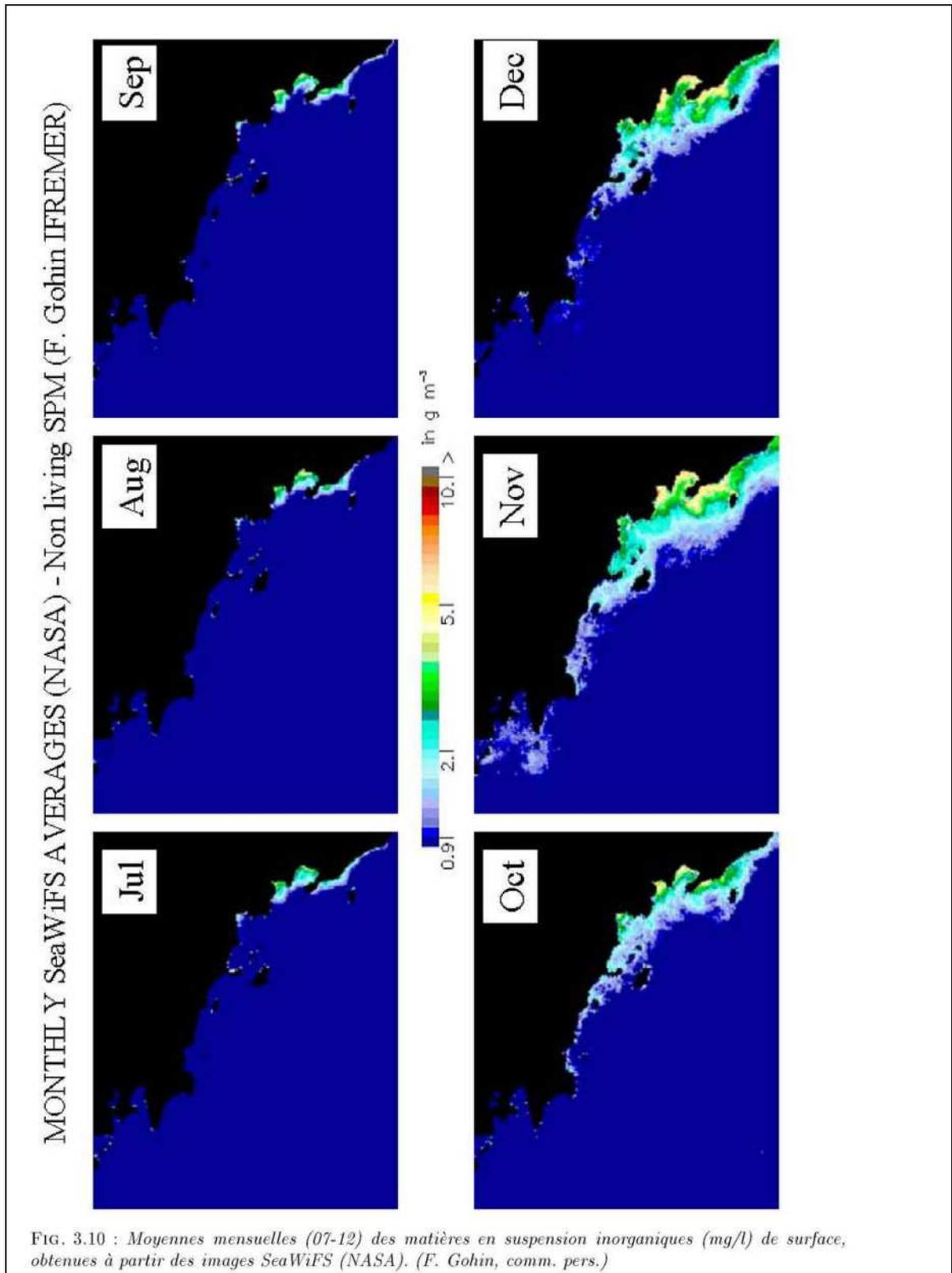
- à l'apport de matières par les fleuves (panaches turbides de la Loire et de la Vilaine),
- à la remise en suspension des sédiments par les agents dynamiques (houles et courants),
- à la production phytoplanctonique.

La turbidité naturelle dans la zone d'étude a une variabilité saisonnière. Elle est plus élevée en hiver, où le débit des fleuves (Loire et Vilaine) est plus important et où les conditions d'agitation (responsables de la remise en suspension des sédiments) sont plus fortes. Par ailleurs, la turbidité diminue tandis que s'éloigne de la côte. Ceci est illustré sur la [Figure 51](#) et [Figure 52](#).

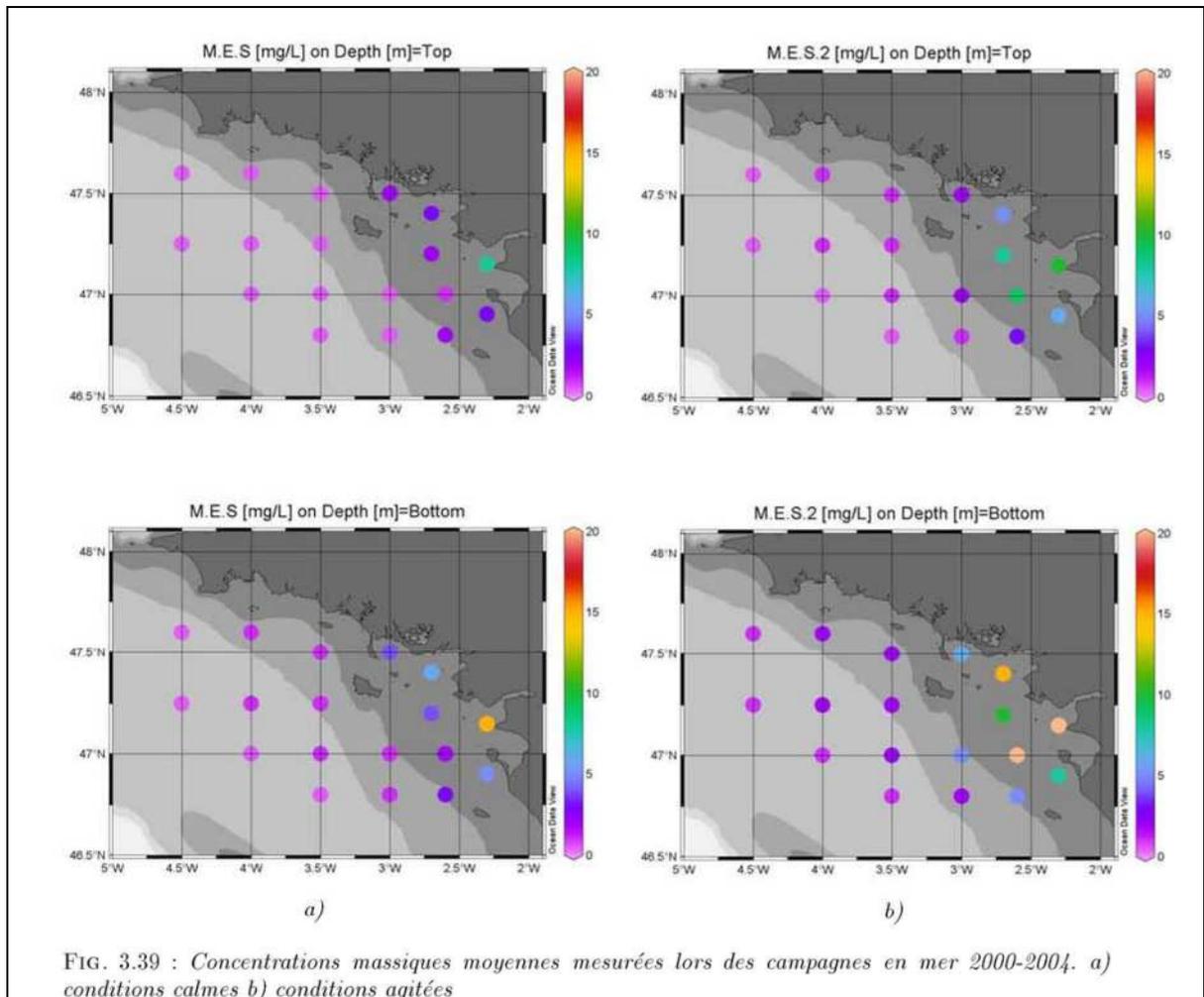
D'après les mesures satellitales de turbidité de surface et les mesures in situ ([Figure 53](#)) de turbidité dans la zone d'étude (Tessier 2006), il apparaît que la turbidité naturelle de surface (ou bruit de fond) sur le parc est de l'ordre de quelques mg/L en conditions calmes et peut atteindre la dizaine de mg/L en hiver (au cours d'épisodes de fortes houles). Les houles entretiennent une couche turbide de fond pouvant atteindre plusieurs dizaines de mg/L en tempête.



**Figure 51.** Source : Tessier, 2006 Moyennes mensuelles de janvier à juin des MES inorganiques de surface en mg/L à partir des mesures satellites (issues de Gohin, Ifremer)



**Figure 52.** Source : Tessier, 2006 Moyennes mensuelles de juillet à décembre des MES inorganiques de surface en mg/L à partir des mesures satellites (issues de Gohin, Ifremer)



**Figure 53. Concentrations massiques moyennes de surface et de fond mesurées lors de campagnes en mer. Gauche : conditions calmes. Droite : conditions agitée. Source : Tessier, 2006**

Les études plus centrées sur la côte et proche de l'estuaire de la Loire mettent en évidence des turbidités bien plus importantes qui caractérisent le « bruit de fond » proche des côtes. Les valeurs de référence sont indiquées dans le tableau ci-après.

**Tableau 19 – Synthèse des MES en différentes situations (hors agitation & hors crue, crue, agitation) – source ARTELIA, 2012.**

Secteur	Bruit de fond Etiage et calme	Source	Crue 5 000 m3/s	Source	Tempête - agitation	Source
<b>Secteur Lambarde et zone d'influence</b>	10-20 mg/l <10 mg/l	IMDC, 2011 Froidefond, 2003	75-100 mg/l	Froidefond, 2003	ND	
<b>Baie de la Baule</b>	ND (fonds)	Froidefond, 2003	100-150 mg/l	Froidefond, 2003	ND	
<b>Baie de St- Michel Chef chef</b>	10-30 mg/l	Froidefond, 2003	100-150 mg/l	Froidefond, 2003	> 100 mg/l	Froidefond , 2003
<b>Baie de Bourgneuf</b>	ND (fonds)	Froidefond, 2003	>75 mg/l	Froidefond, 2003	100-200 mg/l	Froidefond , 2003
<b>Chenaux de navigation et Mindin</b>	20-30 mg/l	Froidefond, 2003	200 mg/l	Froidefond, 2003	ND	
<b>Estuaire interne</b>	30-50 mg/l	Froidefond, 2003	100-200 mg/l	Froidefond, 2003	ND	

## 4.2. METHODOLOGIE POUR L'EVALUATION DES IMPACTS

L'évaluation des impacts des travaux en phase chantier est réalisée par l'étude du devenir des matériaux mis en suspension au cours des travaux de forage des pieux. Il s'agit donc de définir l'étendue et l'évolution du panache turbide ainsi que les zones de dépôts potentiels.

Notons que les volumes rejetés lors du forage sont très faibles (1m<sup>3</sup>/h) au regard des volumes d'eau qui transite sur la zone<sup>6</sup>. Ainsi en terme de comparaison, les volumes sont beaucoup plus faibles que

- les rejets par conduite lors du dragage pour le Pouliguen : 85 à 90 m<sup>3</sup>/h pendant 6 h entre PM+3 et PM-3 sur toute la durée des opérations conduites entre le 15 octobre et le 15 mars pour un volume total de 80 000 m<sup>3</sup>,
- les rejets par clapage du port de Nantes : 8 500 m<sup>3</sup> en puits par cycle soit environ toutes les 3 /6h,

dont les modélisations et études environnementales ont montré un impact faible à nul.

Cependant, de manière à s'assurer de l'absence d'impact et de mieux quantifier les phénomènes, des simulations de panache ont été réalisées.

## 4.3. LOGICIEL

Le logiciel SISYPHE a été utilisé pour calculer le devenir, sous l'action des courants, des rejets des travaux de forage des pieux des éoliennes. Ce logiciel est couplé avec TELEMAC-2D et calcule le transport des sédiments en suspension et par charriage. Il permet de déterminer à chaque pas de temps l'étendue du panache turbide résultant de la partie des sédiments rejetés restés en

<sup>6</sup> Par exemple pour une vitesse de courant de 0,50 m/s, le volume d'eau qui transite sur la colonne d'eau (profondeur 20 m) en 1 heure est de 36 000 m<sup>3</sup>.

suspension dans l'écoulement ainsi que l'épaisseur et la localisation de la part de matériaux rejetés et déposés sur le fonds.

## **4.4. MODELISATION DES REJETS DES TRAVAUX DE FORAGE**

### **4.4.1. Emprise, bathymétrie et maillage**

L'emprise, la bathymétrie et le maillage du modèle sont ceux du modèle hydrodynamique local dans l'état actuel.

### **4.4.2. Hypothèses de rejet**

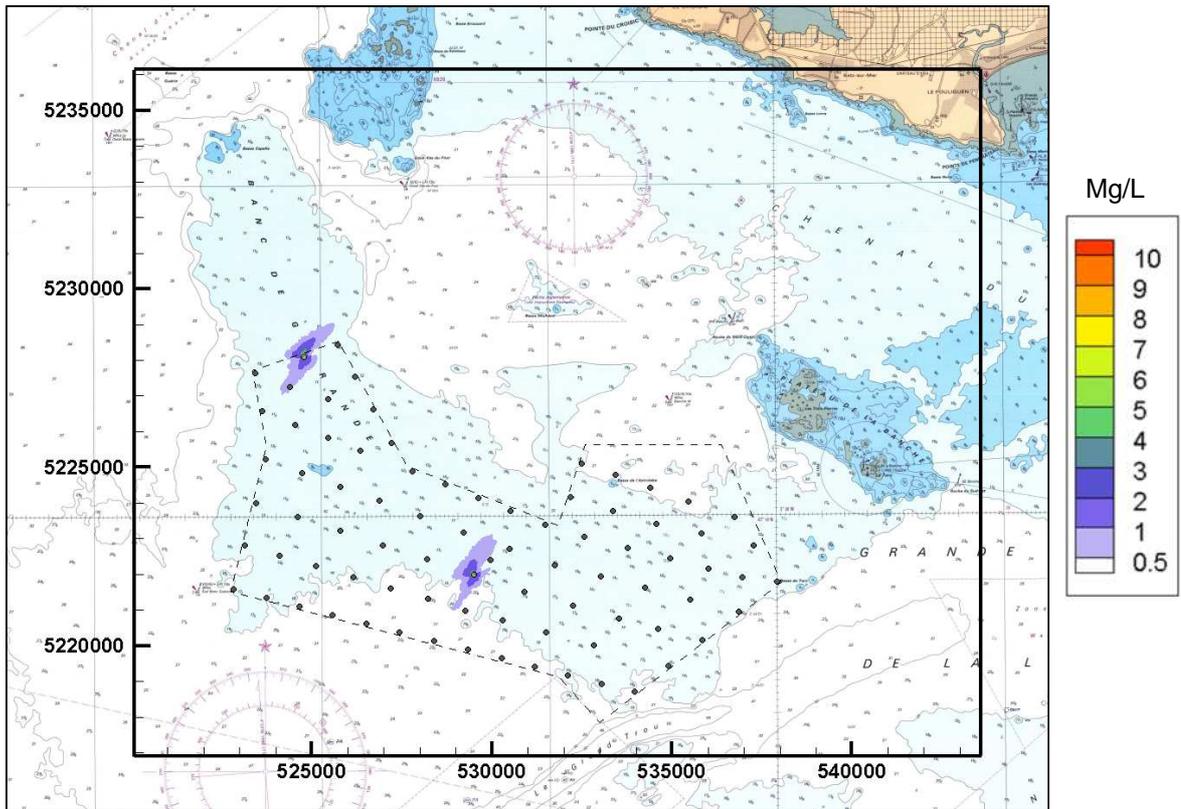
Les hypothèses de rejet sont les suivantes :

- Résidu de forage : densité de 1900 k/m<sup>3</sup>, d<sub>50</sub> = 100 µm,
- Débit de rejet : 1m<sup>3</sup>/h,
- Durée du rejet : 5 jours centrés autour d'une marée de coefficient C95,
- Durée du calcul une fois le rejet terminé (phase de dispersion : 6 jours).

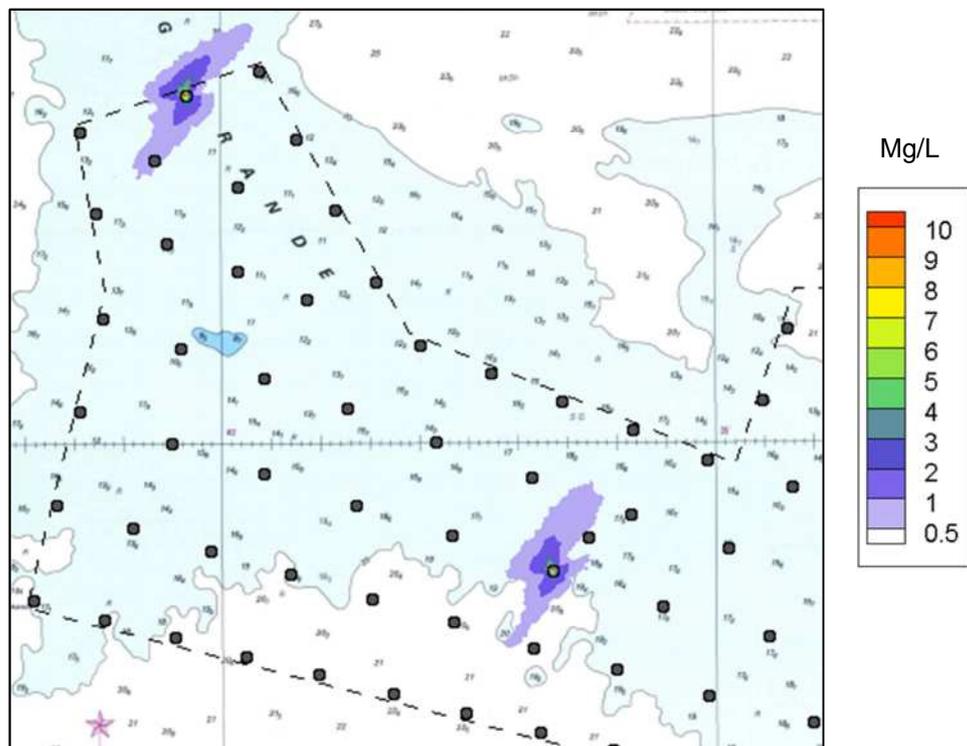
Les simulations sont faites pour des travaux sur les emplacements des éoliennes t75 (située au Nord-Ouest du parc) et t28 (située au milieu du parc), correspondant à deux potentiels ateliers de forage réalisés en simultanée (approche maximaliste).

## **4.5. RESULTATS**

Les résultats sont présentés sur la [Figure 54](#) et la [Figure 55](#). Les figures représentent le maximum de concentration en chaque point au cours du calcul. Une animation centrée sur l'éolienne t75 a également été produite.



**Figure 54. Maximum de MES atteint en chaque point du modèle**



**Figure 55. Maximum de MES atteint en chaque point du modèle - Zoom**

Les valeurs maximales de MES sont les plus fortes au droit immédiat et à quelques mètres du point de rejet mais redescendent très rapidement en dessous de 0,5 mg/L. Ces concentrations générées lors de cette phase travaux sont bien inférieures aux épisodes de moyenne ou forte agitation sur la zone et en période d'expulsion du panache turbide de l'estuaire de la Loire (cf section 4.1).

Par ailleurs, les calculs ne mettent en évidence aucun dépôt du sédiment (valeurs calculées nulles).

**Il peut donc être conclu un impact nul des travaux en phase chantier sur la turbidité du milieu.**

## 5. IMPACT SUR LE TRAIT DE CÔTE

L'étude d'impact sur le trait de côte a pour objet de déterminer si l'implantation du parc éolien offshore va modifier les processus morphodynamiques littoraux et, le cas échéant, dans quelle mesure et avec quelles conséquences.

Cette étude d'impact est conduite en deux parties. Dans une première partie, le littoral de la zone d'étude étendue est décrit et caractérisé. Dans une deuxième partie, les résultats de l'étude des impacts des éoliennes sur l'hydrodynamique et les houles (section 2 et 3) sont utilisés afin d'évaluer les impacts sur le régime hydrosédimentaire littoral et d'en déduire les conséquences sur l'évolution du trait de côte.

### 5.1. DESCRIPTION DU LITTORAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

#### 5.1.1. Communes

La zone d'étude (Figure 56) concerne les communes de Loire Atlantique suivantes (du nord au sud) : Piriac-sur-Mer (4), La Turballe (5), Guérande (6), Le Croisic (7), Batz-sur-Mer (8), Le Pouliguen (9), La Baule Escoublac (10), Pornichet (11), Saint-Nazaire (12), Saint-Brévin-les-Pins (13), Saint-Michel-Chef-Chef (14), La Plaine-sur-Mer (15), Préfailles (16).

#### 5.1.2. Caractérisation

Le littoral étudié peut être caractérisé par différents types de morphologie côtière :

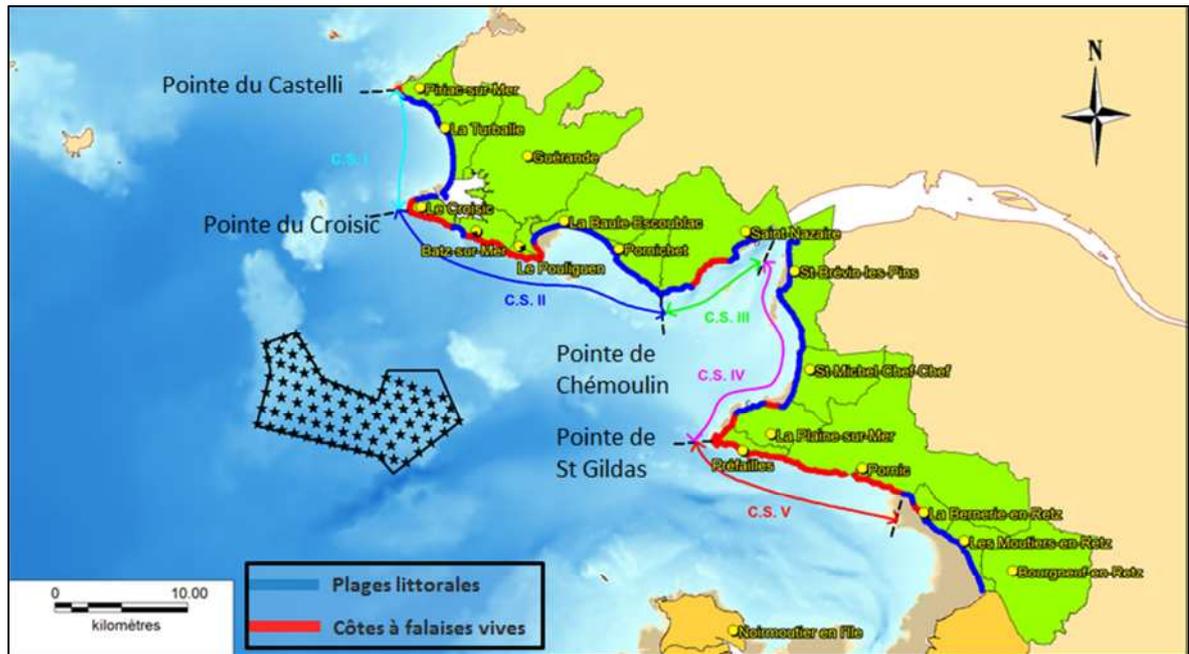
- les plages (constituées de sables et/ou vases),
- les côtes de falaises vives<sup>7</sup>,
- les traicts (ou marais) de Pen-Bé et du Croisic,

Au regard des impacts sur le trait de côte, ces types de morphologie côtière sont restreints à deux types de littoraux :

- Littoral sédimentaire : plages et traicts,
- Littoral non sédimentaire : falaises et zones artificialisées (protections côtières).

---

<sup>7</sup> Les côtes à falaises vives correspondent aux zones où la falaise littorale est proche de la mer et régulièrement battue par les flots (littoral de la Plaine-sur-Mer par exemple). Les zones littorales où les falaises d'arrière plage ne sont que très rarement atteintes par la mer seront considérées comme des zones de plage et la falaise caractérisée de falaise morte (plages de Mesquer par exemple).



**Figure 56. Littoral de la zone d'étude et cellules sédimentaires**

### 5.1.3. Cellules sédimentaires

Le littoral de la zone d'étude est divisé en 5 cellules sédimentaires (CS) élémentaires homogènes depuis la pointe du Castelli au Nord à la limite Est de Pornic.

- cellule sédimentaire n° 1 (CS I) : de la pointe du Castelli à la pointe du Croisic,
- cellule sédimentaire n° 2 (CS II) : de la pointe du Croisic à la pointe de Chémoulin,
- cellule sédimentaire n° 3 (CS III) : de la pointe de Chémoulin au port de Saint-Nazaire,
- cellule sédimentaire n° 4 (CS IV) : de Saint-Brévin-les-Pins à la pointe Saint-Gildas,
- cellule sédimentaire n° 5 (CS V) : de la pointe Saint-Gildas à Pornic.

Ces cellules sédimentaires ont été définies à partir de l'orientation du trait de côte relativement homogène au sein d'une même cellule.

#### 5.1.3.1. Cellule sédimentaire CS I : de la pointe de Castelli à la pointe du Croisic

La cellule sédimentaire I (appelée CS I) s'étend sur un linéaire d'environ 20 km entre la pointe du Castelli et la pointe du Croisic. Les communes concernées sont Piriac-sur-mer et la Turballe.

La morphologie du littoral est à dominante de plages (environ 75 % en linéaire, soit une quinzaine de kilomètres). Les falaises vives ne représentent qu'environ 20 % du linéaire, soit environ 4 km. Le linéaire de plages est interrompu par le port de la Turballe dans la partie nord et le Traict du Croisic (communication entre l'océan et les marais salants de Guérande). Le diamètre médian du sable des plages correspond à du sable moyen ou grossier.

Entre la pointe du Castelli et la presqu'île du Croisic, le littoral présente une forme convexe et ouverte sur le secteur Ouest. Les îles de Belle-Ile en mer, l'île d'Houat et l'île du Hoëdic offrent une protection naturelle de la zone face aux houles du large.

#### **5.1.3.2. Cellule sédimentaire CS II : de la pointe du Croisic à la pointe de Chemoulin**

La cellule sédimentaire II (appelée CS II) s'étend sur un linéaire de près de 33km entre la pointe du Croisic et la pointe de Chémoulin.

Les communes concernées sont, le Croisic, Batz-sur-Mer, le Pouliguen, la Baule-Escoublac, Pornichet et Guérande.

La morphologie du littoral est quasiment également répartie entre les zones à dominante de plages (linéaire d'environ 17 km) et les zones à dominante de falaises vives (linéaire d'environ 16 km). La plupart des plages sont caractérisées par un sable dont le diamètre médian correspond à du sable moyen ou grossier. Les plages de Pornichet sont caractérisées par un sable fin. Le littoral est interrompu par l'étier du Pouliguen (qui débouche dans la baie de la Baule), qui permet une autre communication entre l'océan et les marais salants de Guérande.

Le littoral s'ouvre globalement sur un secteur Sud-Est et est découpé par la baie de la Baule située légèrement en retrait.

Sur cette cellule sédimentaire, les plages à poche (presqu'île du Croisic) protégées de part et d'autre par des éperons rocheux, gardent un stock sédimentaire constant. Les évolutions dans le temps sont des réponses aux modifications du régime de houle (variabilité saisonnière, tempêtes...).

#### **5.1.3.3. Cellule sédimentaire CS III : de la pointe de Chemoulin au port de Saint-Nazaire**

La cellule sédimentaire III (appelée CS III) s'étend sur un linéaire de près de 11km allant de la pointe de Chémoulin au port de Saint-Nazaire. Cette unité est entièrement située sur la commune de Saint-Nazaire.

La morphologie du littoral est préférentiellement représentée par les falaises vives (environ 66% en linéaire soit 6,4km) puis par les plages (environ 44% en linéaire soit 5,1km). Selon les plages, le sédiment caractéristique correspond à un sable fin, moyen ou grossier.

Ce littoral orienté Sud-Ouest/Nord-Est borde l'embouchure Nord de l'embouchure de l'estuaire de la Loire.

#### **5.1.3.4. Cellule sédimentaire CS IV : de Saint Brévin les Pins à la pointe Saint Gildas**

La cellule sédimentaire IV (appelée CS IV) s'étend sur un linéaire de près de 24km depuis Saint-Brévin-les-Pins à la pointe Saint-Gildas.

Cette cellule sédimentaire couvre les communes de Saint-Brévin-les-Pins, Saint-Michel-Chef-Chef, la Plaine-sur-Mer et Préfailles.

La morphologie du littoral est largement dominée par les plages (environ 81% en linéaire soit 19,2km) avec quelques zones à dominante de falaises vives (environ 17% en linéaire soit 4,4km).

Cette zone se situe au Sud de l'embouchure de l'estuaire de la Loire et est globalement ouvert sur l'Ouest. Le sédiment caractéristique correspond à un sable fin à moyen avec des débris coquillers.

#### **5.1.3.5. Cellule sédimentaire CS V : de la pointe Saint Gildas à la limite Est de Pornic**

La cellule sédimentaire V (appelée CS V) s'étend entre la pointe Saint-Gildas et la limite Est de la commune de Pornic (fin de la partie falaises vives).

Cette cellule sédimentaire couvre les communes de Préfailles et de Pornic.

La morphologie du littoral est composée de falaises vives, sur un linéaire d'environ 24 km.

#### **5.1.4. Evolution du trait de côte**

Les zones de falaises vives subissent une érosion naturelle plus ou moins rapide en fonction de leur nature géologique tandis que les plages constituent des cellules sédimentaires relativement stables et indépendantes subissant des fluctuations saisonnières et interannuelles dans le profil et en plan naturelles bien que parfois incompatibles avec les usages.

## **5.2. IMPACTS DU PARC EOLIEN SUR LE TRAIT DE COTE**

### **5.2.1. Définition des impacts**

Les modifications des conditions hydrodynamiques du fait de la présence des éoliennes peuvent éventuellement conduire aux impacts suivants sur le trait de côte :

1. La modification de l'exposition des protections côtières aux agents hydrodynamiques,
2. La modification du transport littoral associé (qui pourrait conduire à une évolution du rivage),
3. Le recul ou engraissement des plages par adaptation du profil côtier et modification du transport dans le profil,
4. L'accélération de l'érosion des côtes à falaise.

### **5.2.2. Critères d'impact**

#### **5.2.2.1.1. Préambule**

Cette section se base sur l'ouvrage *Exploitation de matériaux marins et stabilité du littoral* de Bernard Latteux (éd. Quae, 2008), en collaboration avec l'Ifremer. Ce guide expose les mécanismes physiques en jeu dans le cadre de l'exploitation de granulats marins et émet des recommandations pour les études d'impact.

L'exploitation de granulats marins implique en effet une modification potentielle du milieu physique au large (sur la zone d'exploitation) tout comme dans le cas des parcs éoliens offshore (dans une moindre mesure pour ces derniers). Dans les deux cas, il est ainsi nécessaire d'étudier les impacts à une échelle régionale et sur le trait de côte. Les modifications du milieu physique étant de même nature (modifications des conditions hydrodynamiques et de la houle au passage de la zone d'exploitation), les recommandations de l'ouvrage cité préalablement sont applicables dans le cas des parcs éoliens offshore.

En particulier, dans cet ouvrage, l'auteur s'attache à déterminer des critères d'absence d'impact significatif, en fonction de la typologie du trait de côte. Ces critères sont nécessairement quelque peu subjectifs car ils ont pour but de s'épargner le recours à une modélisation extensive, sinon exhaustive, et ils sont de ce fait majorants, c'est-à-dire qu'ils intègrent une marge de sécurité.

#### **5.2.2.1.2. Cas du littoral non sédimentaire : littoral de falaises et d'ouvrages côtiers**

Par littoral non sédimentaire, il est entendu littoral de falaises et le littoral aménagé par des protections côtières (ouvrages.)

Le critère d'impact dans le cas d'un littoral non sédimentaire est défini ainsi : « *Si le secteur littoral non sédimentaire est sensible à la houle qui l'atteint (falaises peu résistantes, ouvrages portuaires), l'action moyenne de la houle au rivage ou sur les structures ne peut être aggravée que si les modifications de la houle conduisent à une augmentation de l'énergie de la houle.* »

#### **5.2.2.1.3. Cas du littoral sédimentaire**

Dans le cas du littoral sédimentaire, il faut s'assurer qu'aucune réorientation et qu'aucun recul de plage « supplémentaire » aux processus déjà existants ne soit à redouter. Ces risques sont liés

aux modifications éventuelles du transit littoral et du transport de sédiments dans le profil, du fait de la modification des conditions hydrodynamiques. A partir de l'expression du transit littoral et des recommandations du guide, dans un environnement de mer ouverte avec courants modérés et action dominante de la houle, les critères d'absence d'impact (significatif) sur le trait de côte sont les suivants :

- Aucune modification de la direction de la houle incidente,
- Modification du transport solide annuel dans la zone de déferlement inférieure à 1%.

### **5.2.3. Impacts sur le littoral non sédimentaire (falaises et ouvrages)**

D'après les résultats de la section 3, l'impact des éoliennes sur l'agitation à l'aval du parc se traduit par une réduction de l'énergie de la houle à l'aval immédiat des turbines mais une absence d'effet à la côte. On peut donc conclure à l'absence d'impact du parc éolien sur le trait de côte composé de falaises et d'ouvrages.

### **5.2.4. Impacts sur le littoral sédimentaire (plages)**

Premièrement, la modélisation numérique mise en œuvre pour simuler l'impact des éoliennes sur l'agitation n'a pas fait apparaître de variation de la direction de la houle au droit du littoral. Aussi, il n'est pas attendu de basculement de plages en réponse à un changement d'orientation du climat de houle incident.

Par ailleurs, si la modélisation met en évidence une faible réduction de l'agitation à l'aval du parc selon les conditions, on note l'absence d'effets à la côte.

Ensuite, une estimation du transport solide annuel est réalisée au droit des zones d'intérêt dans les configurations actuelle et aménagée afin d'évaluer l'impact relatif du parc sur le transport et donc le risque de recul des plages.

L'estimation du transport solide est réalisée à partir de la formule de Soulsby (1997), reliant l'agitation, la vitesse de courant, la hauteur d'eau et la granulométrie du sédiment. Cette formule est appliquée sur des hypothèses conservatives car d'une part, il convient de donner des évaluations majorantes et d'autre part, c'est l'impact sur le transport qui est étudié, et non le transport même.

#### **5.2.4.1. Points d'analyse**

Le transport solide annuel est estimé partir des conditions hydrodynamiques en limite de la zone de déferlement. La limite de la zone de déferlement est établie par la profondeur de fermeture, définie par  $1,75 \times$  houle annuelle. Dans le cas présent, pour une houle annuelle de 7,40 m on obtient une profondeur de fermeture de 12,95 m, ce qui correspond, au niveau moyen, à des fonds de  $\sim 9,40$  m ZH. Les estimations de transport annuel seront donc faites par des fonds de -10 m ZH environ sauf dans l'estuaire externe de la Loire, où l'isobathe -10 m ZH est trop loin de la côte et où l'estimation du transport annuel sera faite par des fonds de -5,0 m ZH environ.

La cellule sédimentaire CS I n'est pas située à l'aval du parc en termes de houle incidente et de courants. Aussi cette cellule sédimentaire n'est-elle pas considérée. La cellule V n'est pas considérée également dans cette analyse car constituée uniquement de falaises vives.

Le [Tableau 20](#) suivant présente les points d'analyse : coordonnées, profondeur, littoral correspondant. Ces points sont représentés sur la [Figure 57](#).



**Figure 57. Localisation des points d'analyse du transport solide annuel**

**Tableau 20 – Points d'analyse du transport annuel**

Point	X (m)	Y (m)	Cote ( m ZH)	Littoral	Cellule sédimentaire
P_houle_3	537 471,153	5 235 844,828	- 10 m	Côte sauvage	C.S. II
P_houle_4	545 899,106	5 231 884,885	- 10 m	Baie de la Baule	C.S. II
P_houle_8	554 033,376	5 229 053,001	- 5 m	Pointe de Chemoulin	C.S. III
P_houle_9	560 293,440	5 233 503,495	- 5 m	Plages de Saint Nazaire	C.S. III
P_houle_10	559 515,312	5 226 509,999	- 10m	Plages de Saint Brévin	C.S. IV

#### 5.2.4.2. Conditions hydrodynamiques

Les conditions de houle retenues pour les calculs sont la condition de houle annuelle, significative pour les évolutions du trait de côte.

Les conditions de courant retenues sont celles correspondant au pic de flot pour la marée de coefficient 93. Compte-tenu des variations de courants aux différents points d'analyse (inférieures au centimètre), les mêmes vitesses de courant (celles de l'état actuel) sont prises en compte dans les calculs de transport pour les états actuel et aménagé.

Ces hypothèses de calcul sont très conservatives. L'objet de ces calculs est d'évaluer l'impact relatif sur le transport annuel, et non sur le transport même.

Les conditions de calcul sont présentées dans le tableau [Tableau 21](#).

**Tableau 21 – Conditions hydrodynamiques de calcul**

Point	Courant (m/s)	Conditions de houle annuelle (Hs)	
		Dans l'état actuel (m)	Dans l'état aménagé (m)
P_houle_3	0,30	5,46	5,47
P_houle_4	0,51	4,13	4,17
P_houle_8	0,87	3,99	3,99
P_houle_9	0,89	1,60	1,60
P_houle_10	0,68	3,24	3,24

#### 5.2.4.3. Résultats

Le tableau suivant présente les écarts relatifs sur le transport solide pour la houle annuelle ((Q aménagé – Q actuel)/Qactuel) en considérant que cette conditions advient en moyenne 0,3% du temps.

**Tableau 22 – Ecart relatif sur le transport solide annuel au niveau des points d'analyse**

Point d'analyse	Ecart relatif sur le transport solide	Littoral concerné	Cellule sédimentaire
P_houle_3	-0,009 %	Côte sauvage	C.S. II
P_houle_4	-0,013 %	Baie de la Baule	C.S. II
P_houle_8	-0,003 %	Pointe de Chemoulin	C.S. III
P_houle_9	0,003 %	Plages de Saint Nazaire	C.S. III
P_houle_10	0,000 %	Plages de Saint Brévin	C.S. IV

Il ressort de ces calculs que l'impact de l'atténuation des houles sur l'ensemble du littoral selon cette approche est tout à fait négligeable.

Compte-tenu des hypothèses conservatives sur les calculs de houle et des ordres de grandeur des écarts de transport calculés, on peut conclure à l'absence d'impact du champ d'éoliennes sur le trait de côte.

#### 5.2.5. Bilan des impacts sur le trait de côte

L'impact du parc éolien sur le trait de côte a été évalué en faisant la distinction entre le littoral sédimentaire et le littoral non sédimentaire.

**Pour le littoral non sédimentaire** (falaises et ouvrages littoraux et portuaires), le parc éolien conduisant à une réduction des agents hydrodynamiques (courants et houles), par ailleurs négligeable à la côte, **aucun impact sur le trait de côte ne sera généré par le parc éolien.**

**Pour le littoral sédimentaire**, des calculs de transport annuel entre l'état actuel et l'état aménagé ont montré des variations bien inférieures à 1 %, ce qui permet de conclure à **un impact nul du parc éolien sur les évolutions actuelles du trait de côte.**

## 6. IMPACT SEDIMENTAIRE REGIONAL

L'étude de l'impact sédimentaire régional correspond à l'évaluation des modifications possibles des fonds sur l'ensemble de la zone d'étude. Ainsi dans un premier temps, une description des fonds de la zone d'étude est réalisée et dans un deuxième temps, les impacts potentiels du parc éolien sur l'évolution des fonds sont décrits et évalués.

### 6.1. CONDITIONS DE SOL

Les données utilisées pour déterminer les conditions de sol sur la zone d'étude étendue sont issues :

- De la carte géologique du BRGM de la Bretagne Sud (BRGM 2008),
- De la carte de la nature des fonds réalisée par Vanney de nature des fonds (Vanney, 1968),
- De la carte d'épaisseur des sédiments réalisée à partir de la base de données de l'Ifremer .

#### 6.1.1. Nature des fonds

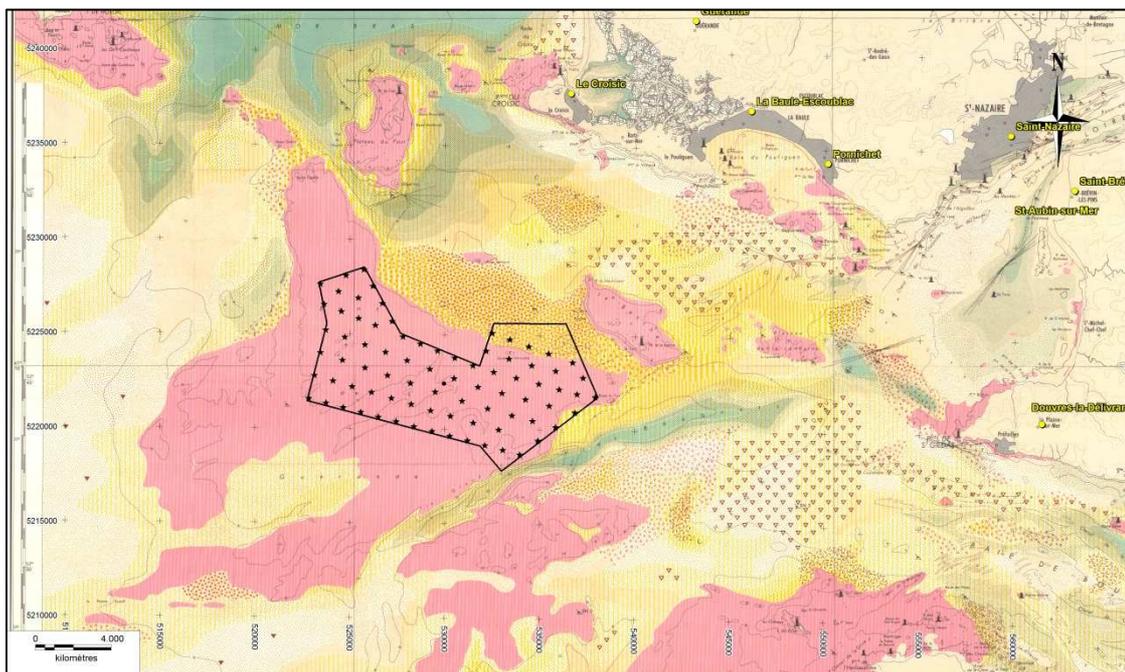
La zone d'étude est caractérisée par une assez grande diversité de faciès sédimentaires marins. Sur la base des cartographies sédimentaires générales établies par Vanney (1968) ([Figure 58](#)) par Lesueur et Klingebiel (1986) et par le LCHF (1987), la localisation des principales formations sédimentaires est la suivante :

- les fonds rocheux couvrant environ la moitié de la zone d'étude sont observables sur :
  - le vaste plateau des Bœufs, à l'ouest de Noirmoutier,
  - le plateau (ou banc) de Guérande, plus au Nord,
  - une prolongation méridionale de ce dernier, au-delà de la dépression du Grand Trou, jusqu'à l'intérieur de la partie distale du chenal de navigation,
  - les hauts-fonds de la Banche et de la Lambarde, et ceux « fermant » la baie du Pouliguen (les Evens, Pierre Percée),
  - les prolongements sous-marins des pointes de Croisic, de Saint-Gildas, et de quelques portions littorales (Pornichet...),
  - quelques zones très peu profondes à l'intérieur de la baie de Bourgneuf.
- les deux principaux dépôts de sédiments caillouteux et graveleux (médiane granulométrique > 2mm) se trouvent :
  - l'un en bordure septentrionale des roches du banc de Guérande,
  - l'autre au Sud de Noirmoutier.

Deux autres petites zones de dépôts de sédiments caillouteux et graveleux existent : l'une dans la partie Sud-Ouest de la Grande Rade de la Loire au contact des fonds rocheux du Sud du Grand Trou, l'autre dans le goulet de la Fromentine.

- les sables grossiers à caillouteux (médiane granulométrique < 2 mm, mais fraction dominante > 0,5 mm) sont localisés dans :
  - le chenal du Nord et les environs du plateau de la Banche,
  - l'embouchure de la Loire, en une bande joignant la pointe de Chémoulin et la pointe de Saint-Gildas,
  - le Sud de la Grande rade de la Loire et l'entrée de la baie de Bourgneuf.

- les sables fins (moins de 15 % d'éléments de taille > 2mm ; médiane <2 mm, et fraction dominante comprise entre 0,05 et 0,5 mm) occupent :
  - quelques espaces littoraux (Trait du Croisic, baie du Pouliguen, abords de Fromentine) et/ou estuariens (littoral estuarien du pays du Retz, bancs de l'embouchure de la Loire),
  - l'entrée du Chenal du Nord jusqu'au niveau du Chatelier, et les environs du plateau de la Lambarde avec extension vers le Sud-Ouest jusqu'aux roches du banc de Guérande,
  - un assez grand secteur situé en bordure Nord-Est du plateau des Boeufs, dans la région distale du chenal de navigation,
  - deux petites zones, très localisées, dans l'entrée de la baie de Bourgneuf.
- les sédiments vaseux forment des dépôts relativement importants :
  - au Nord-Ouest du Croisic, sur le secteur « Mor Bras »
  - aux abords et au-delà de la pointe du Croisic,
  - à l'embouchure de la Loire, dans le chenal de Mindin,
  - dans la baie de Bourgneuf et principalement dans les chenaux du centre et dans le fond de la baie,
  - dans un long « couloir » s'étendant du Nord-Est vers le Sud-Ouest (zone des « Bouquets »), entre la zone septentrionale de la Grande Rade de la Loire (entre la Lambarde et la pointe de Saint-Gildas) et la fosse du Grand Trou.



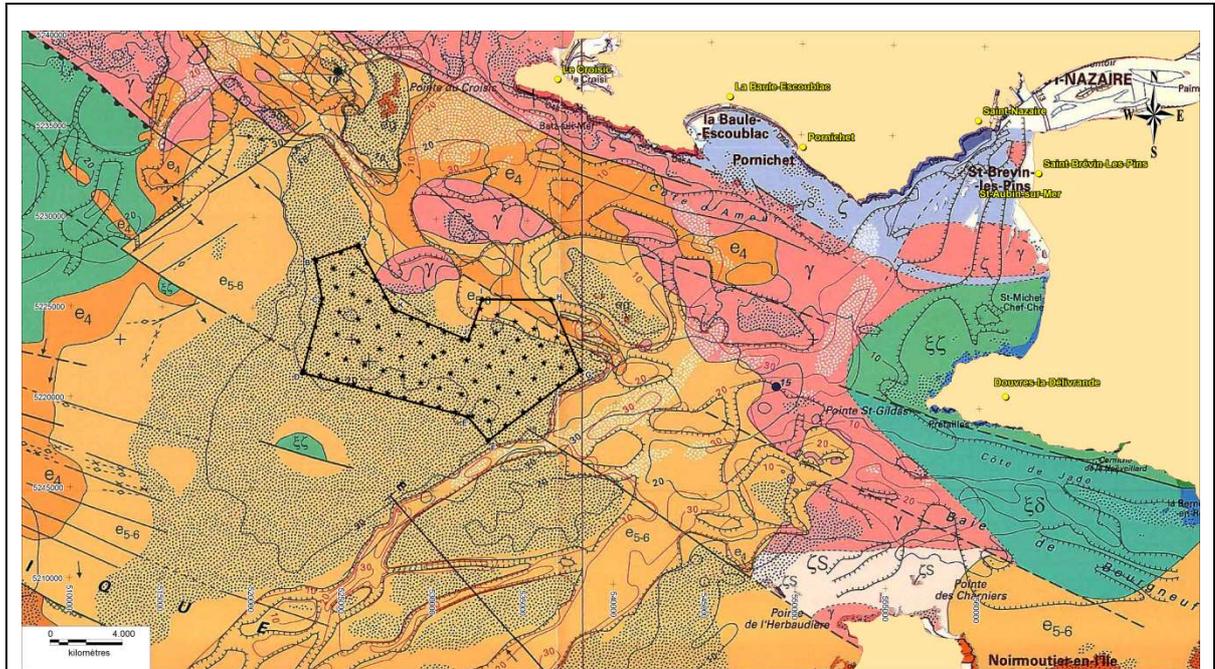
**Figure 58. Carte des faciès sédimentaires (Vaney, 1968) Rose = rocher. Voir détails carte sur Figure Annexe E-1**

### 6.1.2. Matrice rocheuse

La matrice rocheuse, d'après la carte du BRGM (Figure 59) est composée :

- De calcaire de l'Eocène (e5-6), qui recouvre plus de la moitié de la zone d'étude étendue et qui constitue le substratum rocheux de la plupart des plateaux rocheux.

- De sables yprésiens, localisés (e4) essentiellement entre la zone de plateau (Guérande, Banche, Four) et une bande côtière,
- De granite paléozoïque ( $\gamma$ ) localisé sur une bande entre la pointe du Croisic et la pointe Saint Gildas,
- De Gneiss ( $\zeta$ ), principalement localisé de la baie de la Baule jusqu'à l'estuaire de la Loire.



**Figure 59. Carte géologique (BRGM, 2008) - Voir détails carte sur Figure Annexe E-2**

### 6.1.3. Mobilité des sédiments

Les seuils critiques de mise en mouvement des sédiments sont donnés dans les tableaux ci-dessous pour des intensités de courants et des agitations caractéristiques du site. Ces seuils ont été calculés par des fonds de -20 m. Cette profondeur d'eau est considérée représentative de la zone d'étude entre le parc et la côte, en excluant la zone entre -10 m et 0 considérée dans la section précédente.

Le tableau suivant donne les vitesses critiques de courants pour différentes taille de grain.

**Tableau 23 – Vitesses critiques de courant pour la mise en mouvement des sédiments**

	D50 = 0,063 mm	D50 = 0,20 mm	D50 = 0,63 mm	D50 = 2,0 mm
	Sédiment fin			Sédiment grossier
Vitesse critique de mise en mouvement	0,46 m/s	0,47 m/s	0,54 m/s	0,93 m/s

Le tableau suivant indique pour quel sédiment les houles usuelles remettent les sédiments en mouvement.

**Tableau 24 – Capacité des houles usuelles à mettre les sédiments en mouvement**

	D50 = 0,063 mm	D50 = 0,20 mm	D50 = 0,63 mm	D50 = 2,0 mm
	Sédiment fin			Sédiment grossier
Conditions de houle	H = 2m, T = 8s	H = 2m, T = 8s	H = 2m, T = 8s	H = 2m, T = 8s
	Mise en mouvement	Mise en mouvement	Fond immobile	Fond immobile

Notons que la combinaison houle + courant permet d'abaisser les vitesses critiques de mise en mouvement des sédiments et les agitations minimales pour qu'il y ait transport.

Compte-tenu de la nature des fonds sur la zone d'étude, des courants et du climat de houle, les tableaux ci-dessous confirment :

- L'existence d'une dynamique sédimentaire sur la zone d'étude,
- La variabilité spatiale et temporelle de cette dynamique
  - du fait de la variabilité spatiale des fonds et des facteurs hydrodynamiques,
  - en fonction de la marée et des conditions d'agitation.

La morphodynamique de la zone d'étude est ainsi, en conditions usuelles, faible car non étendue spatialement du fait de la variabilité de la nature des fonds et non continue temporellement, du fait des vitesses de courant modérées et des conditions de houle usuelles. Elle n'est pas significative au regard des évolutions de fond qui adviennent en tempête, en conditions de houle déferlante.

## 6.2. IMPACT SEDIMENTAIRE

### 6.2.1. Impact lié à la modification des courants

Les modifications des courants par le parc éolien, en dehors de la zone d'implantation, sont trop faibles pour conduire à une modification de la mobilité des sédiments sous l'action des courants. Il n'y a donc pas d'impact du parc éolien sur la morphodynamique des fonds générée par les courants.

### 6.2.2. Impact lié à la modification des houles

Un calcul de transport solide pour la condition de houle annuelle avec la formule de Soulsby (1997) au point P7 (Figure 56), par -20 m de fond, situé entre le parc et la presqu'île du Croisic, zone d'impact la plus forte pour la houle annuelle (Figure 49) nous indique une variation relative du transport solide (considérant que la condition annuelle advient en moyenne 0,3% du temps) entre état actuel et aménagé de - 0,015 %. Cette réduction est bien en-dessous des seuils d'impact significatif et nous permet de conclure à une absence d'impact du parc éolien sur la dynamique sédimentaire à l'échelle régionale.

#### **6.2.4. Bilan des impacts sur la morphodynamique régionale**

La dynamique sédimentaire régionale est spatialement et temporellement variable, en fonction des fonds et des conditions hydrodynamiques (courants et houles). Elle est faible en conditions usuelles et les évolutions significatives des fonds correspondent ainsi aux évènements de tempête pour lesquels la houle déferle. Les impacts du parc dans ces conditions sont négligeables, puisque d'une part, les impacts sur les houles de tempête sont négligeables et d'autre part, puisque ces impacts conduisent à une modification du transport solide inférieure à 1%.

On peut donc conclure **à l'absence d'impact du parc éolien sur la morphodynamique régionale.**

## **7. IMPACT SEDIMENTAIRE LOCAL**

L'étude de l'impact sédimentaire local correspond à l'évaluation des modifications possibles des fonds dans le champ proche des fondations d'éoliennes qui, dans cette étude, sont des monopiles de 7 mètres de diamètre.

Si les modifications des conditions hydrauliques (houles et courants) à l'échelle globale sont faibles, elles sont néanmoins potentiellement plus importantes localement, dans le champ proche de chaque éolienne. Ainsi, pour les fondations reposant sur des sédiments érodables, on peut s'attendre localement, au pied de chaque éolienne, au développement d'une fosse d'affouillement.

Cette section présente dans un premier temps, les conditions de sol au pied des éoliennes pour déterminer si le sédiment est meuble et érodable. Dans un deuxième temps, une revue de la littérature scientifique sur l'affouillement en pied de structures permettra de caractériser l'affouillement maximal attendu au pied de fondations exposées à ce phénomène.

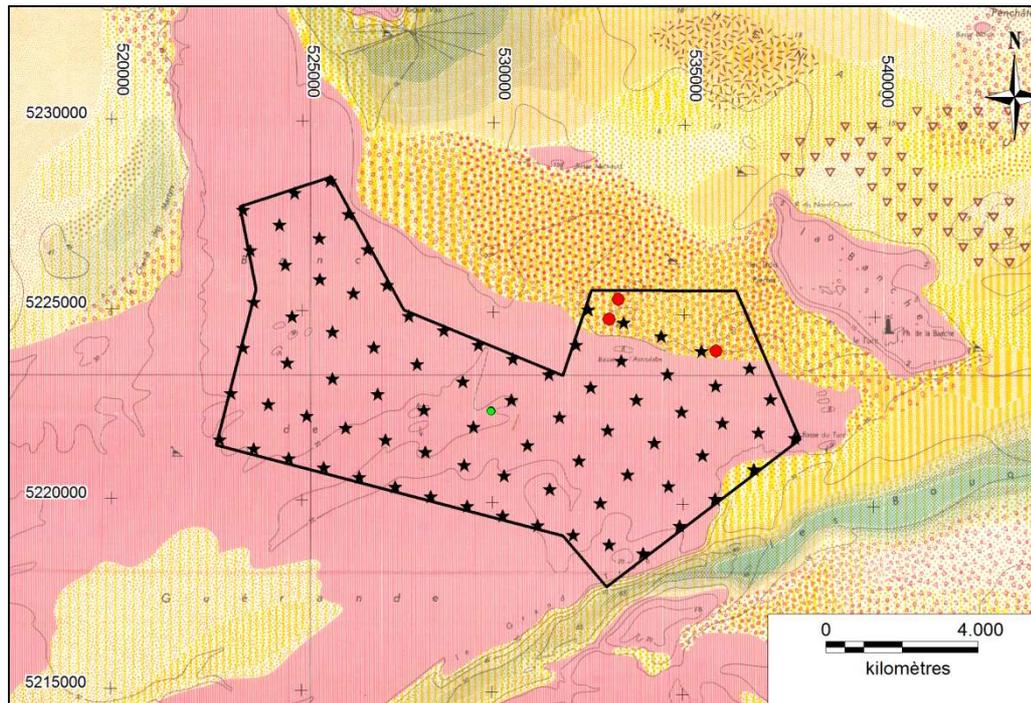
### **7.1. CONDITIONS DE SOL**

Les données utilisées pour déterminer les conditions de sol sur l'emprise du parc éolien sont issues :

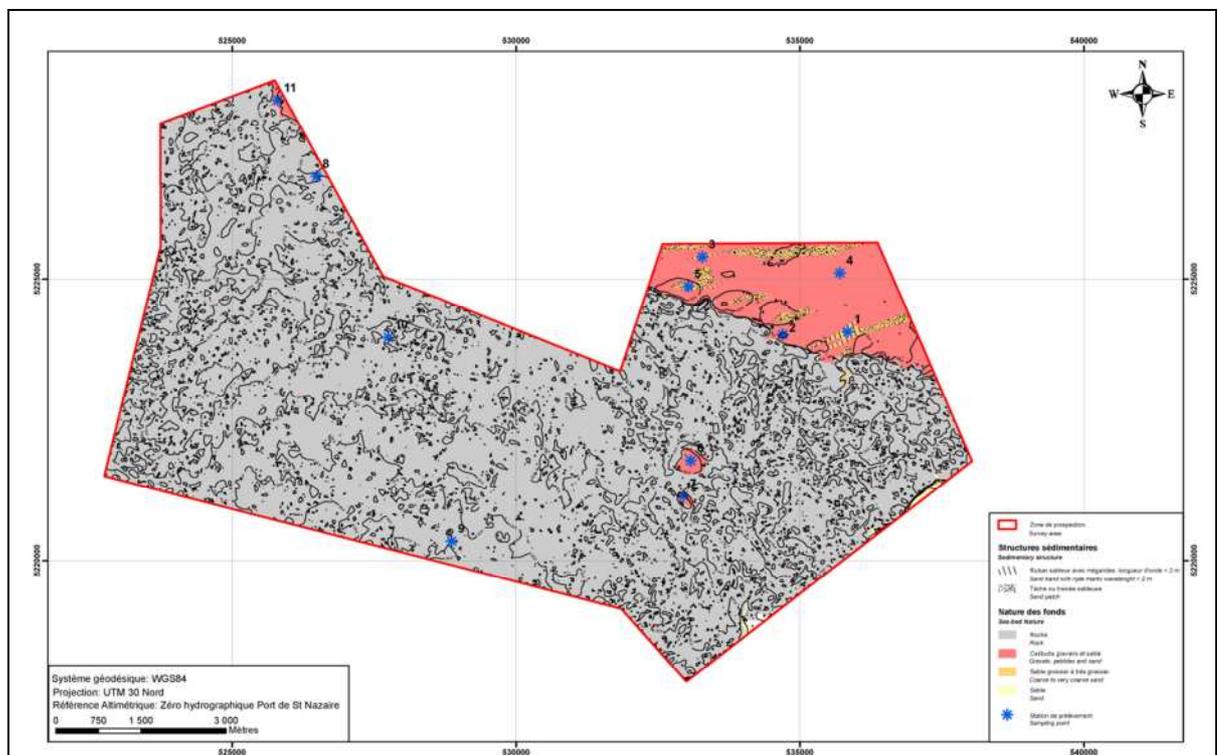
- Des résultats de la campagne de mesures géophysiques réalisée par In Vivo en mars-avril 2011 (In Vivo 2011) ;
- De la carte géologique du BRGM de la Bretagne Sud (BRGM 2008) ;
- De la carte de la nature des fonds réalisée par Vanney de nature des fonds (Vanney 1968) ;
- De la carte d'épaisseur des sédiments réalisée à partir de la base de données de l'Ifremer.

#### **7.1.1. Nature des fonds**

La carte des faciès sédimentaire (Vanney, 1986) et les résultats de la campagne au sonar latéral d'In Vivo (In Vivo, 2011) mettent en évidence des fonds rocheux sur 90 % de la zone d'implantation des éoliennes. Les sédiments meubles sont localisés sur l'extrémité nord-est de la zone d'implantation, au nord du talus qui constitue une limite nette entre le banc et les fonds par -20 m, et sur une zone localisée sur la frontière sud-est. Ces sédiments meubles sont composés d'un mélange de graviers, cailloutis et sables grossiers.



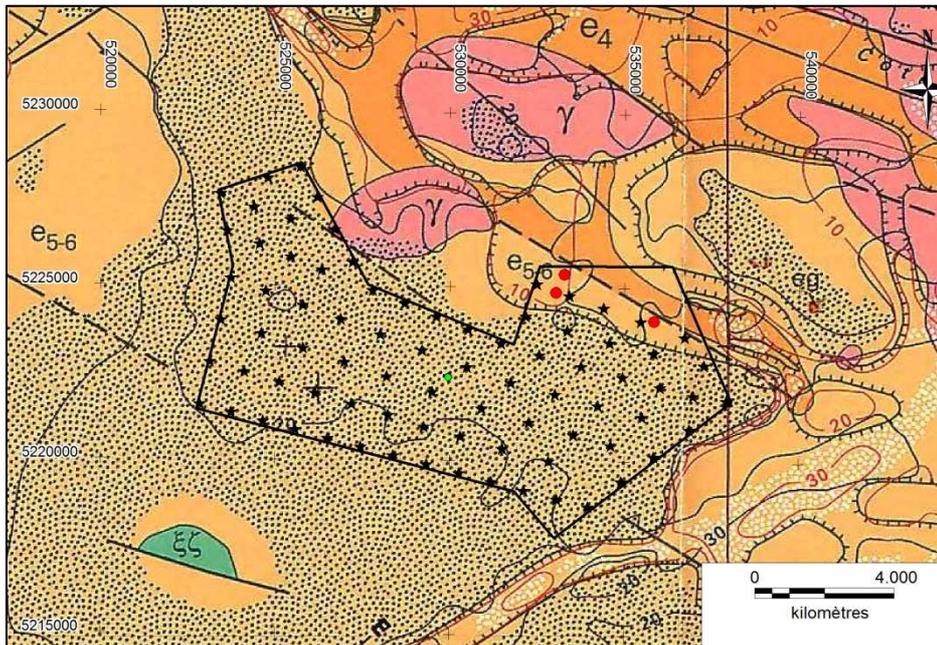
**Figure 60. Nature des fonds sur la zone d'étude (Vanney, 1968) Rose = rocher. Les points rouge représentent les prélèvements d'échantillons granulométriques lors de la campagne In Vivo 2011. Voir détails carte sur Figure Annexe E-1**



**Figure 61. Carte de nature des fonds de la zone de projet, In Vivo 2011. Voir détails carte sur Figure Annexe F-1**

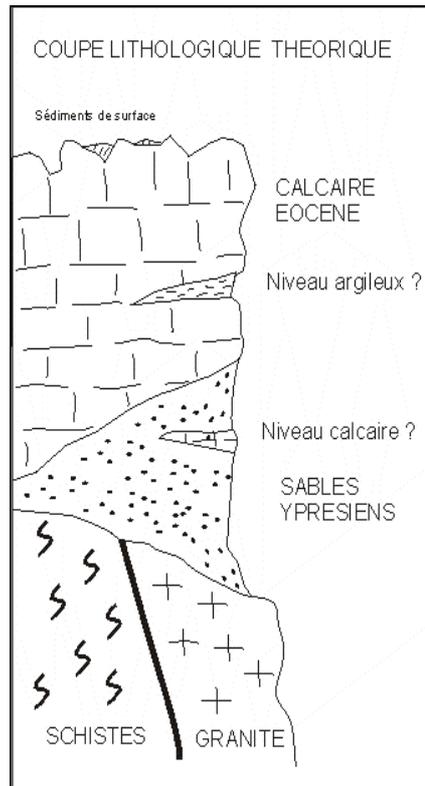
### 7.1.2. Matrice rocheuse

D'après les données de cartographie disponibles, le substrat rocheux est essentiellement calcaire, datant de la période Eocène. Localement des terrains granitiques paléozoïques et sablo argileux Yprésiens sont signalés au niveau de la bordure Nord du site. Enfin les cartes géologiques indiquent des accidents tectoniques qui pour certains ont un jeu vertical suffisant pour amener en surface des roches issues du substratum (granites ou schistes). Bien que cela ne soit pas signalé au niveau du site, il n'est pas exclu que de telles occurrences puissent s'y répéter, la cartographie géologique sous-marine du site n'étant pas au stade actuel des études suffisamment exhaustive (Figure 62) pour l'exclure définitivement.



**Figure 62. Carte géologique de la zone de projet (BRGM) Voir détails carte sur Figure Annexe E-2**

On peut résumer l'organisation théorique des différentes formations lithologiques du site selon la figure suivante.



**Figure 63.** Plan de position des stations de prélèvement de sédiment

### 7.1.3. Sédiments meubles

Plusieurs stations de prélèvement de sédiments ont été définies lors de la campagne de mesures 2011. Les coordonnées sont données dans le [Tableau 25](#) et la localisation de l'ensemble de ces stations est représentée sur la [Figure 61](#) (points bleus).

**Tableau 25 – Coordonnées de stations de prélèvement de la campagne de mars 2011 (In Vivo)**

Station	X (WGS84 UTM 30N)	Y (WGS84 UTM 30N)
1	535 844,0	5 224 057,0
2	534 696,1	5 224 009,4
3	533 281,1	5 225 394,1
4	535 705,0	5 225 108,2
5	533 031,5	5 224 868,5
6	533 075,3	5 221 779,3
7	532 947,4	5 221 152,5
8	526 482,0	5 226 830,4
9	528 865,6	5 220 345,9
10	527 750,4	5 223 959,8
11	525 799,4	5 228 183,2

Seules trois stations : 1, 3 et 5, situées dans la partie « basse » au nord-est de la zone (par -20 m), ont permis de prélever des échantillons granulométriques (sédiments sableux). Ces échantillons sont représentés par un point rouge sur la [Figure 60](#). Les principales caractéristiques de ces échantillons sableux sont données dans le [Tableau 26](#), le détail étant reporté en Annexe F figures F-2 à F-4.

Les autres prélèvements sont de nature graveleuse à caillouteuse ([Figure 64](#)).

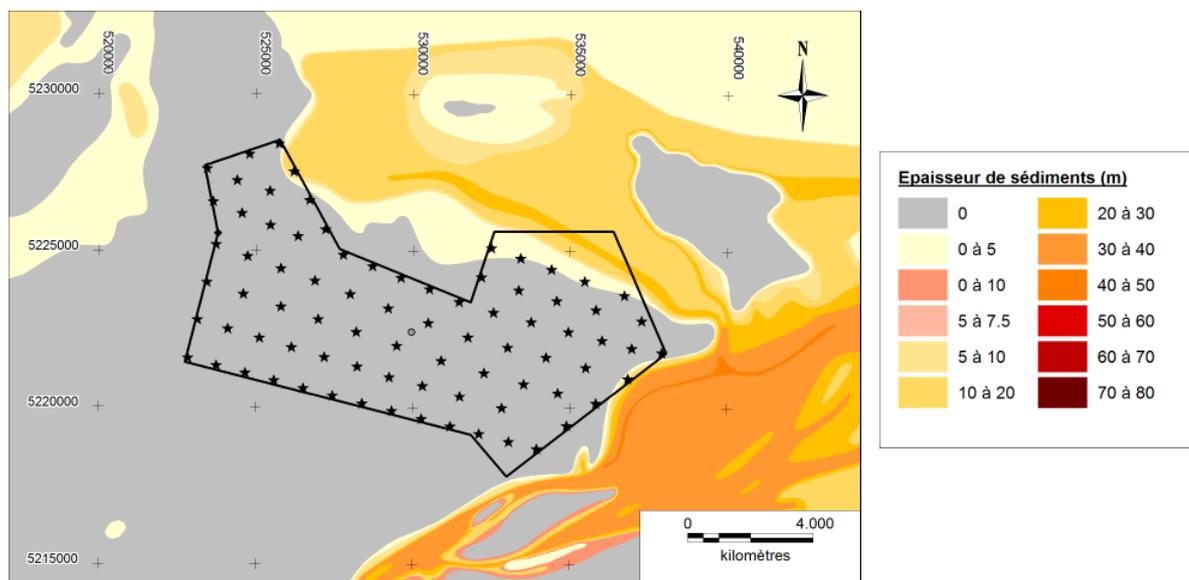
**Tableau 26 – Caractéristiques granulométriques des échantillons sableux (In Vivo, 2011)**

Station	Mode (µm)	Médiane (µm) = d50	Fraction fine (%)	Faciès	Teneur en calcaire
1	1000	1027	0	Sables très grossiers	45,1 %
3	500	848	0	Sables grossiers	31,4 %
5	500	567	0	Sables grossiers	42,2 %



**Figure 64. Photographies de l'ensemble des échantillons bruts (In Vivo, 2011)**

Peu d'informations sont disponibles sur l'épaisseur des sédiments. La carte des isopaques, réalisées à partir des données de l'Ifremer donne des épaisseurs de sédiments de l'ordre de 20 à 30 m au nord-est de la zone et de l'ordre de 5 à 10 m localement sur la bordure sud-est de la zone.



**Figure 65. Carte des épaisseurs de sédiments, d'après IFREMER**

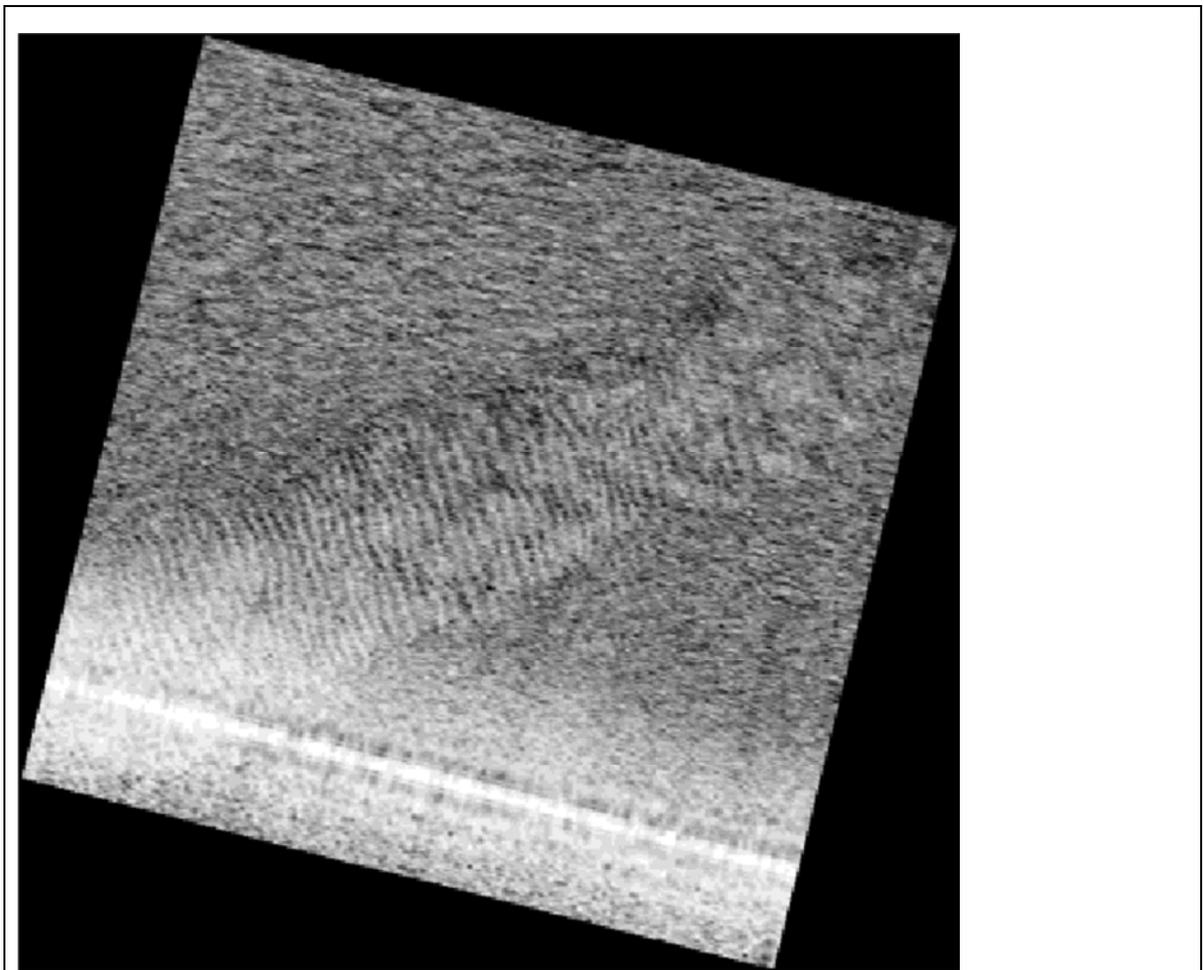
Notons que cette carte d'épaisseur de sédiments a été tracée grâce à l'interprétation de profils sismiques. Sur ces profils, il est difficile voire impossible de distinguer une interface entre des sédiments récents et une formation meuble. Ainsi, ce qui apparaît comme « sédiment » sur cette

carte peut être une combinaison entre sédiments meubles et sables yprésien. Ceci explique l'épaisseur importante figurant le long de la bordure nord-est de la zone.

#### **7.1.4. Structures sédimentaires**

Dans la zone de sédiments meubles, quelques structures sédimentaires ont été mises en évidence avec la campagne de sonar latéral (In Vivo 2011)

Outre des placages sableux, sans orientation particulière, d'épaisseur décimétrique sur une surface de quelques dizaines à quelques centaines de mètres carrés, il a été identifiés des structures longitudinales (parallèles aux courants dominants, ie orientées ENE – OSO) et des structures transversales (orientées perpendiculaires aux courants dominants, E – NO), superposées aux structures longitudinales (Figure 66).



**Figure 66. In Vivo : Rubans sableux et mégarides issus de la mosaïque sonar**

Les rubans sableux sont de 600 à 1600 m de long, sur 15 à 70 m de large et de quelques centimètres à quelques décimètres d'épaisseur. Les trainées sableuses identifiées mesurent de 600 à 2600 m de long sur 130 à 200 m de large et sont de quelques centimètres d'épaisseur.

Les mégarides sont observées sur les rubans sableux, sont de longueur d'onde inférieure à 2 m et de hauteur centimétrique.

Ces structures sédimentaires confirment que les sables présents sur le site, bien que grossiers, sont mobilisables sous l'action des courants et de la houle.

### 7.1.5. Identification des zones à risque d'affouillement

Compte-tenu de la nature des fonds, le risque d'affouillement en pied de structure est identifié essentiellement pour les éoliennes situées à proximité du talus nord-est qui borde le banc (éoliennes t51, t63, t67, t72 et t79). Elles sont implantées par des fonds variant de -19 à -23 m. Un risque est également identifié pour l'éolienne t45, le long de la frontière sud-est de la zone d'implantation. Cette éolienne, implantée par des fonds de -14,5 m ZH environ est, sur la bordure du banc à l'interface entre les fonds rocailleux du plateau et les fonds plus meubles alentours.

Le recoupement des isopaques et des résultats de la campagne au sonar latéral conduit à penser que l'épaisseur des sédiments meubles est cependant faible, inférieure à 5 m. Ce point sera cependant à vérifier à partir d'études sismiques détaillées.

## 7.2. THÉORIE DE L'AFFOUILLEMENT AU PIED DE FONDATIONS MONOPIEU

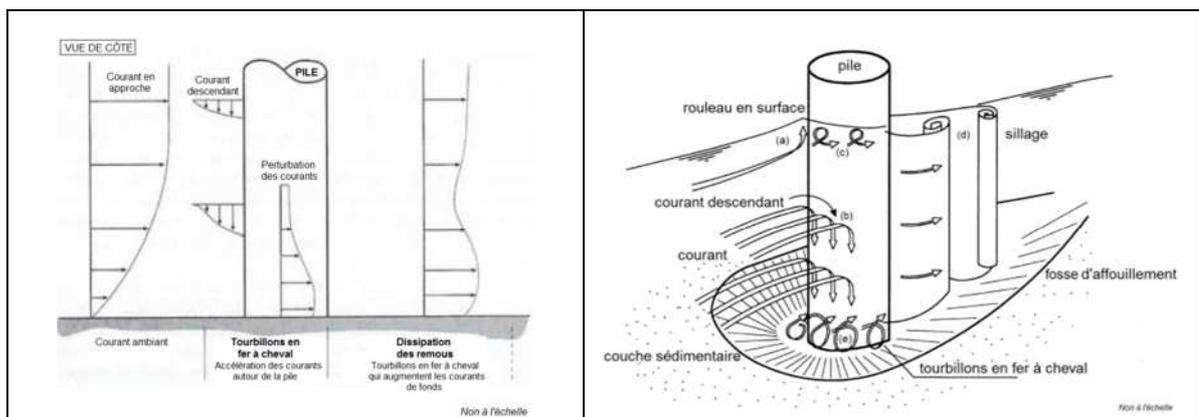
Les paragraphes ci-dessous présentent succinctement le processus d'affouillement et synthétisent les principaux résultats des différentes publications scientifiques sur le sujet, les règles empiriques utilisées lors d'études sur plans pour estimer l'affouillement et dimensionner les protections pour les fondations.

### 7.2.1. Modification locale des conditions hydrodynamiques

#### 7.2.1.1. Principe d'affouillement

Le processus d'affouillement en pied d'une structure immergée correspond à une modification locale des contraintes hydrodynamiques (Figure 67):

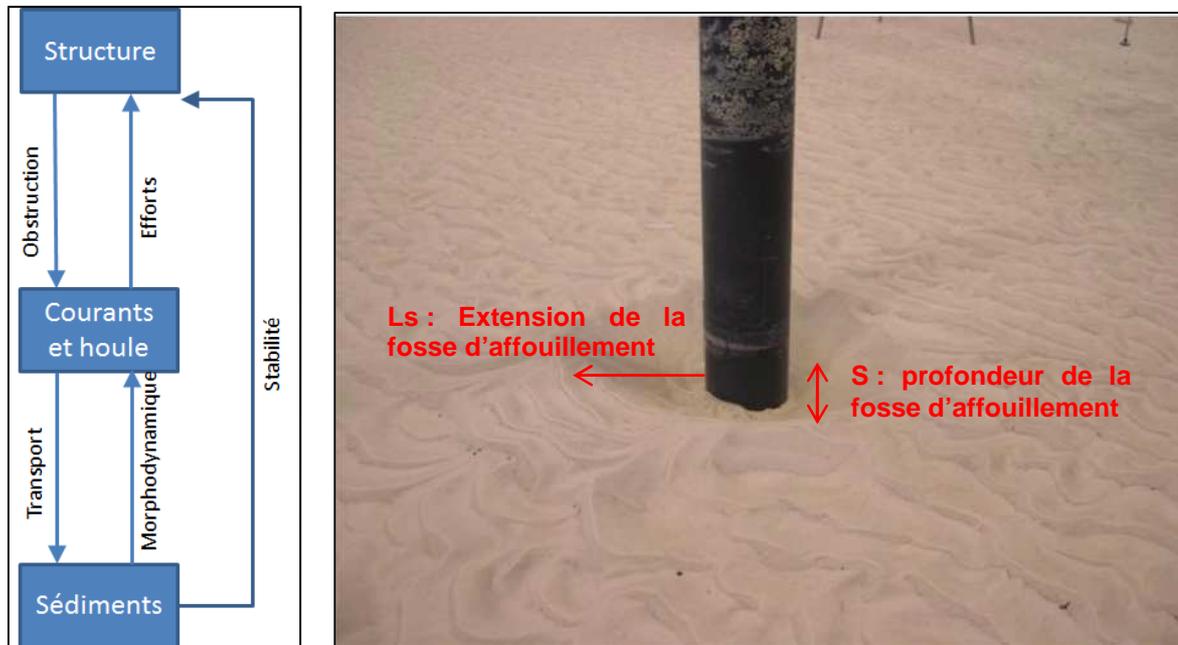
- Accélération de l'écoulement à proximité de l'obstacle du fait de la convergence des lignes de courant,
- Modification des conditions de houle (selon les phénomènes de diffraction et de réfraction),
- Accroissement de l'énergie turbulente de l'écoulement, due à la génération de tourbillons à proximité de la structure.



**Figure 67. Gauche : Illustration des profils de vitesse (Sumer, 1992). Droite : Illustration des lignes de courant (Melville, 1988)**

Ces modifications locales des conditions hydrodynamiques induisent des modifications locales des contraintes de cisaillement sur le fond et conduisent à la mobilisation des sédiments qui sont alors transportés par les houles et courants.

La figure ci-dessous illustre les interactions entre structure, forçages hydrodynamiques et sédiments et le développement d'une fosse d'affouillement qui en résulte.



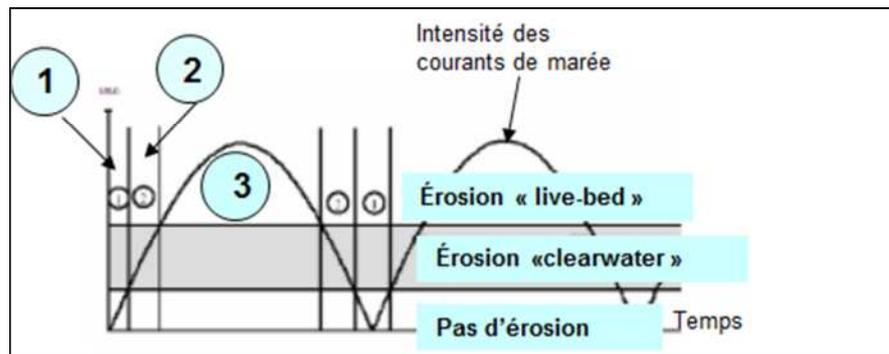
**Figure 68. Gauche : Interaction structure, hydrodynamique et sédiment (Haddorp, 2005), Droite : Géométrie des fosses d'affouillement qui se développent autour d'une fondation cylindrique (source : www.bpp-cables.com)**

### 7.2.1.2. Développement de l'affouillement

#### A. Courants

En régime d'écoulement permanent ou lentement variable (marée), l'obstacle à l'écoulement engendre des gradients de pression sur les faces de l'ouvrage ; les gradients de pression produisent des écoulements verticaux (dirigés vers le bas ou vers le haut), qui génèrent des tourbillons et de la turbulence. Ces tourbillons, en augmentant la contrainte de l'écoulement sur le fond, sont en grande partie responsables de l'affouillement.

Dans le cas de régime d'écoulement alternatif (courant de marée), le processus d'affouillement évolue avec le temps ainsi qu'illustré sur la figure ci-dessous.



**Figure 69. Cycle d'érosion au cours de la marée (Offshore Center Danemark, 2006)**

- Phase 1 : les vitesses de courant sont faibles et ne mobilisent pas les sédiments
- Phase 2 : les vitesses de courant sont relativement faibles : seuls les sédiments en pied de structure, là où les courants sont accélérés et les turbulences générées, sont mobilisés. Une érosion en conditions d'eau non chargée apparaît en pied d'ouvrage (« clearwater scour »)
- Phase 3 : les vitesses de courant sont assez fortes pour mobiliser les sédiments à l'amont de l'écoulement. Les fonds sont mobiles et le processus d'affouillement en pied d'ouvrage continue (« live-bed scour »).

Ce processus se répète au cours des cycles de marée jusqu'à ce que la profondeur d'équilibre de la fosse d'affouillement soit atteinte. Le schéma d'affouillement à l'équilibre est globalement symétrique par rapport à la fondation.

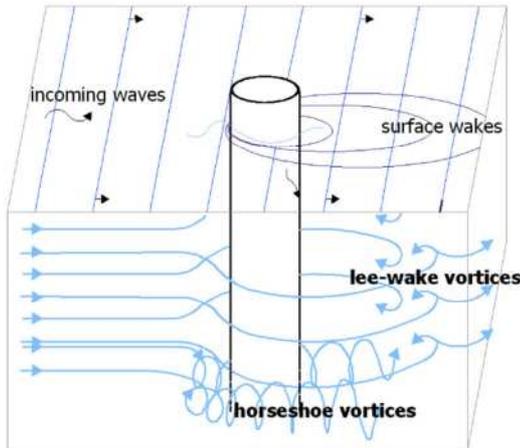
## B. Houle

L'impact de la fondation d'éolienne sur la houle conduit à une modification des vitesses orbitales de la houle. Ces vitesses orbitales sont modifiées du fait de la modification de la houle par génération d'ondes réfléchies et diffractées, et du fait de la modification de l'écoulement même autour de la structure.

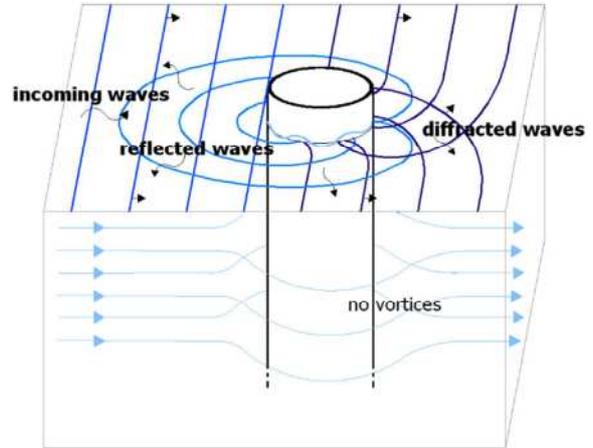
Comme dans le cas des courants, des surpressions et tourbillons apparaissent, de la turbulence est générée et les sédiments sont alors remis en suspension et transportés.

Les différents travaux sur l'érosion en pied de structures verticales cylindriques mettent en évidence l'importance du nombre adimensionnel de Keulegan-Carpenter pour caractériser le type d'affouillement en pied de structure. Haddorp (2005) relie ainsi les géométries d'affouillement attendues aux différents régimes d'écoulement définis par le nombre de Keulegan-Carpenter : régime de pile mince, régime de pile large (ou régime diffractif) et régime intermédiaire (Figure 70, Figure 71, Figure 72).

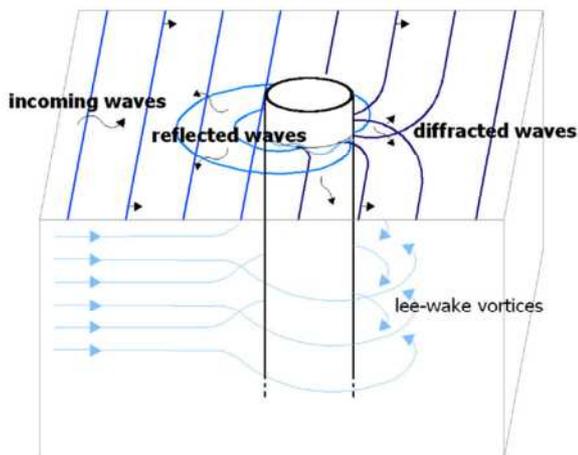
Le nombre de Keulegan-Carpenter varie avec les conditions de houle et localement, le régime d'écoulement qui sera observé au droit d'une éolienne, pourra varier d'un régime à l'autre. Les conditions de houle usuelles définissent un affouillement moyen tandis que les conditions de houle extrêmes définissent l'affouillement maximal.



**Figure 70.  $KC > O(6)$  – Régime de “pile mince”**



**Figure 71.  $KC < O(1)$  – Régime de pile large (Régime diffractif)**



**Figure 72.  $O(1) < KC < O(6)$  – Régime de pile intermédiaire**

### 7.2.1.3. Dimensions de l'affouillement

Notons que beaucoup de travaux ont été menés dans le cas des piles minces, d'autant que historiquement, les projets éoliens offshore ont été développés sur des fondations monopieu de diamètre inférieur à 5 m. Moins de données sont disponibles dans le cas des régimes de pile large et encore moins dans le cas des régimes de piles intermédiaires.

#### 7.2.1.3.1. Affouillement en pied de piles minces

L'équation la plus courante pour déterminer la profondeur d'affouillement en conditions de houle (non déferlante) + courant est celle de Sumer et al (2002), valable pour  $KC > 6$ .

$$\frac{S}{D} = 1,3 [1 - \exp(-A(KC - B))]$$

Avec :

S profondeur de la fosse d'affouillement,

D Diamètre de la fondation  
 KC nombre de Keulegan Carpenter

$A = 0,03 + \frac{3}{4} U_{cw}^{2,6}$  et  $U_{cw} = \frac{U_c}{U_c + U_w}$ , et  $U_c$  vitesse du courant,  $U_w$  vitesse orbitale au fond, avant perturbation

$$B = 6e^{-4U_{cw}}$$

D'après cette équation (non valable en conditions déferlantes), l'affouillement maximal est tel que  $S/D = 1,3$ . Cela correspond à la profondeur d'affouillement en courant seul.

Le ratio  $S/D = 1,3$  est la valeur recommandée par les DNV dans la prise en compte de l'affouillement dans le dimensionnement des structures. Rappelons néanmoins que cette valeur n'est pas valable dans le cas d'une houle déferlante. Dans le cas d'une houle déferlante, il est recommandé de prendre  $S/D = 2$  (Haddorp, 2005).

En ce qui concerne l'extension de la fosse d'affouillement ( $L_s$ ), des expériences en houle + courant (de Bruyn, 1988) ont montré une extension de la fosse d'affouillement de  $4D$  en amont de la pile et de  $6D$  à l'aval de la pile. D'après Haddorp, pour tenir compte des multiples incertitudes, les protections anti-affouillement sont installées sur un rayon de 7 fois le diamètre de la pile.

#### 7.2.1.3.2. Affouillement en pied de piles larges

Le tableau suivant (extrait de Haddorp 2005) résume les résultats des différents travaux réalisés sur les affouillements en pied de piles larges.

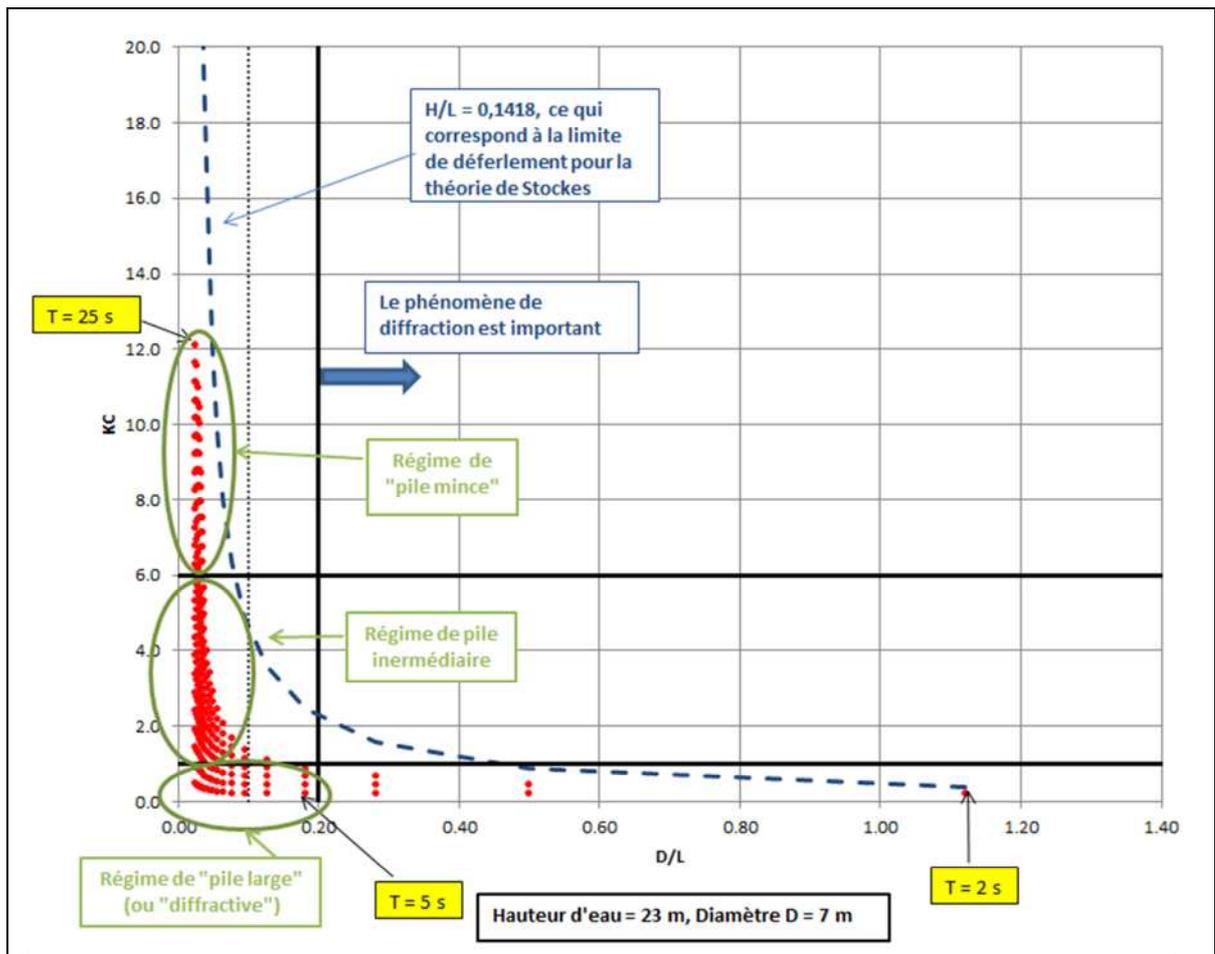
**Tableau 27 – Profondeur maximales d'affouillement en pied de pile large Haddorp 2005)**

	Profondeur maximale d'affouillement	Définition de pile « large »
Rance (1980)	0,06D	$D/L > 0,1$
Katsui et Toue (1993)	0,04D	$KC < 0,5$
Verheij et Hoffmans (1997)	Nul	$KC < 6, D/L < 0,1$
Sume et Fredsoe (2002)	0,03	$KC < 1,2, D/L < 0,27$

Dans l'étude de Rance (1980), l'extension de la fosse d'affouillement est de  $0,75xD$ . Néanmoins, d'autres expériences ont montré une fosse d'affouillement de rayon  $1xD$ .

#### 7.2.2. Application au site d'étude

Sur le site d'étude, les éoliennes qui sont localisées sur des fonds érodables sont implantées par des profondeurs d'environ 20 m. Avec un marnage de l'ordre de 6 m, la hauteur d'eau varie entre 20 et 26 m. La figure ci-dessous présente les différents KC attendus au droit des éoliennes, pour une profondeur d'eau de 23 m.



**Figure 73. Calcul du KC pour les différentes conditions de houle rencontrées sur le site d'étude au niveau des éoliennes à risque**

Il apparaît ainsi que les fondations des éoliennes considérées correspondent à des piles minces en conditions extrêmes et à des piles larges (ou intermédiaires) en conditions usuelles.

L'affouillement maximal, régi par les conditions de houles extrêmes, est donc défini à partir du schéma d'affouillement correspondant aux « piles minces ». Néanmoins, les conditions de houle extrêmes sont déferlantes sur le site. Aussi, dans le cas du présent projet, pour les éoliennes sur les fonds érodables, il convient de considérer une profondeur maximale d'affouillement théorique de  $2 \times D = 14$  m.

Compte-tenu des conditions de site, la fosse d'affouillement sera vraisemblablement limitée par le stock de sédiments érodables.

Les dimensions des fosses d'affouillement seront au maximum de 49 m de rayon autour de la pile, pour une profondeur d'affouillement de ~14 m. Néanmoins, la dimension de la fosse dépendra de sa profondeur réelle d'affouillement et pourra donc être affinée une fois l'épaisseur des sédiments érodables connue.

### 7.2.3. Retours d'expérience

Le tableau ci-après indique les profondeurs d'affouillement mesurées au pied des fondations monopieu de plusieurs parcs construits.

**Tableau 28 – Profondeurs mesurées et emprises calculées du processus d'affouillement pour un panel de parcs éoliens offshore avec des structures monopiles. Source : Wallingford 2011**

Nature du sol		Site	Protection anti-affouillement		Diamètre monopile D (m)	Profondeur (m ZH)	Vitesse des courants (m/s)	Exposition à la houle		Affouillement moyen et maximal sur le parc au moment des mesures	Profondeur
Sable	fin à moyen	N7		non	6	5.7	0.75	oui		- moyen - maximal	<b>0,8</b> D <b>1,05</b> D
	fin à moyen avec présence de coquillages	Scarweather Sands		non	2,2	6	1.1	oui		- moyen à marée haute - moyen à marée basse	<b>0,27</b> D <b>0,59</b> D
	moyen	Otzume Balje inlet		non	1,5	12	1.4		non	- max durant une vive-eau - max durant une morte-eau	<b>1,47</b> D <b>1,2</b> D
Argile avec couverture	graveleuse, sablo-graveleuse	Barrow		non	4,75	12 – 18	0.8	oui		- zone : argile non atteint - moyen - maximal - zone : argile atteint	<b>0,84</b> D <b>1,21</b> D <b>0,1</b> D
		North Hoyle		non	4	6 – 12	1.17	oui		maximal	<b>0,125</b> D
	sable fin	Kentish Flats		non	5	3 – 5	0.9	oui		maximal	<b>0,46</b> D
	sable moyen avec présence de graviers et coquillages	Scroby Sands		non	4,2	3 – 12	1.65	oui		maximal	<b>1,38</b> D
			oui		4,2	3 – 12	1.65	oui		- moyen - maximal	<b>0,8</b> D <b>1,7</b> D
Sable	moyen, présence de gravier	Arklow Banks	oui		5	2 – 6	2	oui		- moyen - maximal	<b>0,3</b> D <b>0,9</b> D
	moyen	OWEZ (Ergmond aan Zee)		non	2,9	15 – 18	-	oui		maximal	<b>0,8</b> D
			oui		4,6	15 – 18	-	oui		maximal	<b>0,34</b> D
fin à grossier	Horns Rev 1	oui		4,25	6 – 13	0.8	oui		- maximal - déformation max de la protection	<b>0,12</b> D <b>0,35</b> D	

Ce tableau illustre la variabilité des profondeurs d'affouillement sur l'ensemble des parcs existants. Il apparaît que la profondeur d'affouillement est en moyenne moindre que la profondeur théorique maximale, soit  $1,3 \times D$  en conditions non déferlantes et  $2 \times D$  en conditions déferlantes. Néanmoins, les informations recueillies ne donnent pas les conditions de houle qu'ont subies les parcs au cours de leur vie et il n'est dans ces conditions pas possible de déterminer si ces affouillements sont des affouillements maximaux à l'échelle de la vie du parc.

#### **7.2.4. Bilan des impacts sur les fonds localement**

Les fonds sur l'emprise du parc éolien sont essentiellement rocheux, sauf en bordure Nord-Est et ponctuellement sur la bordure Sud-Est.

Sur les fonds rocheux, les fondations d'éoliennes n'auront aucun impact en termes d'évolution des fonds. En revanche sur les fonds érodables, une fosse d'affouillement se développera au pied des fondations. Les houles de tempête déferlant sur le banc, la profondeur maximale de la fosse d'affouillement à considérer sera de 2 fois le diamètre de la pile, soit de 14 m, à conditions que l'épaisseur de sédiments érodables soit aussi importante, et s'étendra alors sur un rayon d'environ 50 mètres autour de la pile.

oOo

## BIBLIOGRAPHIE

- Actimar (2011) *Metocean Design Criteria for Offshore Wind Farm on the Guerande Bank*. Rapport n°11.10. Pour EDF-EN
- ARTELIA (2008) *Analyse du contexte hydrodynamique local et recherche de techniques de mesure permettant de préciser le devenir des vases clapées non stabilisées sur le site de la Lambarde*. Pour le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire.
- ARTELIA (2012a) *Devenir des sédiments clapés sur le site de la Lambarde et dossier Loi sur l'Eau*. Pour le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire.
- ARTELIA (2012b) *Etude relative à la gestion durable du trait de côte de la région des Pays de la Loire*. Pour la DREAL Pays de la Loire.
- Bijker, E.W., de Bruyn, C.A. (1988) *Erosion around a pile due to current and breaking waves*. Proc. 21<sup>st</sup> Int. Conf. Coastal Engng. Vol. 2, Malaga, Spain.
- Bolle, A., Haerens, P., Trouw, K., and Smits J. (IMDC), Dewaele, G. (C-Power N.V.) (2009) *Scour around gravity based-wind turbine foundations, prototype measurements*.
- BRGM (2008), Carte géologique de la France au 1/250 000 de la marge continentale (BRGM-CNRS) Lorient – Bretagne Sud.
- DNV (2010) *Offshore Standard OS-J101, Design of offshore wind turbine structures*.
- EMF (2013) Réunion de présentation du projet du 28 mars 2013. Support pour débat public.
- Froidefond, J.M., Doxaran, D., Miller, P. (2003) *Orientation 2. Acquisition et traitement d'images satellites*. Programme Int<sup>al</sup>. Loire Grandeur Nature. Loire Estuaire, cellule de mesures et bilans. DGO (UMR-EPOC) Talence, 173 p.
- Hoffmans, G.J.C.M., Verheij, H.J. (1997) *Scour Manual*, Rotterdam.
- Haddorp, R. (2005) *Predictability of scour at large piles due to waves and currents*, Delft University of Technology.
- HSE (1997) *Offshore technology Report – OTO 95955 – Technical review of subsea scour*.
- IMDC (2010) *Campagne de mesures de la Lambarde. Dépouillement des mesures au point fixe*. Pour le Grand Port Maritime de Nantes Saint-Nazaire
- Ifremer. Données de l'Ifremer – Cartes des isopaques des épaisseurs sédimentaires, package Ifremer pour l'implantation des parcs éoliens offshore
- In Vivo (Mai 2011) *Campagne de mesures géophysiques – Projet éolien offshore du banc de Guérande*. Pour EDF Energies Nouvelles.
- Katsui, H. and Toue, T. (1993) *Methodology of estimation of scouring around large-scale offshore structures*, Proc. 3<sup>rd</sup> Int. Offshore and Polar Eng. Conf, Vol I, p. 599-02
- LCHF (1987) *Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Côtes de la Manche et de l'Atlantique de la Baie de Mont Saint Michel à la frontière espagnole*.
- Offshore Center Danemark (2006) Offshore wind turbines situated in areas with strong currents (Contributions of Ramboll, DHI, Aalborg University, Vestas, A2SEA)*.

Rance, P.C. (1980) *The potential of scour around large objects* in Scour Prevention Techniques around Offshore Structures, Society of Underwater technology, Londres, p 41-53

SHOM (2012) *Ouvrage de marée, Références Altimétriques Maritimes, Ports de France métropolitaine et d'outre-mer, Cotes du zéro hydrographique et niveaux caractéristiques de la marée*, Edition 2012 (X027HY1)

Sumer B.M., Fredsoe, J. and Christiansen, N. (1992) *Scour around vertical piles in waves*. J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng., ASCE, vol 118(1), pp. 15-31.

Sumer, B.M. and Fredsoe, J., (2001) *Scour around a pile by combined wave and current*, J. Hydraulic Eng. ASCE, vol 127, p. 403-411.

Sumer, B.M., and Fredsoe, J. (2002) *The mechanics of scour in the marine environment*, Singapore.

Sumer B.M., and Fredsoe, J. (2006) *Hydrodynamics around cylindrical structures*, Revised Edition, Advanced Series on Ocean Engineering, vol. 26, World Scientific.

Tessier, C. (2006) *Caractérisation et dynamique des turbidités en zone côtière : l'exemple de la région marine Bretagne Sud*. Thèse de doctorat en océanographie, paléo-océanographie, Université Bordeaux I.

Vanney (1968) *Carte sédimentologique sous-marine "Saint-Nazaire"*

Whitehouse, R.J.S. (1998) *Scour at marine structures – A manual for practical applications*, Ed Thomas Telford

.  
.

## **ANNEXE A COORDONNEES ET PROFONDEUR D'IMPLANTATION DES EOLIENNES**

Référence éolienne	Profondeur* (m ZH)	X (WGS 84 UTM 30N)	Y (WGS 84 UTM 30N)
Area 1 - t1	-23.13	533952.53	5218706.88
Area 1 - t2	-19.42	522836.63	5221584.34
Area 1 - t3	-24.07	526505.37	5220631.86
Area 1 - t4	-24.66	527441.06	5220388.94
Area 1 - t5	-22.05	533056.50	5218931.06
Area 1 - t6	-21.32	531191.30	5219415.31
Area 1 - t7	-21.53	523739.05	5221350.05
Area 1 - t8	-23.19	525576.87	5220872.92
Area 1 - t9	-23.63	528382.56	5220144.51
Area 1 - t10	-22.29	532116.02	5219175.23
Area 1 - t11	-22.57	530268.62	5219654.85
Area 1 - t12	-21.54	524654.95	5221112.27
Area 1 - t13	-23.62	529330.06	5219898.52
Area 2 - t14	-20.18	532834.41	5220013.32
Area 2 - t15	-22.04	528232.97	5221314.24
Area 2 - t16	-21.54	529254.82	5220984.04
Area 2 - t17	-21.67	526141.00	5221926.92
Area 2 - t18	-21.38	530301.77	5220708.36
Area 2 - t19	-17.85	524110.63	5222521.55
Area 2 - t20	-23.35	527185.04	5221621.15
Area 2 - t21	-19.21	534907.64	5219448.97
Area 2 - t22	-20.06	525114.60	5222227.52
Area 2 - t23	-19.93	523135.09	5222807.26
Area 2 - t24	-20.48	531496.36	5220370.36
Area 3 - t25	-19.52	525792.83	5223223.25
Area 3 - t26	-16.63	533533.50	5220776.74
Area 3 - t27	-18.25	534616.48	5220486.89
Area 3 - t28	-20.91	529491.84	5221987.68
Area 3 - t29	-17.72	523440.41	5224009.03
Area 3 - t30	-19.38	526981.30	5222826.27
Area 3 - t31	-20.56	528195.29	5222420.76
Area 3 - t32	-16.53	524601.65	5223621.14
Area 3 - t33	-19.07	530906.76	5221515.06
Area 3 - t34	-20.55	532261.98	5221127.10
Area 3 - t35	-17.55	535833.10	5220169.78
Area 4 - t36	-14.90	534241.94	5221629.05
Area 4 - t37	-16.70	535501.48	5221306.95
Area 4 - t38	-11.62	524735.77	5224840.23
Area 4 - t39	-17.16	526871.22	5224060.45
Area 4 - t40	-18.82	529212.53	5223180.84
Area 4 - t41	-19.26	528005.61	5223628.21
Area 4 - t42	-16.79	523721.71	5225216.11
Area 4 - t43	-21.02	533012.34	5221943.50
Area 4 - t44	-16.16	525792.83	5224448.41
Area 4 - t45	-14.31	536850.11	5220962.06
Area 4 - t46	-19.23	530483.79	5222709.63
Area 4 - t47	-18.55	531751.57	5222265.93
Area 5 - t48	-17.50	532178.62	5224178.79
Area 5 - t49	-15.39	536960.75	5221929.98
Area 5 - t50	-16.44	537275.18	5222805.67
Area 5 - t51	-20.24	532487.06	5225117.02
Area 5 - t52	-13.60	525459.51	5225833.76
Area 5 - t53	-16.82	534948.67	5222447.91
Area 5 - t54	-16.08	527782.97	5224891.68

Area 5 - t55	-18.92	529612.54	5224154.74
Area 5 - t56	-15.07	523436.98	5227639.42
Area 5 - t57	-14.07	536021.06	5222171.87
Area 5 - t58	-16.79	533759.31	5222754.07
Area 5 - t59	-15.11	525720.51	5228426.23
Area 5 - t60	-14.58	523629.10	5226576.31
Area 5 - t61	-14.13	525443.38	5226918.97
Area 5 - t62	-16.63	533367.14	5223771.68
Area 5 - t63	-20.62	533424.44	5224783.44
Area 5 - t64	-14.33	537922.62	5221797.39
Area 5 - t65	-18.86	532566.52	5223061.11
Area 5 - t66	-18.80	530521.80	5223788.49
Area 5 - t67	-22.32	534407.93	5224433.44
Area 5 - t68	-19.40	531469.09	5223395.81
Area 5 - t69	-18.63	528704.58	5224520.46
Area 5 - t70	-15.62	527214.14	5225695.99
Area 5 - t71	-14.00	526199.36	5227550.93
Area 5 - t72	-19.72	536727.66	5223607.91
Area 5 - t73	-14.26	526700.02	5226635.75
Area 5 - t74	-14.55	526339.09	5225476.94
Area 5 - t75	-12.94	524785.32	5228104.00
Area 5 - t76	-13.35	524547.91	5226203.57
Area 5 - t77	-14.15	524396.50	5227256.18
Area 5 - t78	-16.52	534575.37	5223429.99
Area 5 - t79	-21.39	535465.02	5224057.25
Area 5 - t80	-17.77	535829.86	5223148.55

\*Les profondeurs sont les profondeurs aux centres des éoliennes dans le modèle numérique hydrodynamique construit à partir de la bathymétrie des fonds fournie par le client.

## **ANNEXE B** FIGURES CHAPITRE 1

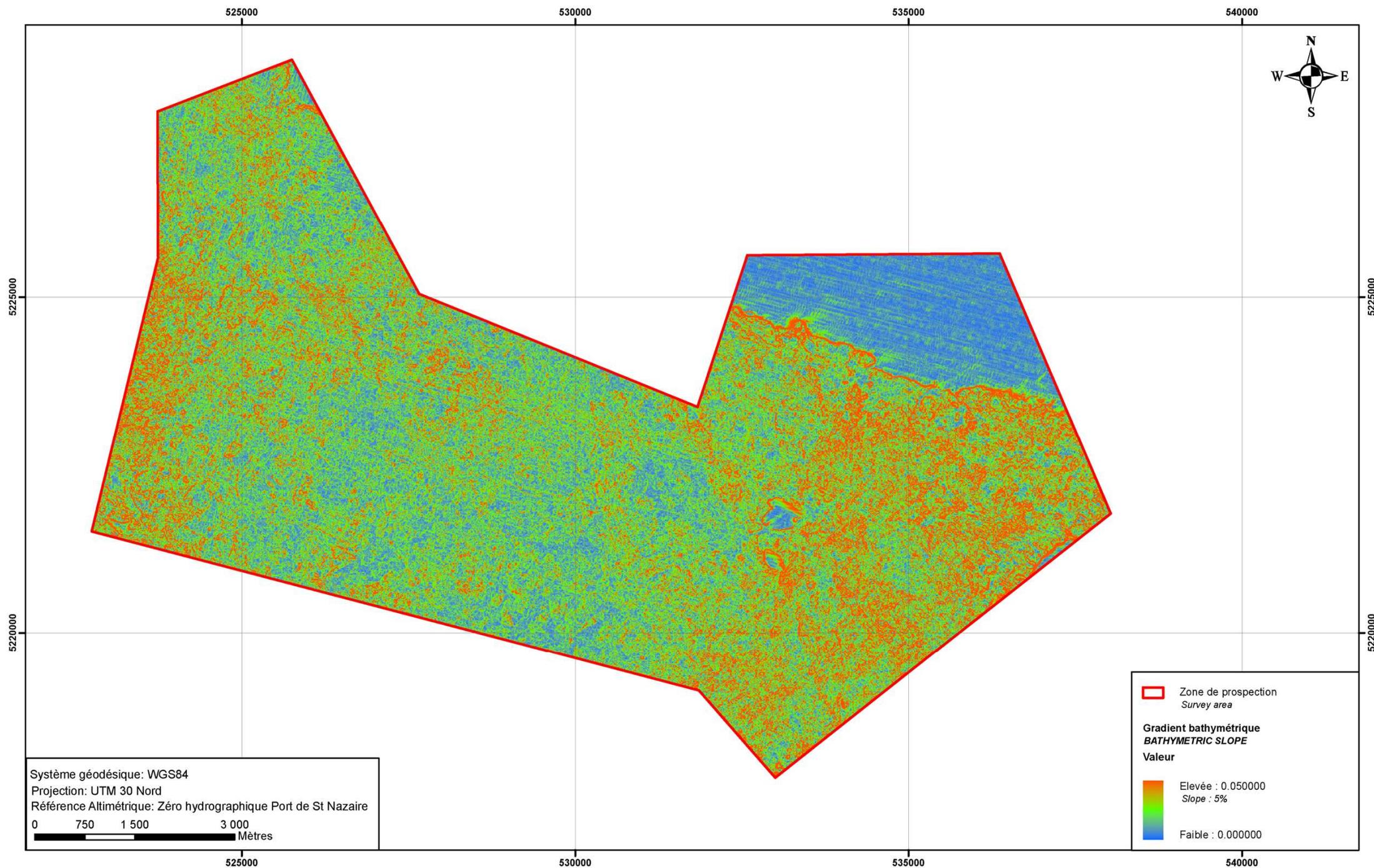
---

# Parc Eolien du Banc du Guérande

**Lot : hydrodynamisme – hydrosédimentaire**

**Annexe B : Figures Chapitre 1  
Fondations monopieu (diamètre 7 m)**





**ANNEXE C**  
**FIGURES CHAPITRE 2 – CARTES DES**  
**COURANTS (MODELISATION**  
**HYDRODYNAMIQUE)**

---

# Parc Eolien du Banc de Guérande

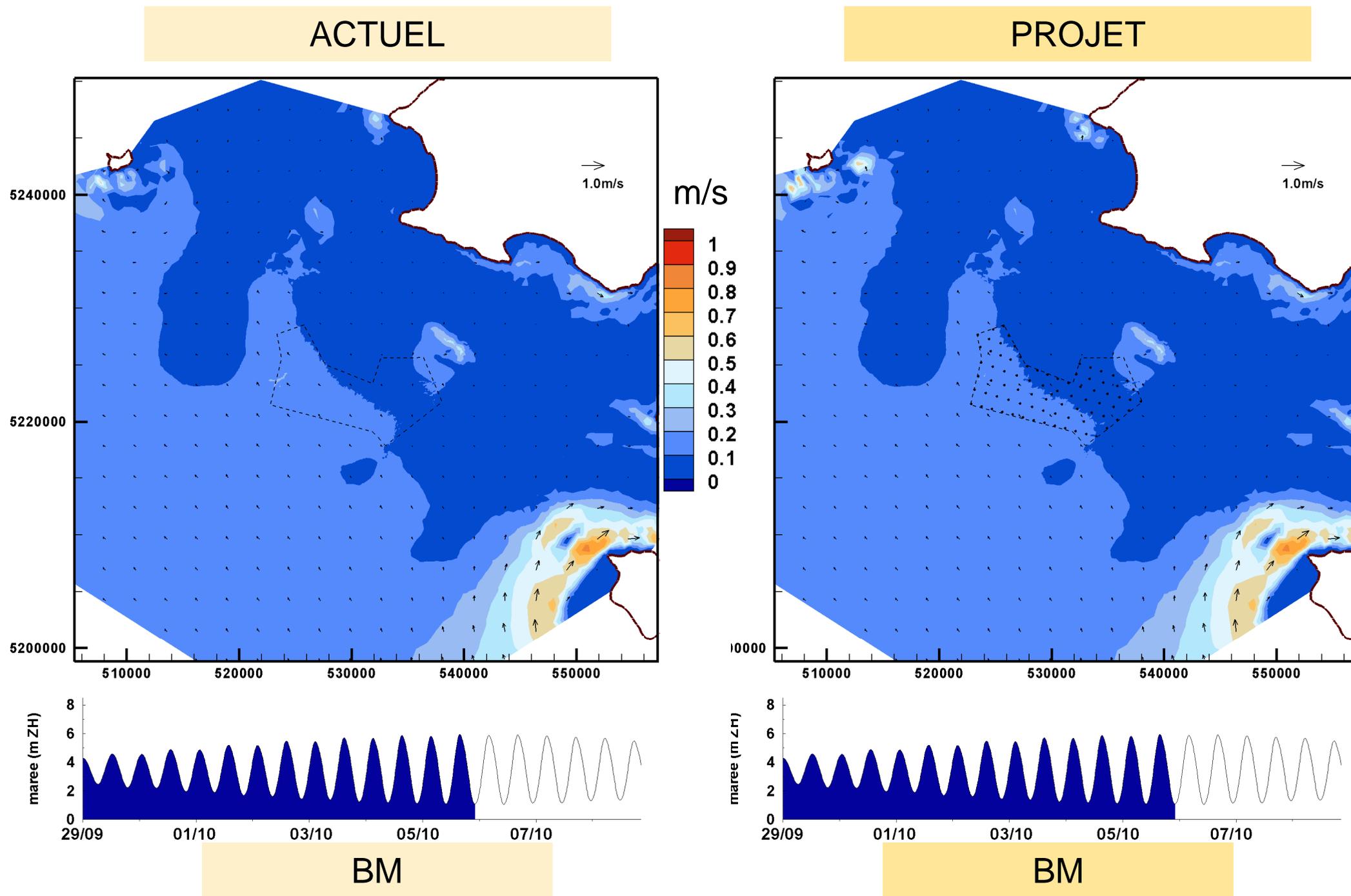
**Lot Hydrodynamisme - hydrosédimentaire**

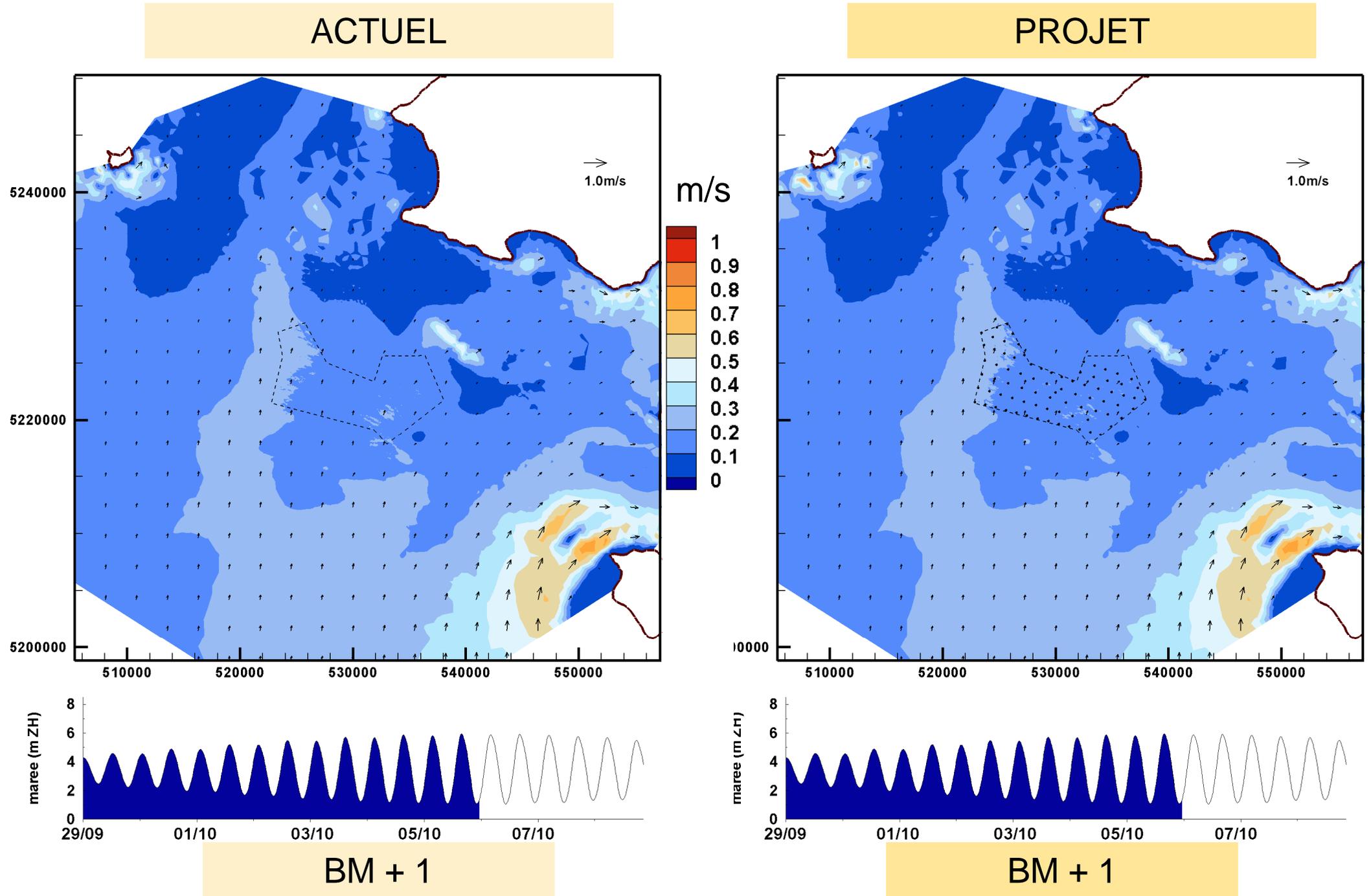
**Annexe C : Cartes de courant  
Fondations monopieu (diamètre 7 m)**

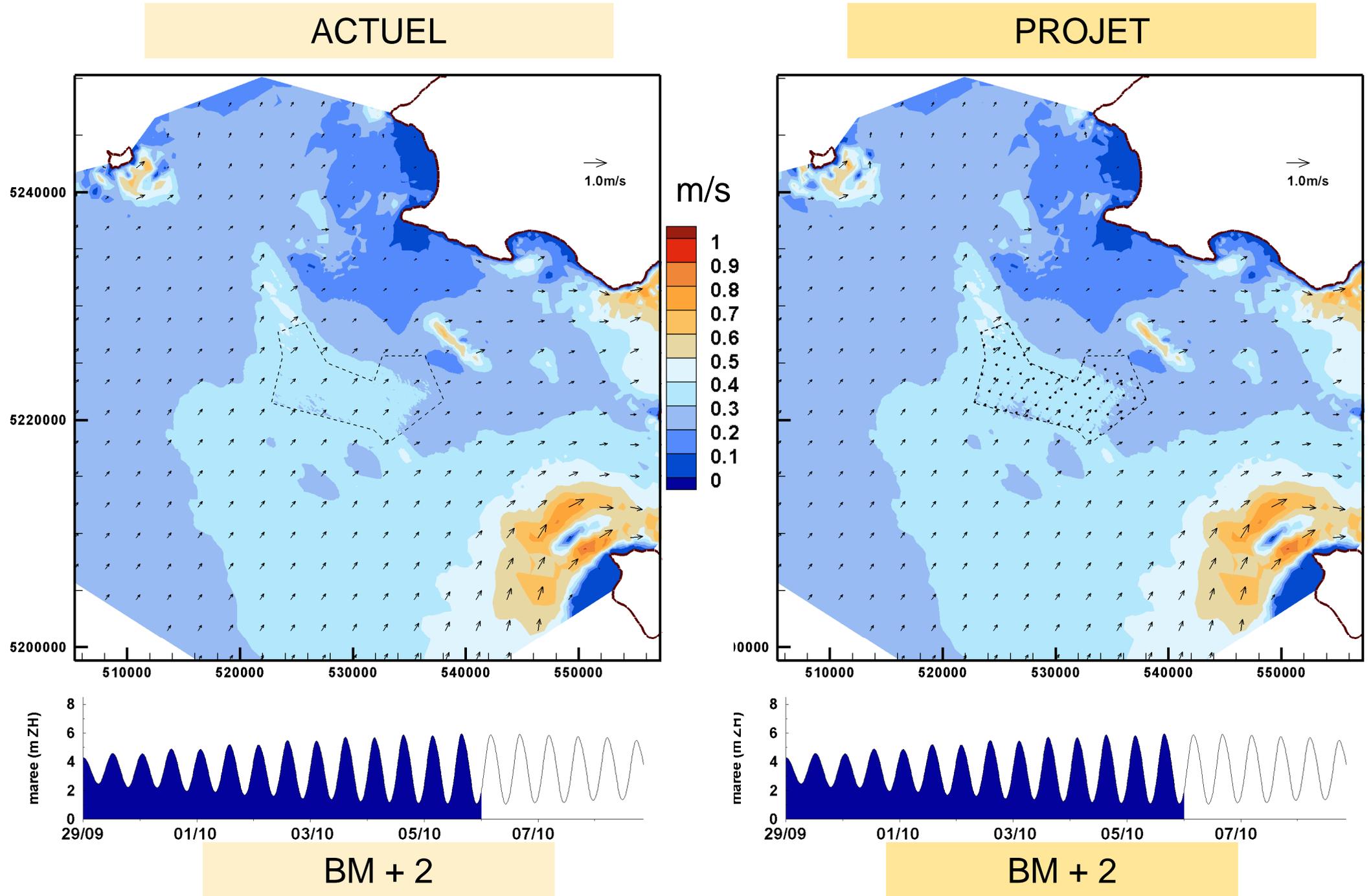


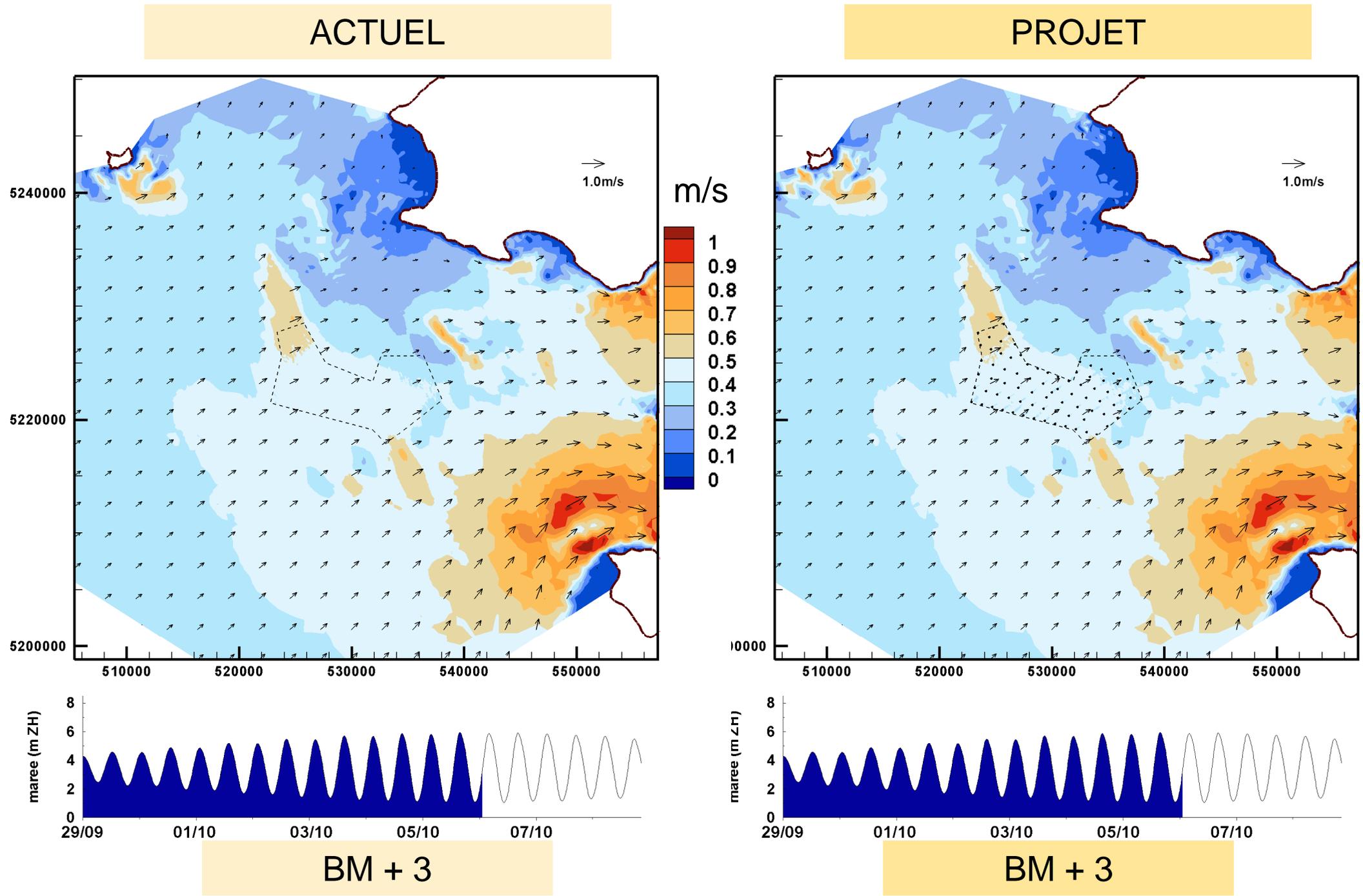
---

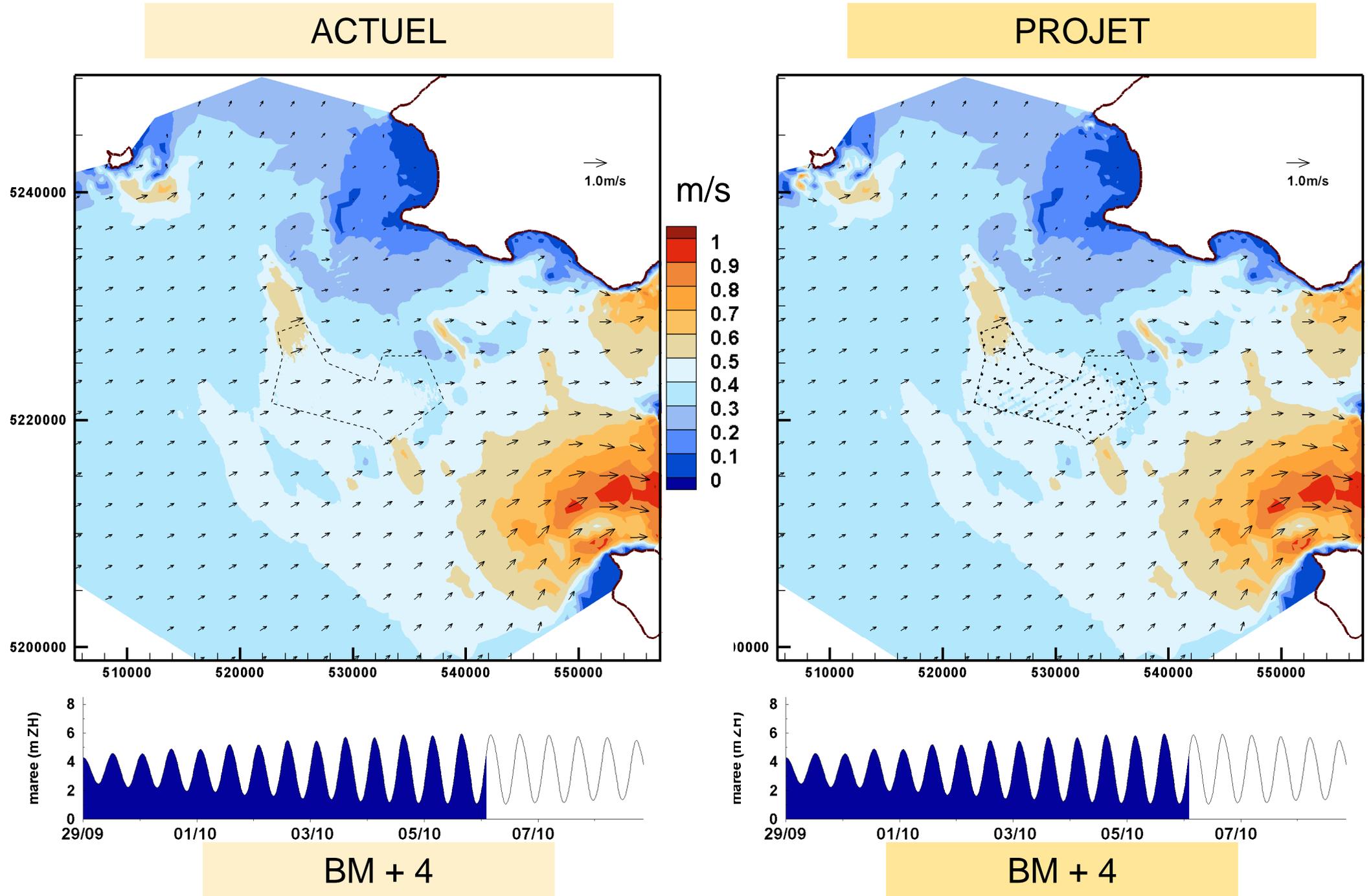
**CHAMPS DE COURANTS HEURE PAR HEURE POUR UNE MARÉE DE VIVES-  
EAUX DE COEFFICIENT 93  
ÉTAT ACTUEL ET ÉTAT AMÉNAGÉ  
VUE A L'ECHELLE DE LA ZONE D'ÉTUDE**

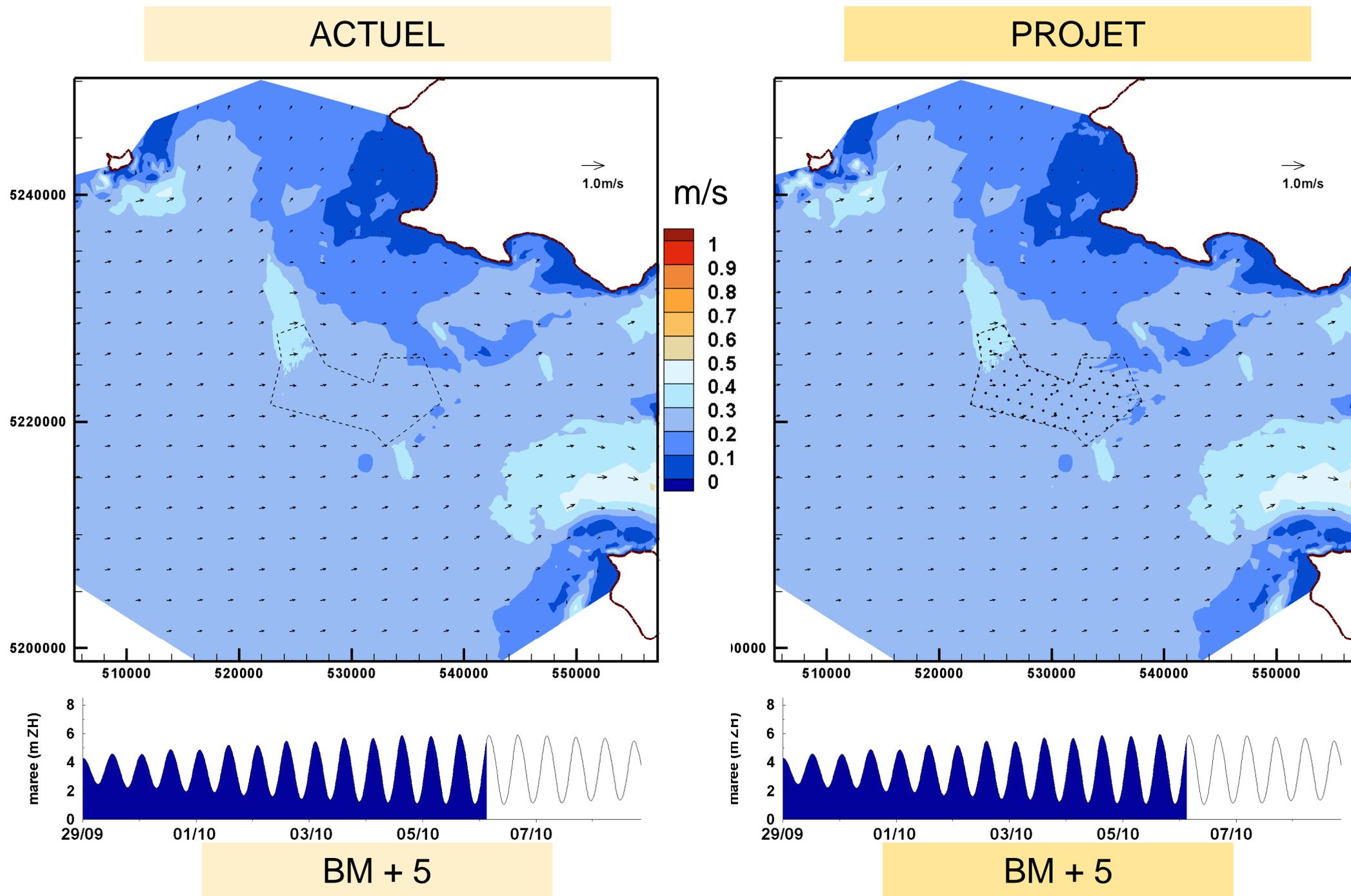


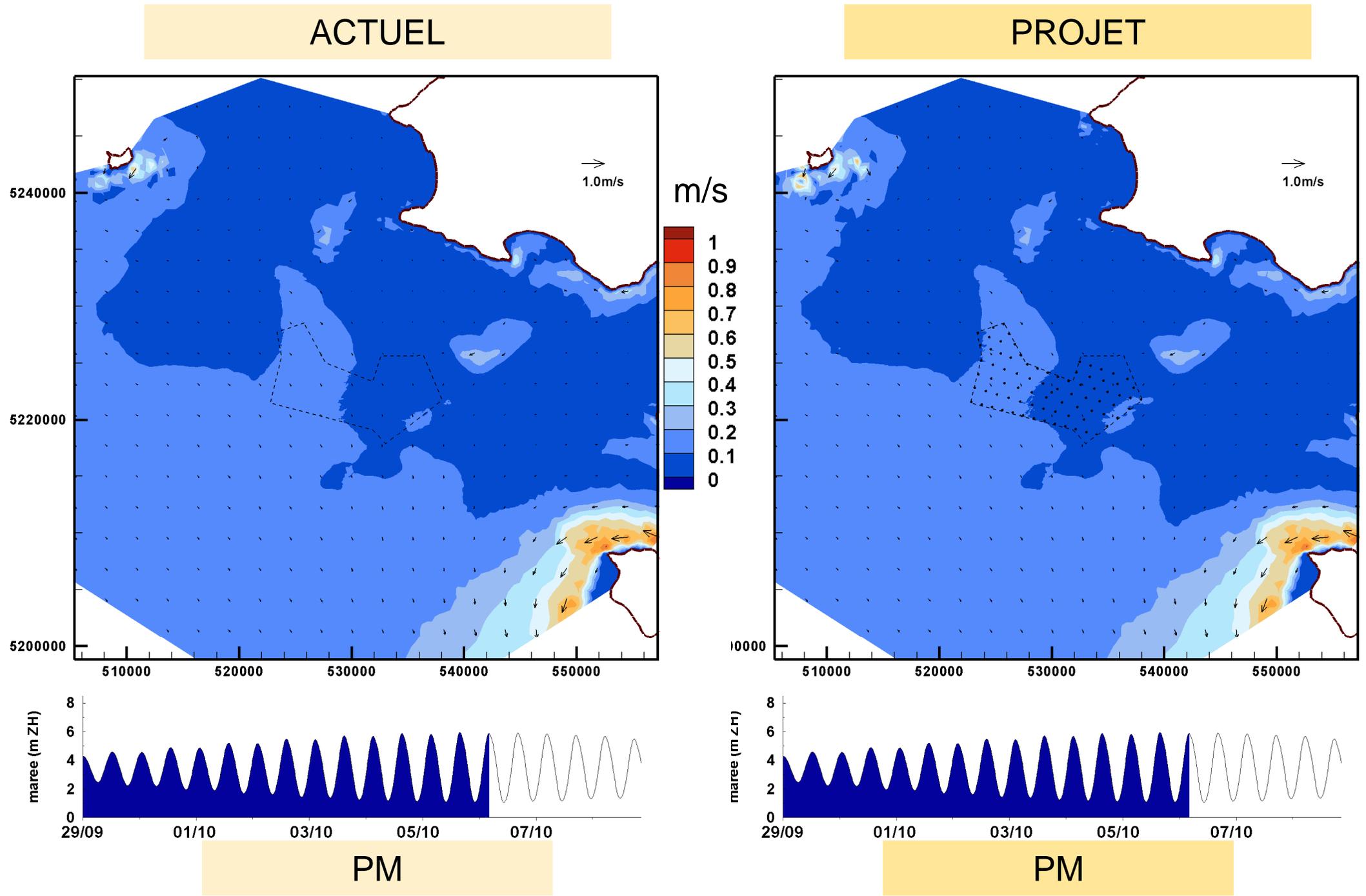


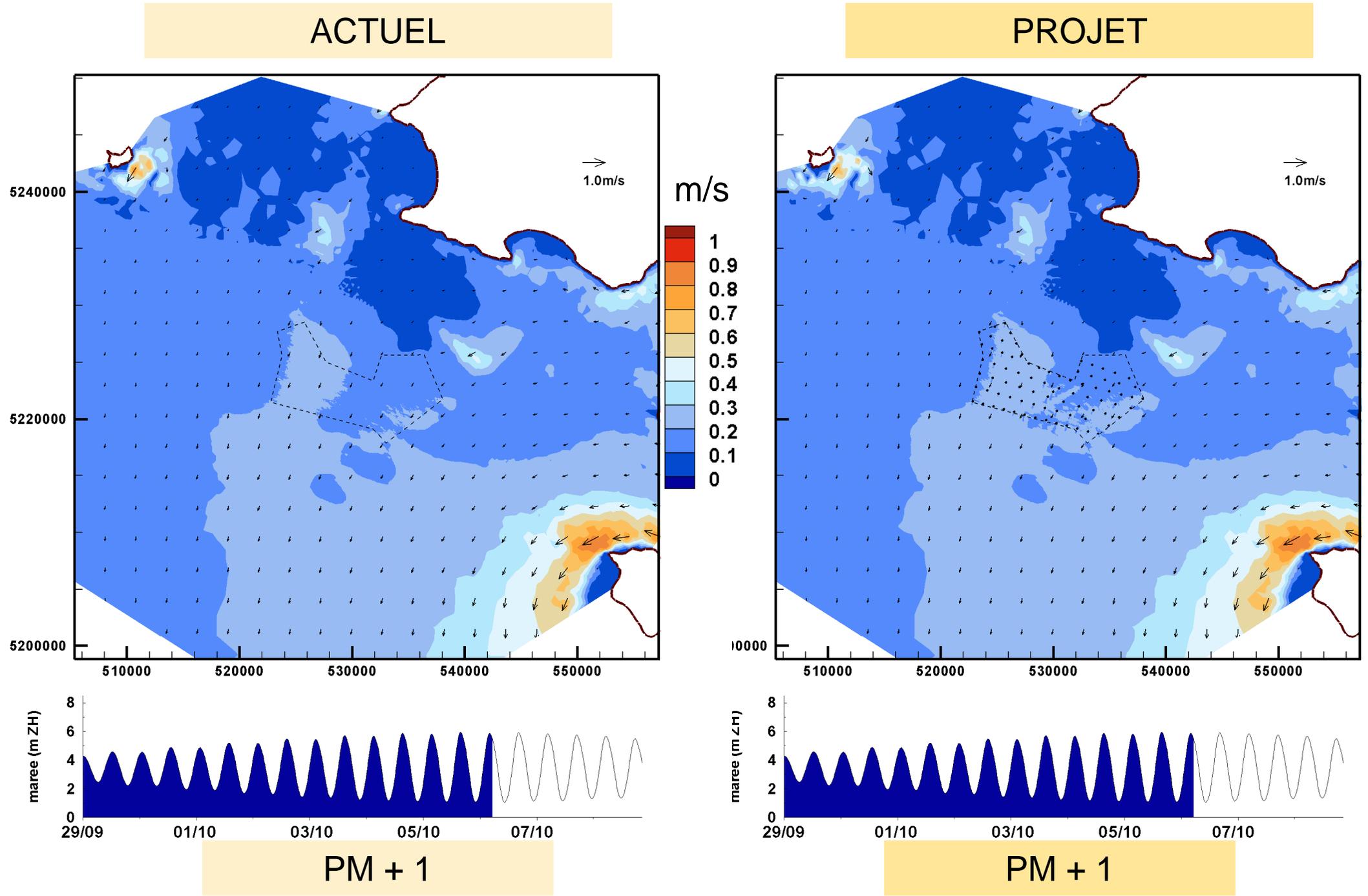


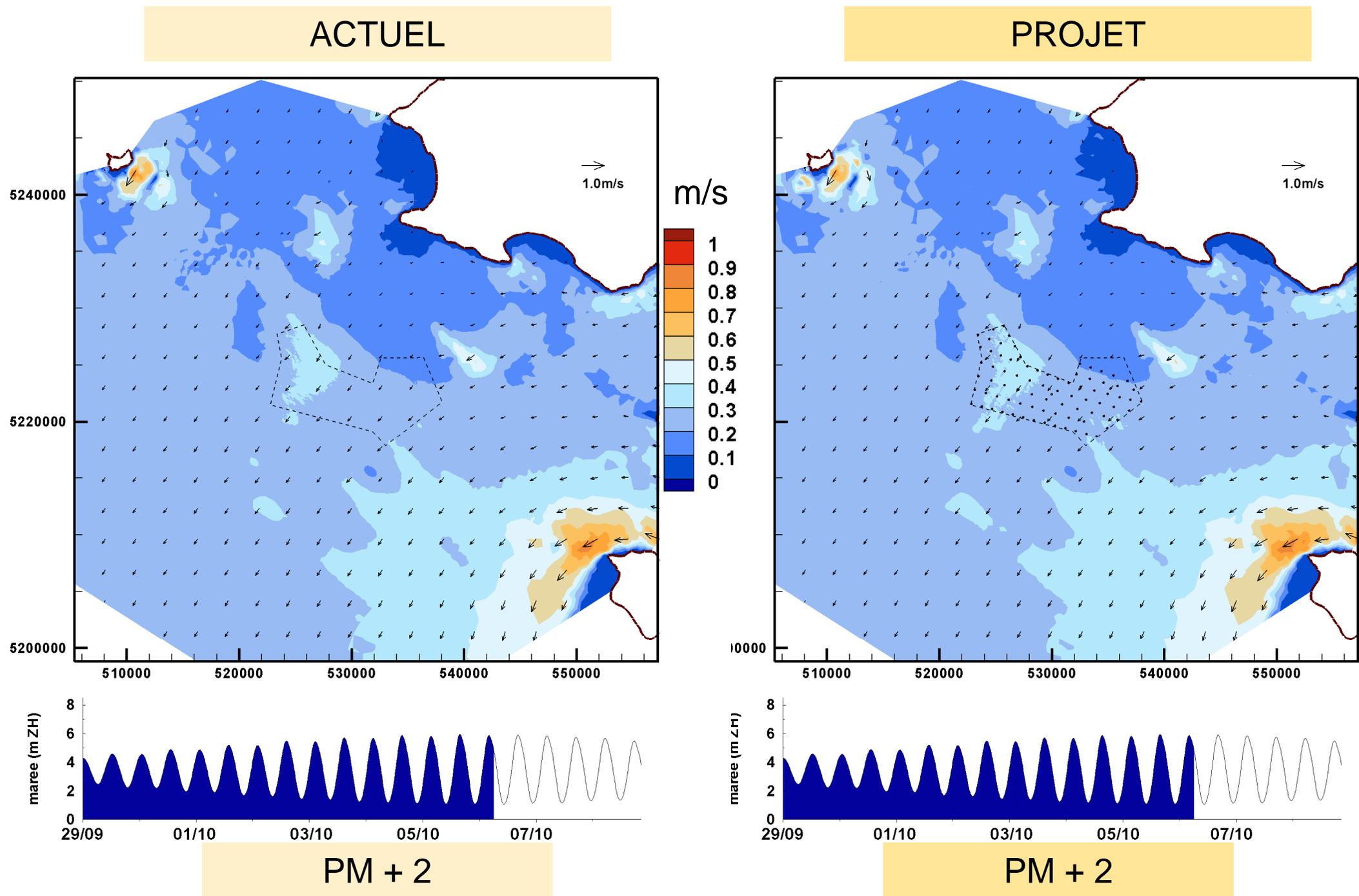


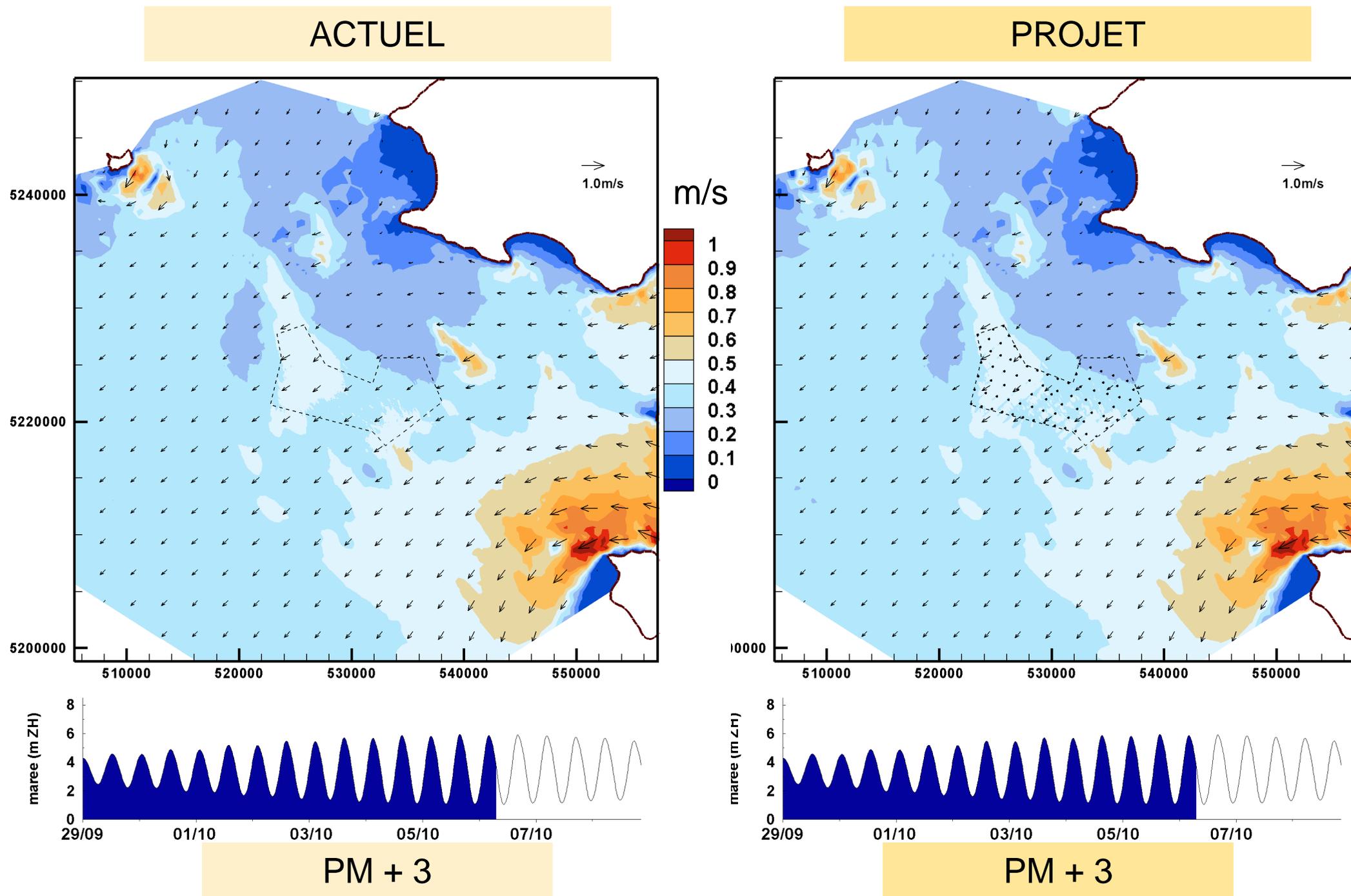


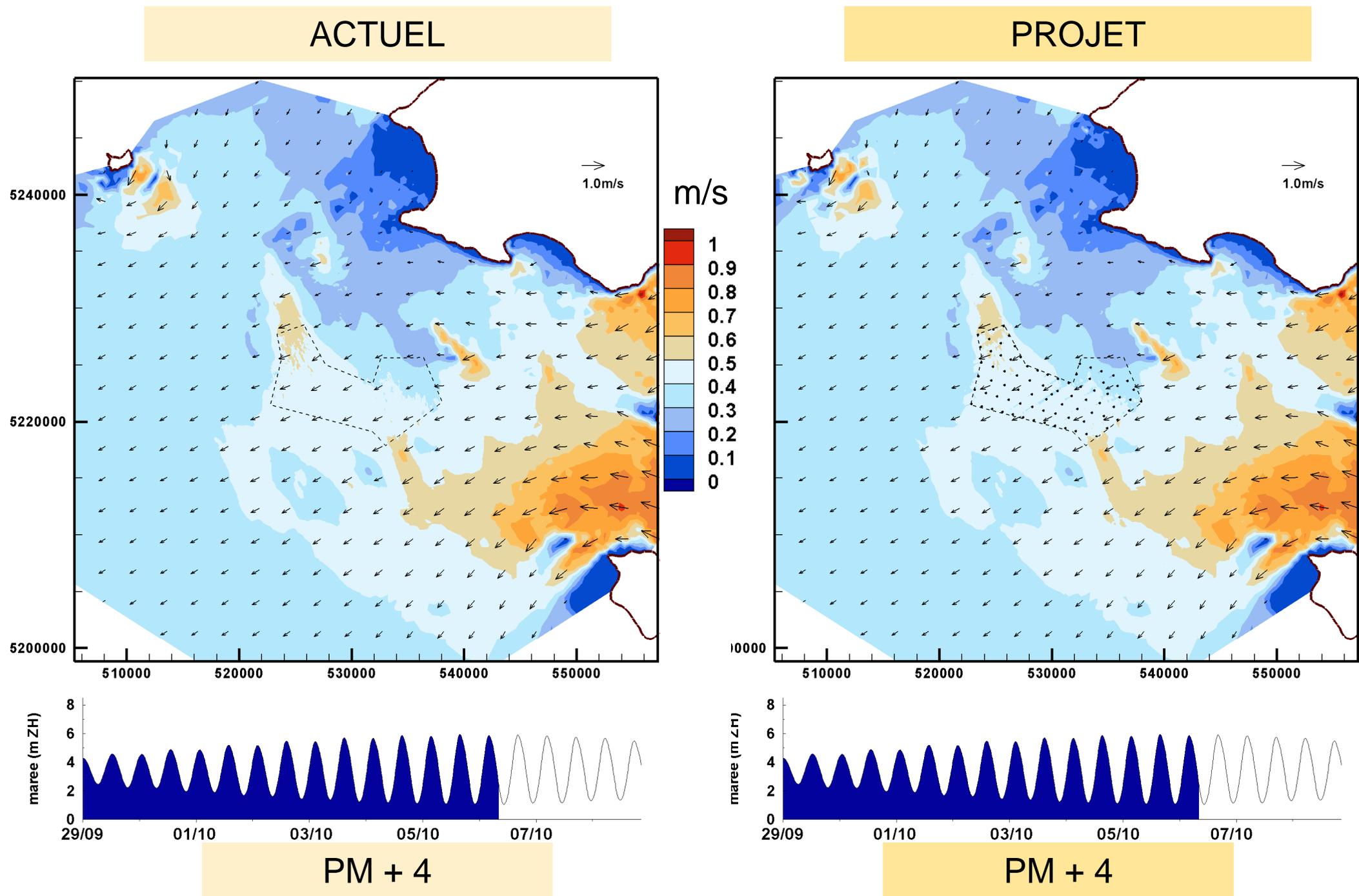


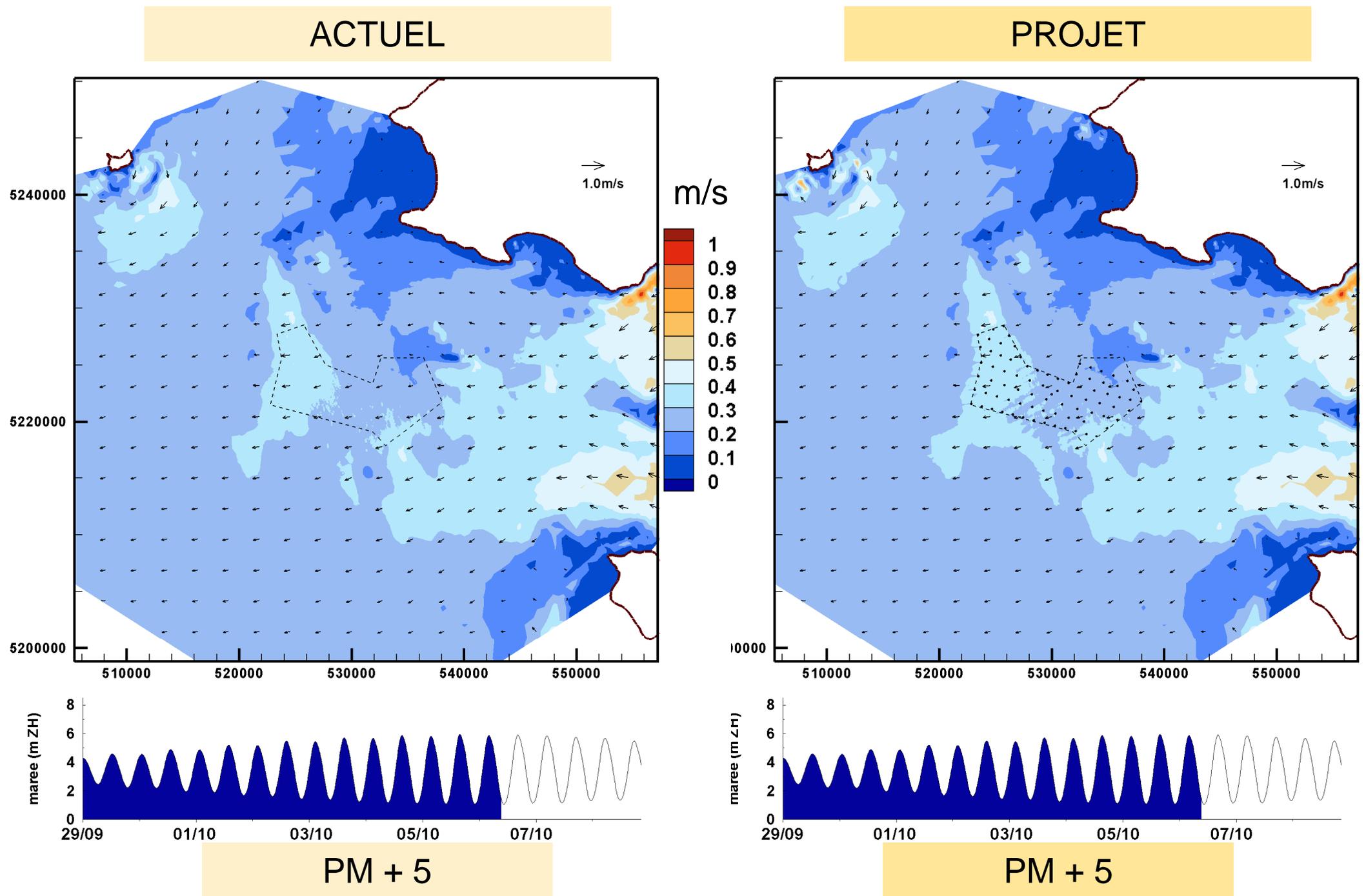










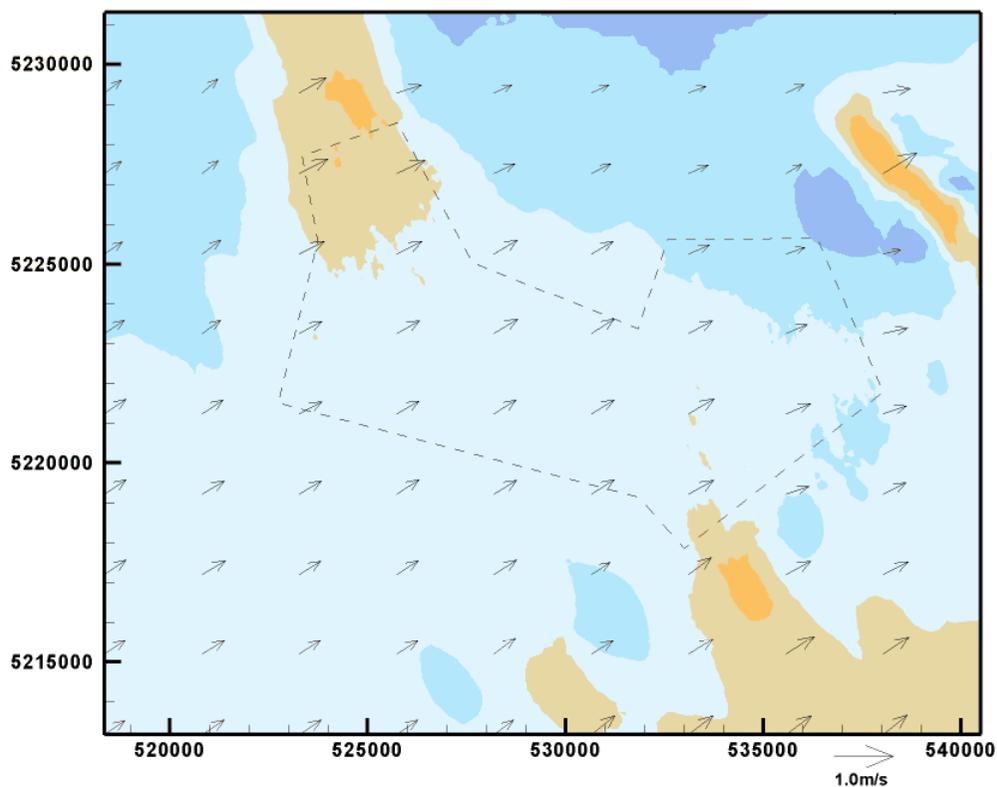


---

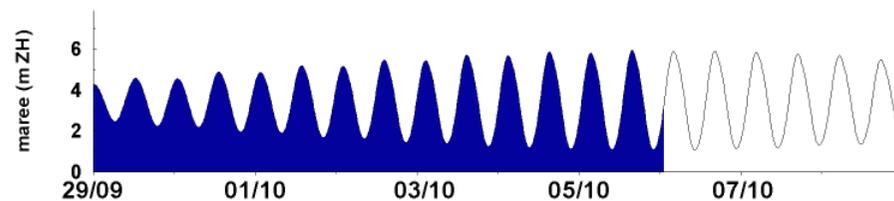
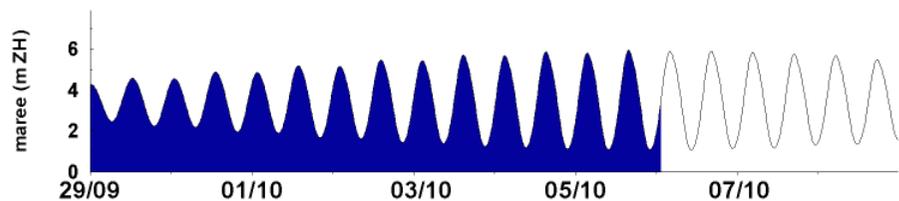
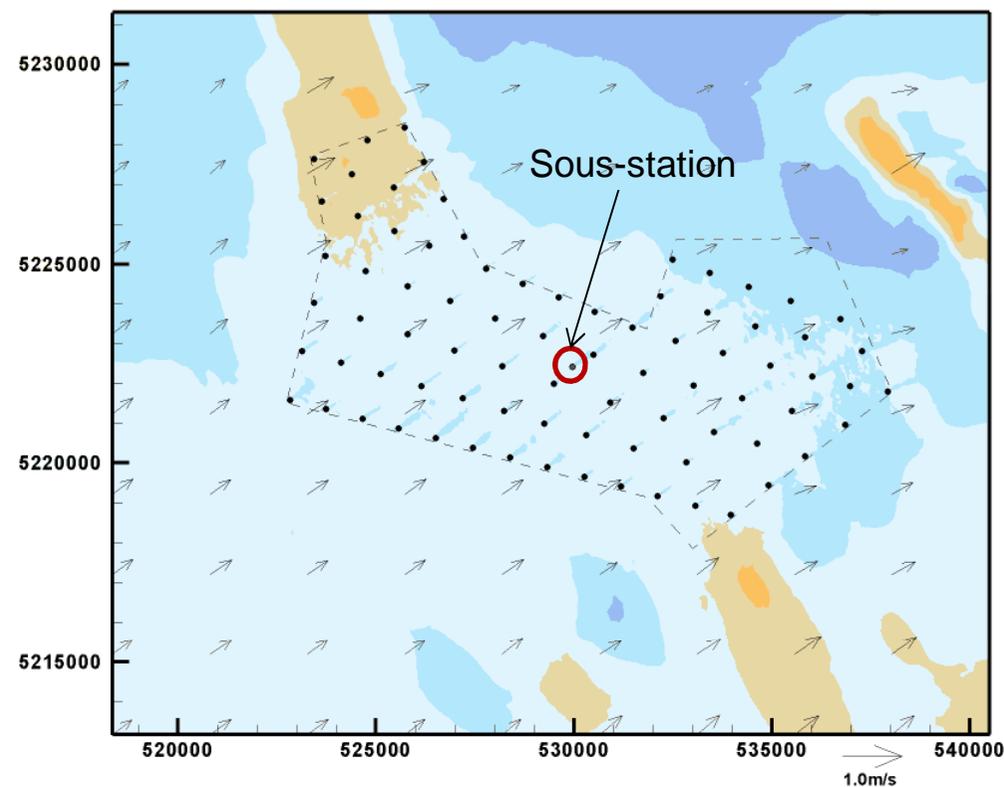
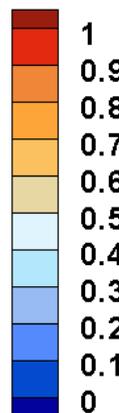
**CHAMPS DE COURANT AUX PICS DE FLOT ET DE JUSANT POUR UNE  
MARÉE DE VIVES-EAUX DE COEFFICIENT 93  
ETAT ACTUEL ET ETAT AMÉNAGÉ**

ACTUEL

PROJET



m/s

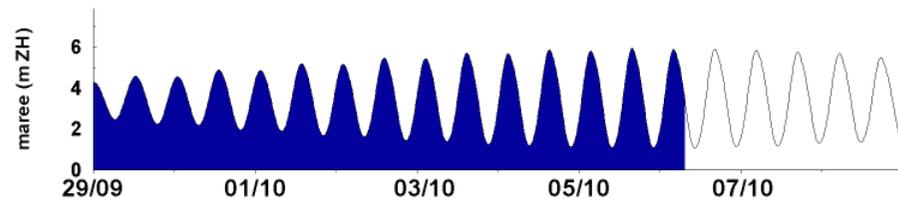
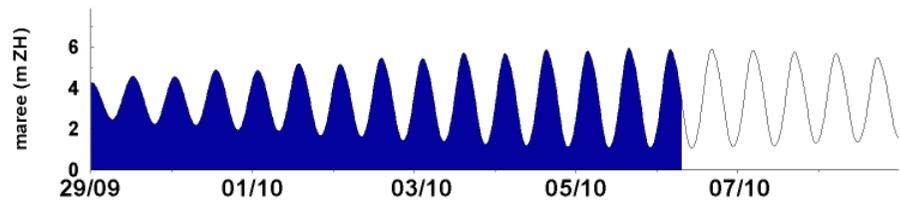
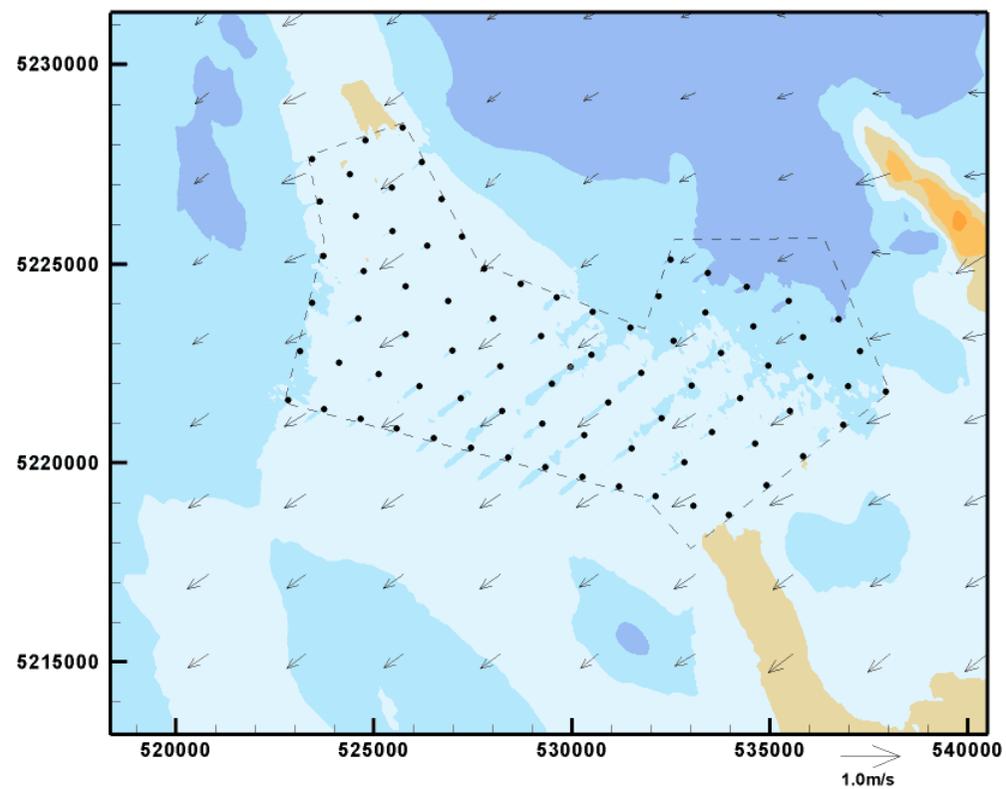
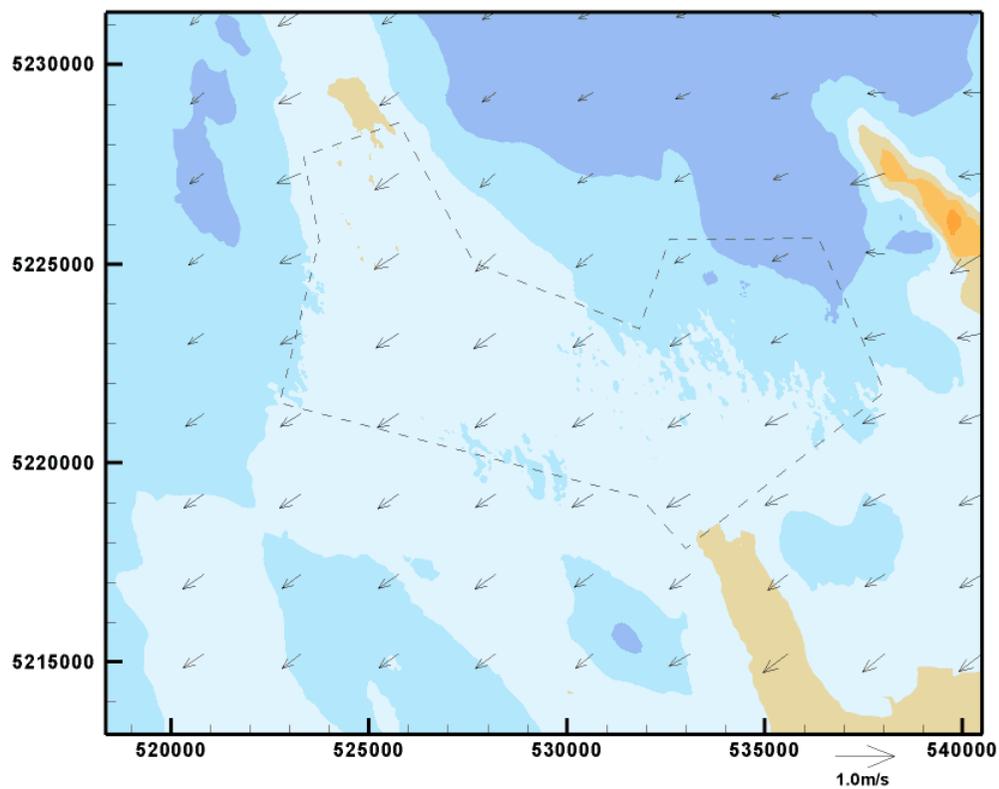


BM+3

BM+3

ACTUEL

PROJET



PM+3

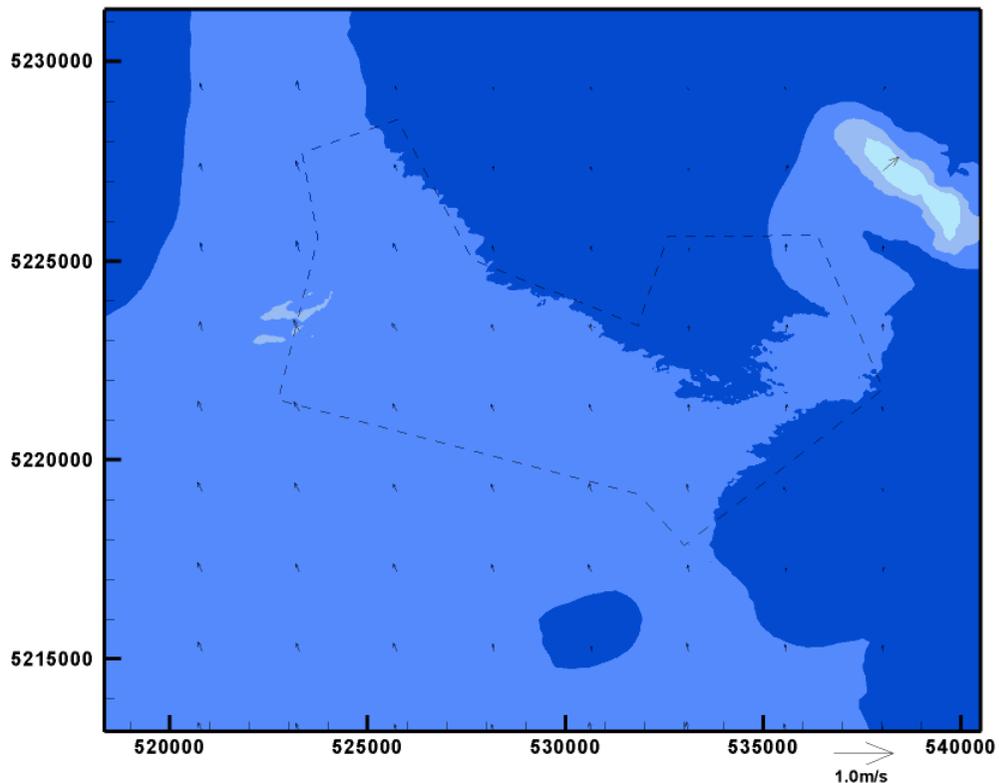
PM+3

---

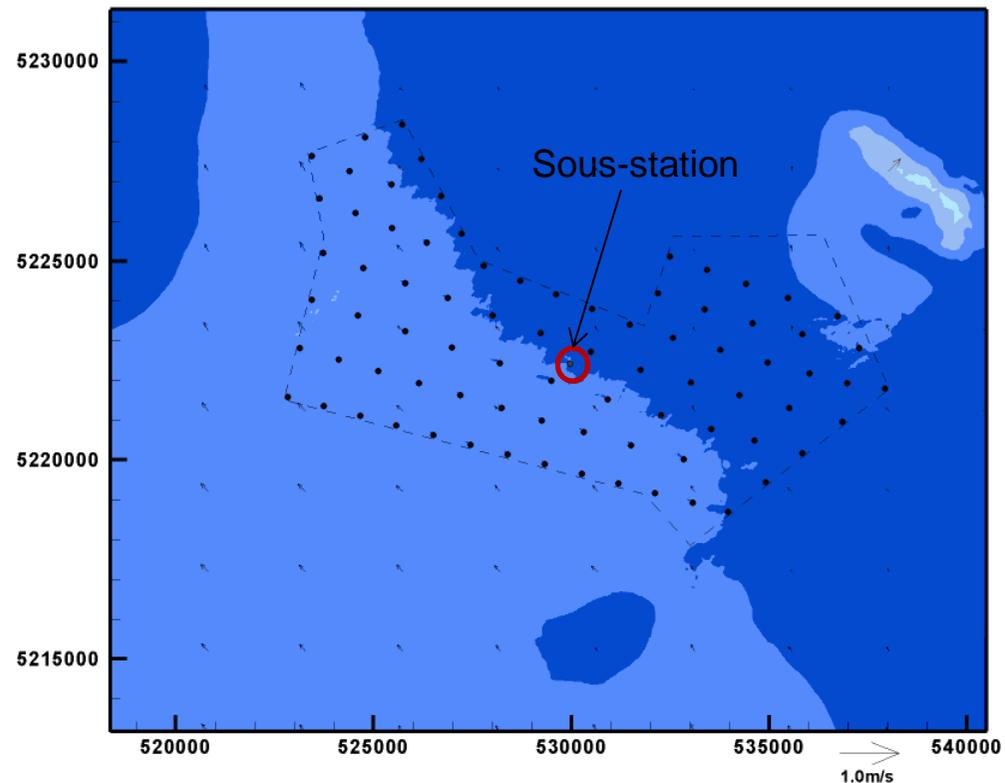
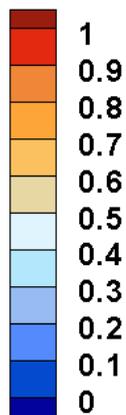
**CHAMPS DE COURANT HEURE PAR HEURE POUR UNE MARÉE DE VIVES-  
EAUX DE COEFFICIENT 93  
ETAT ACTUEL ET ETAT AMÉNAGÉ  
VUE À L'ÉCHELLE DU PARC**

ACTUEL

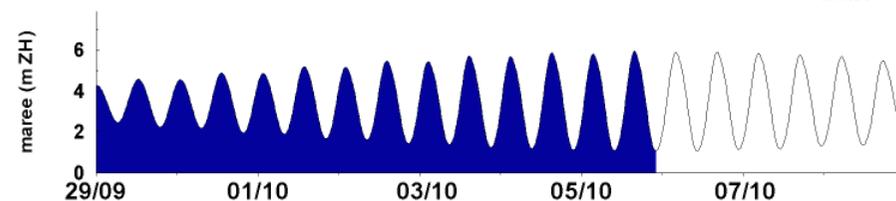
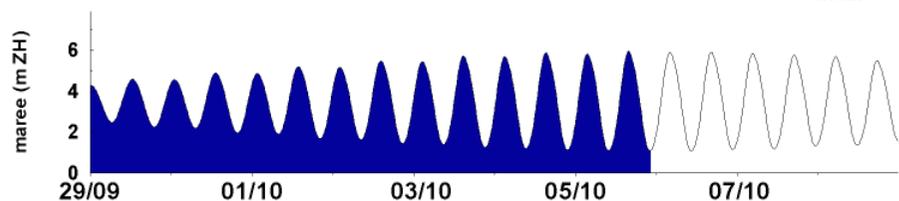
PROJET



m/s



Sous-station

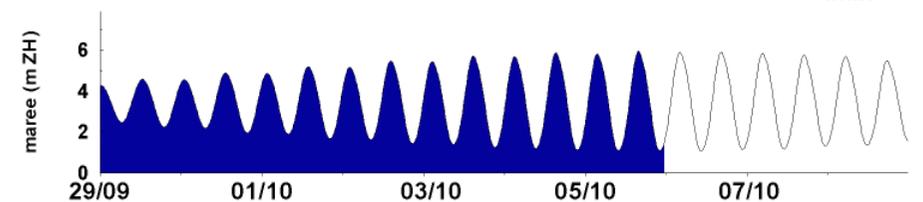
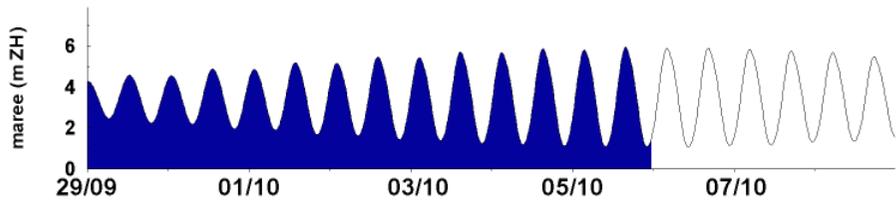
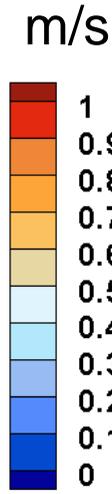
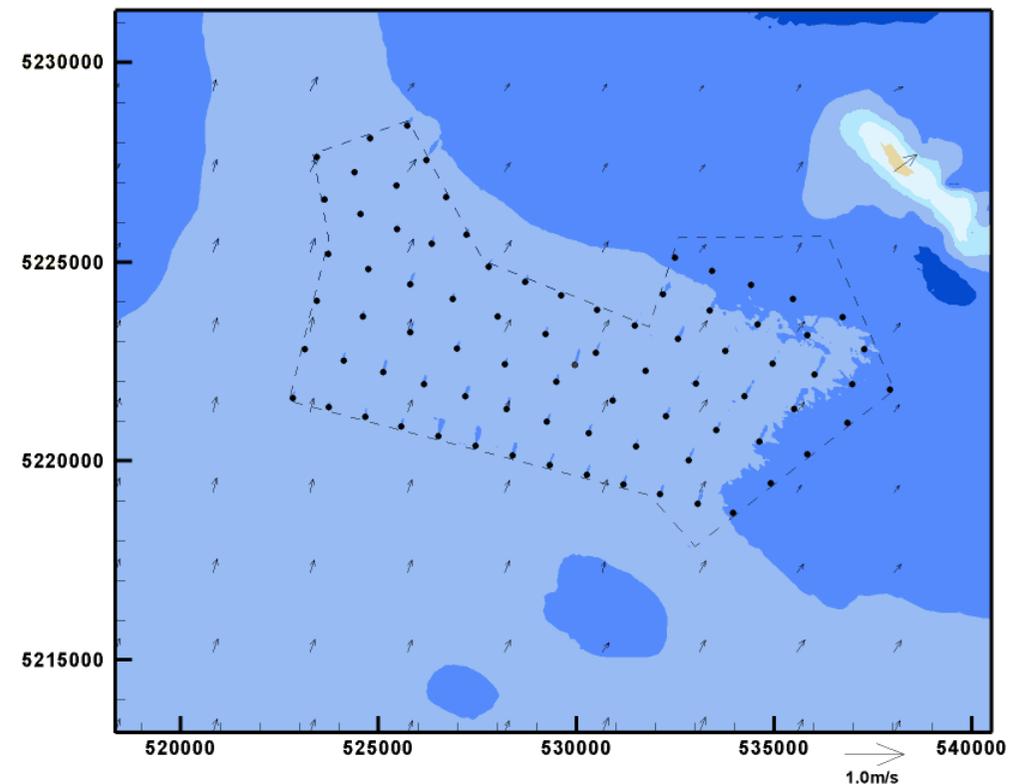
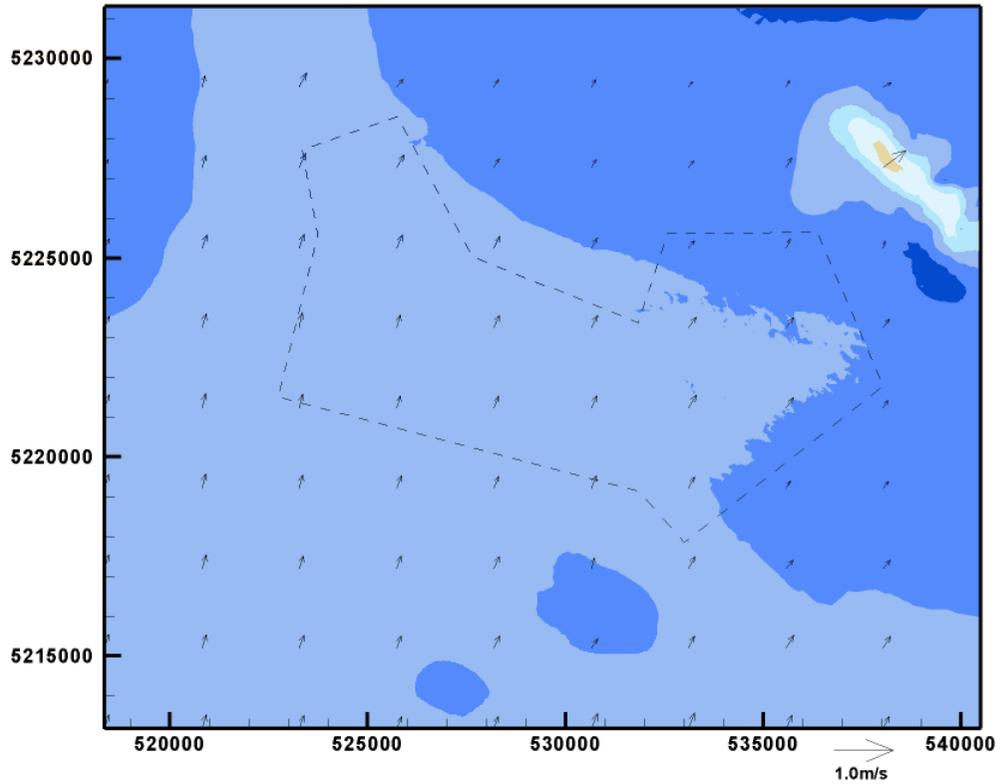


BM

BM

ACTUEL

PROJET

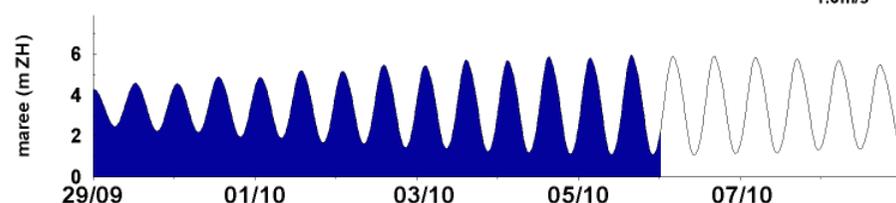
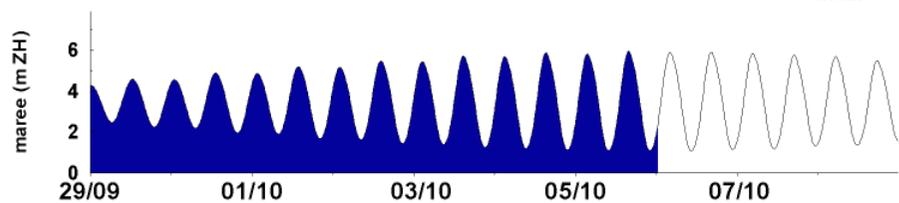
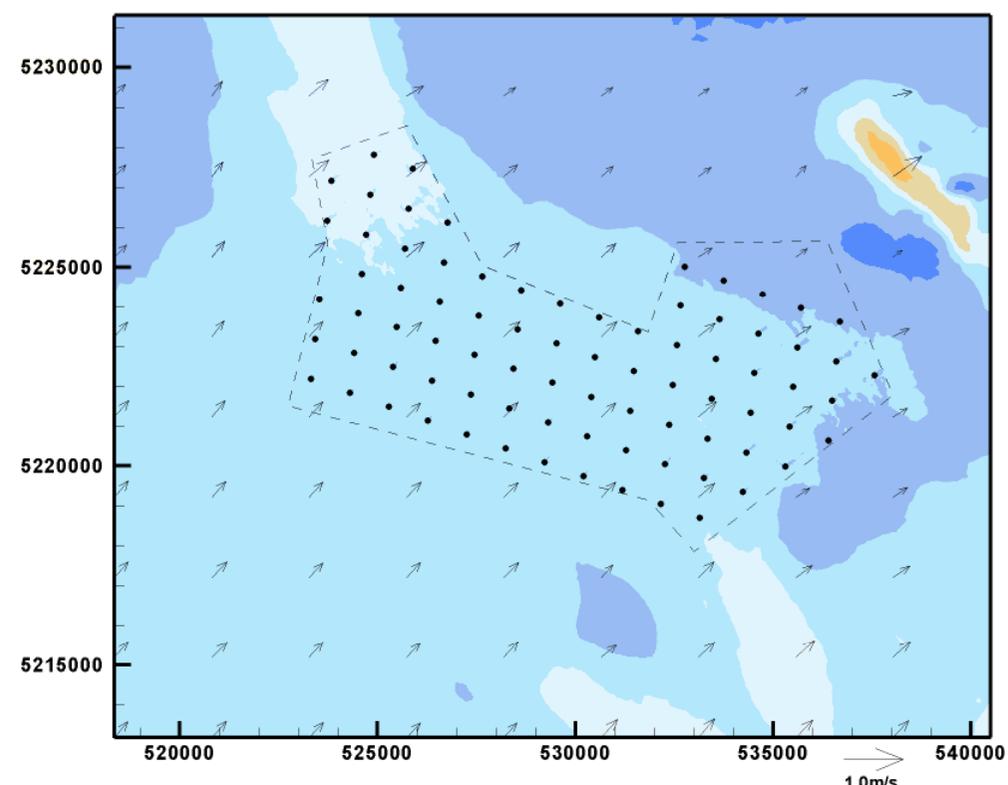
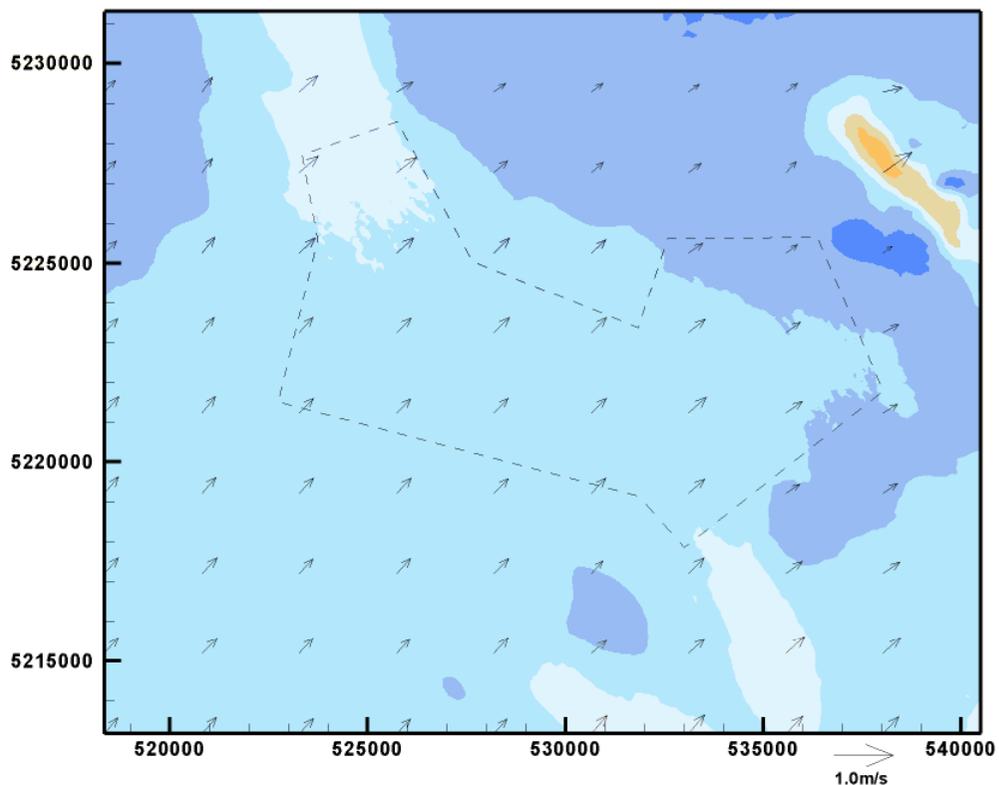


BM + 1

BM + 1

ACTUEL

PROJET

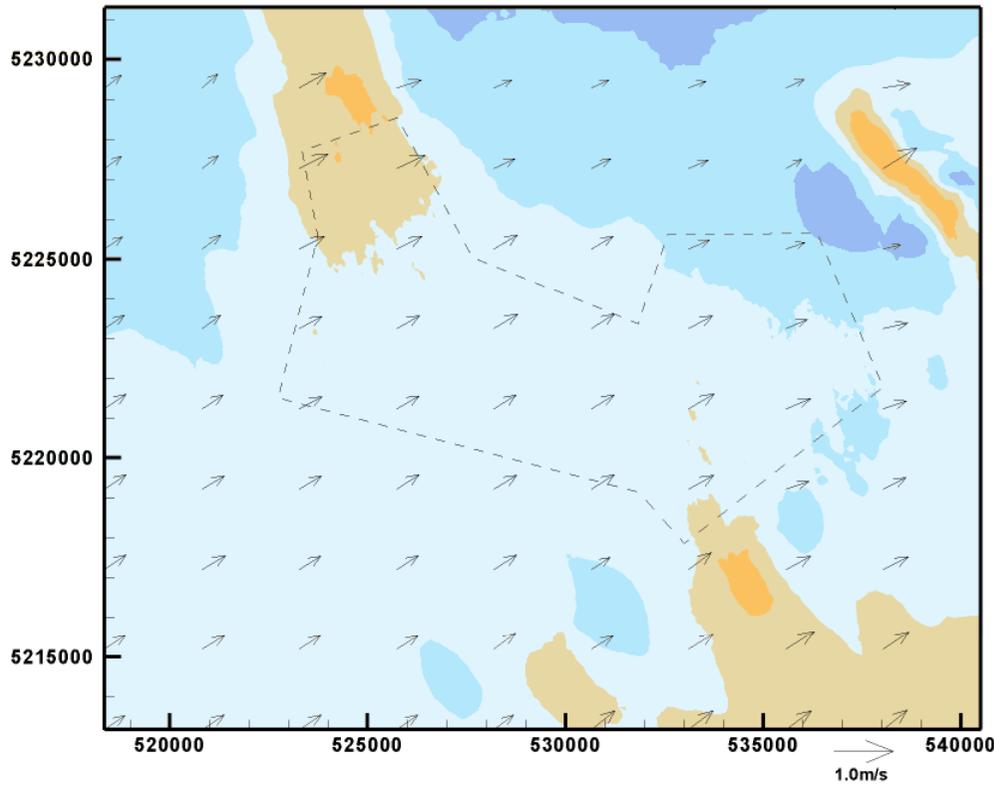


BM + 2

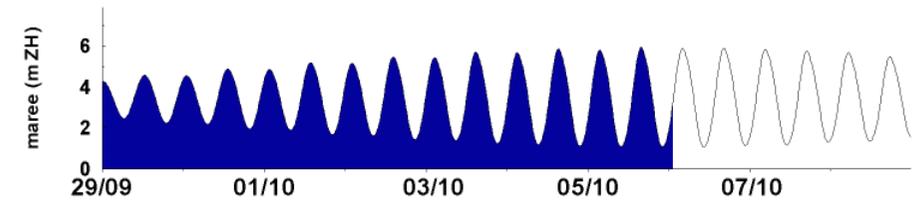
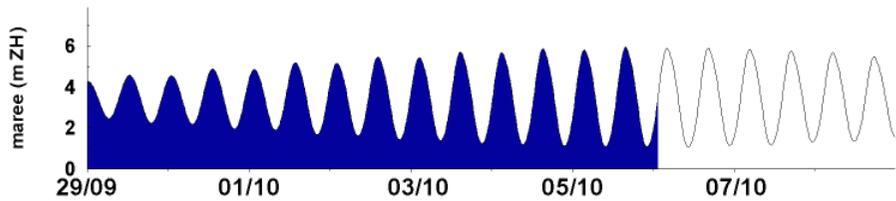
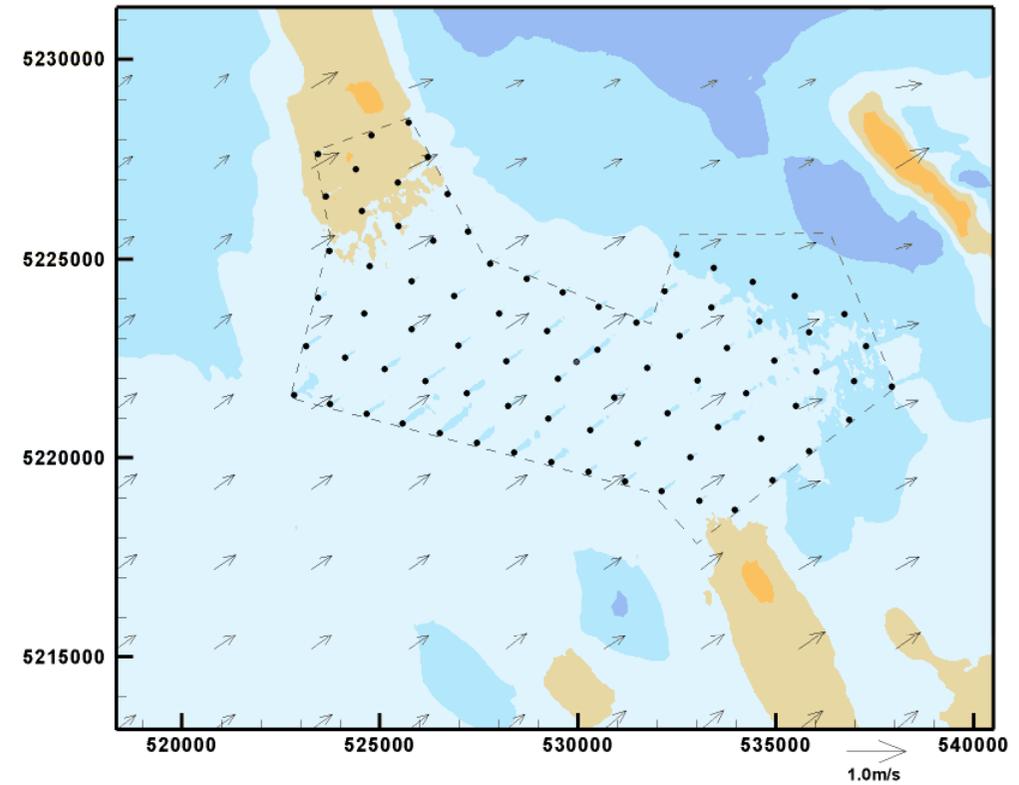
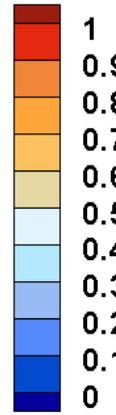
BM + 2

ACTUEL

PROJET



m/s

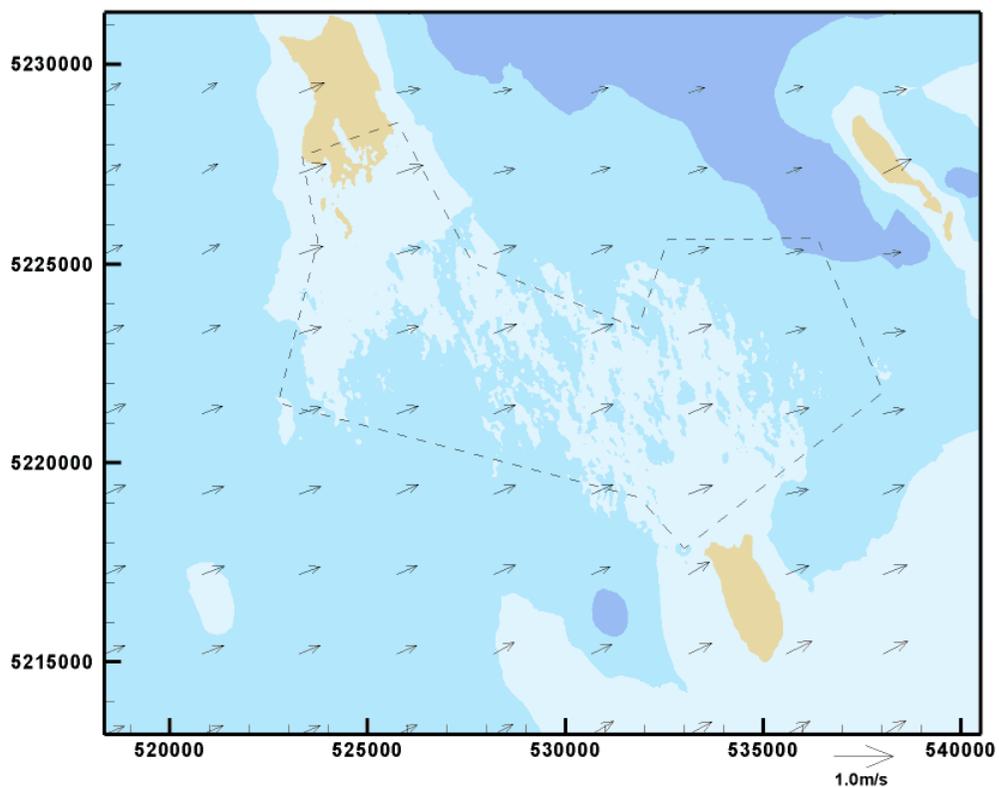


BM + 3

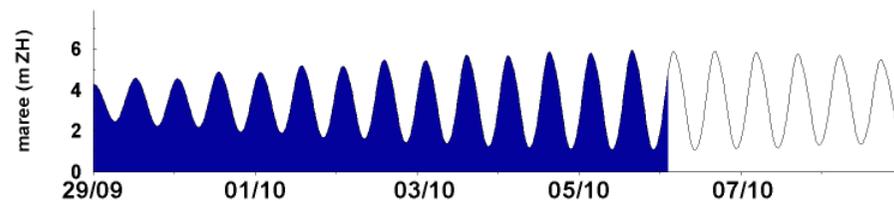
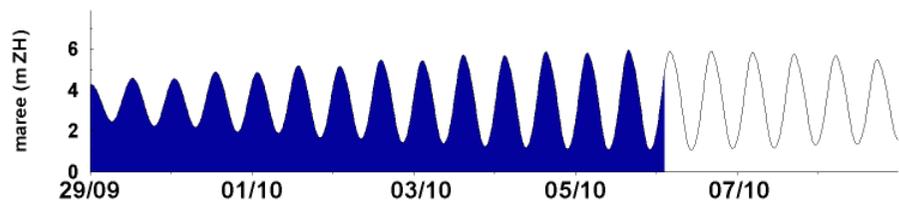
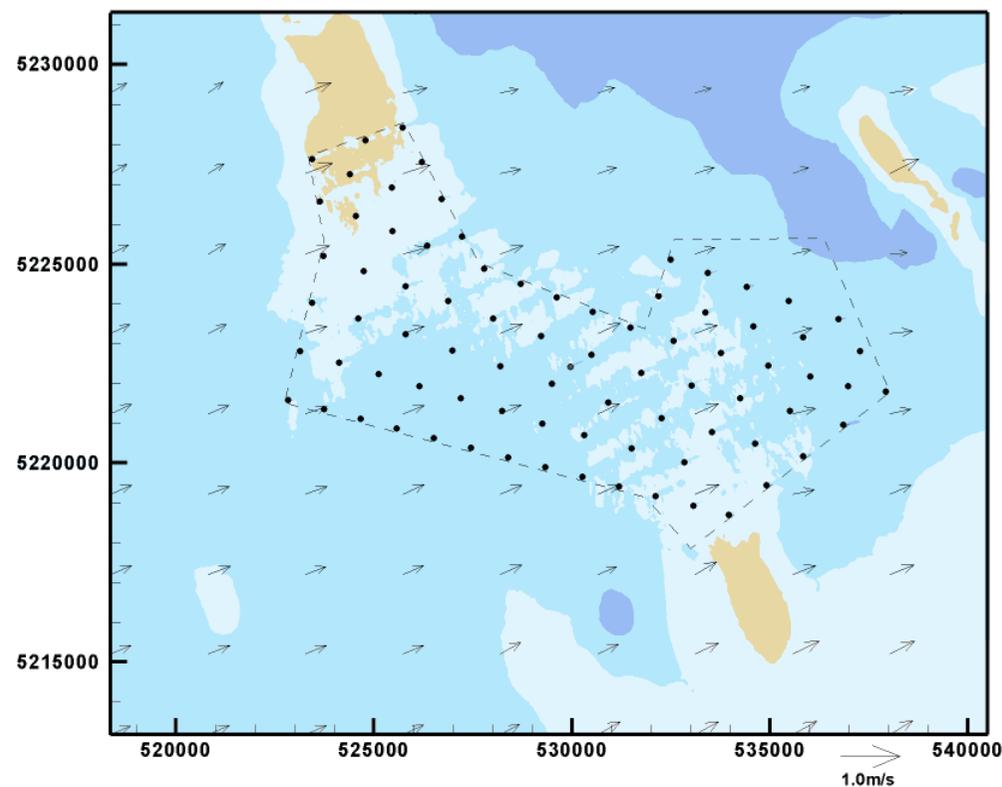
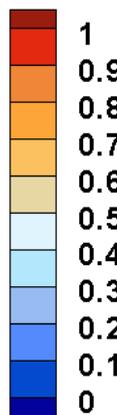
BM + 3

ACTUEL

PROJET



m/s

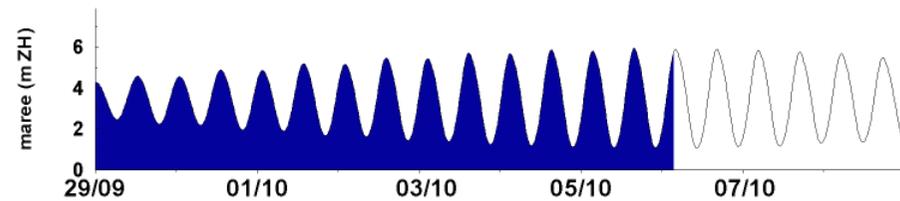
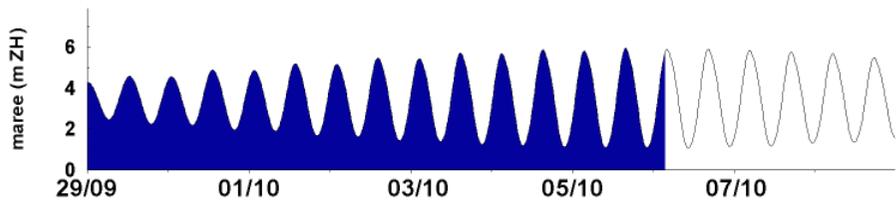
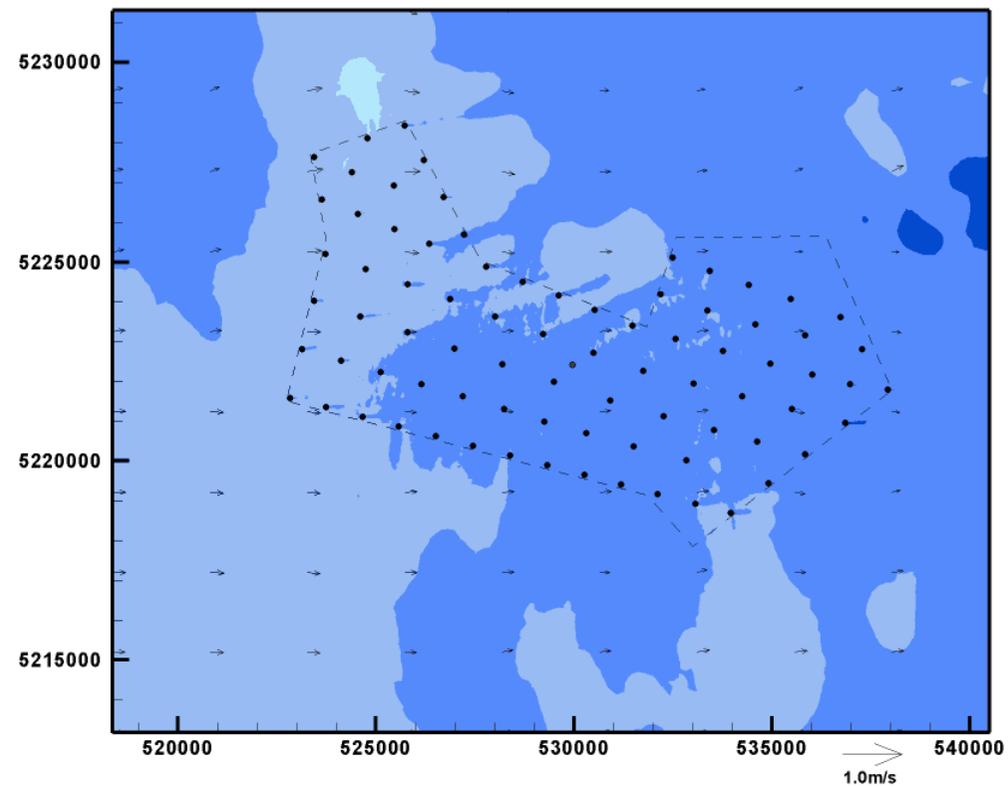
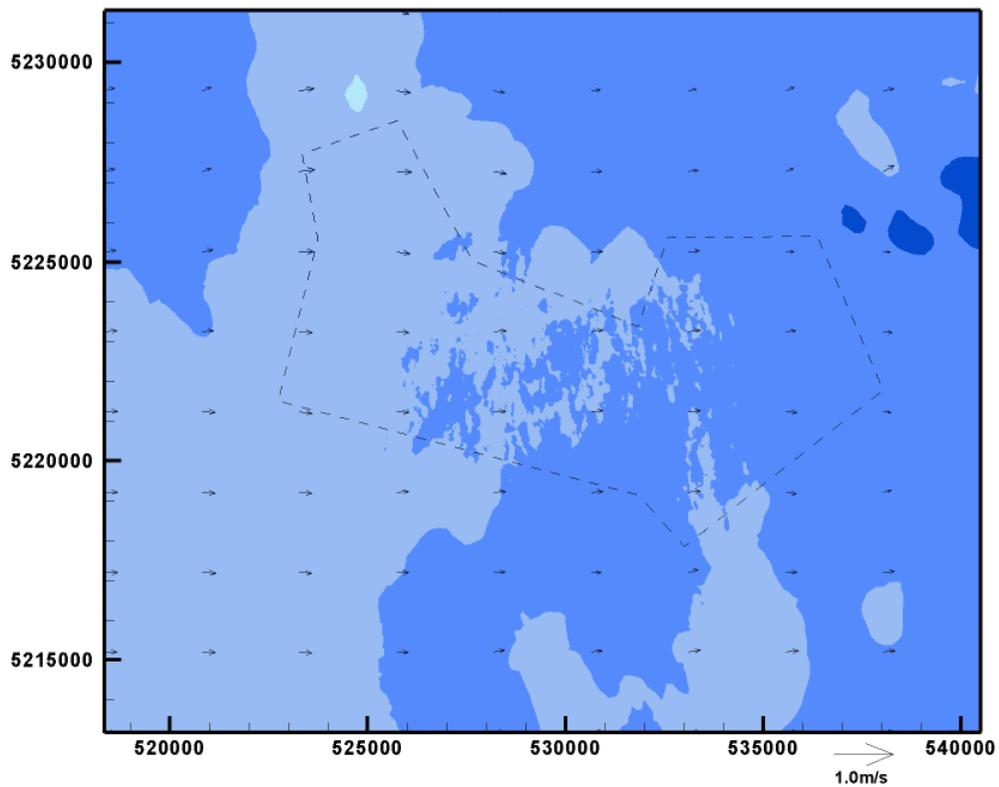


BM + 4

BM + 4

ACTUEL

PROJET

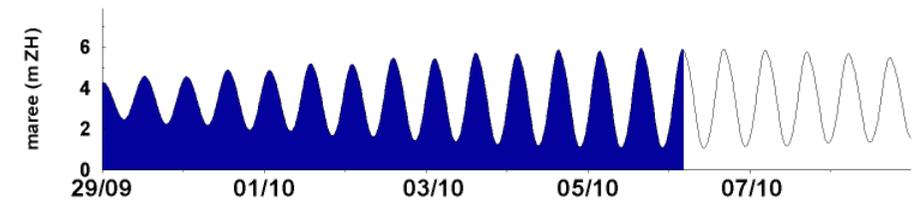
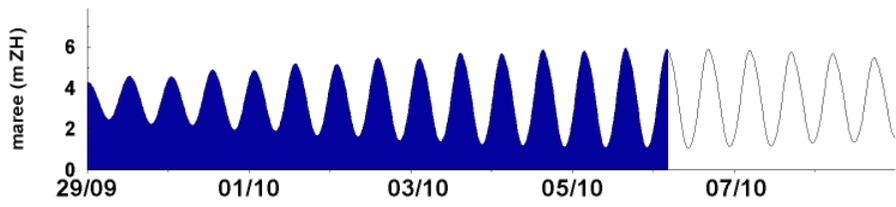
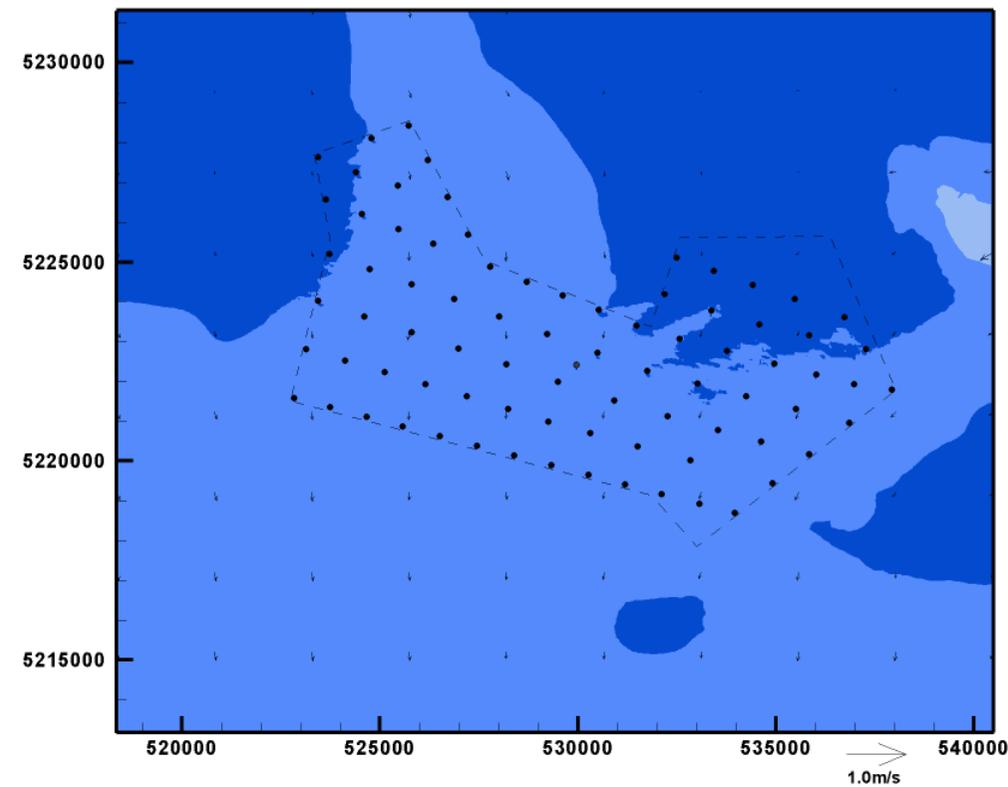
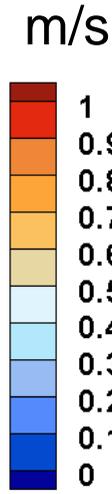
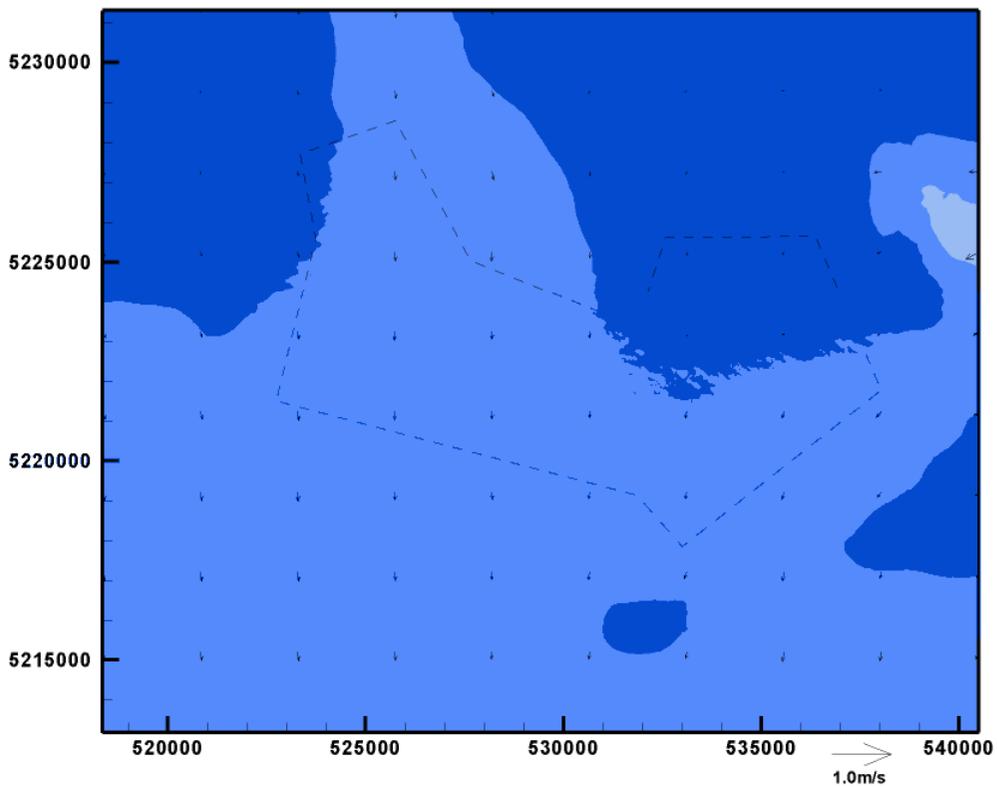


BM + 5

BM + 5

ACTUEL

PROJET

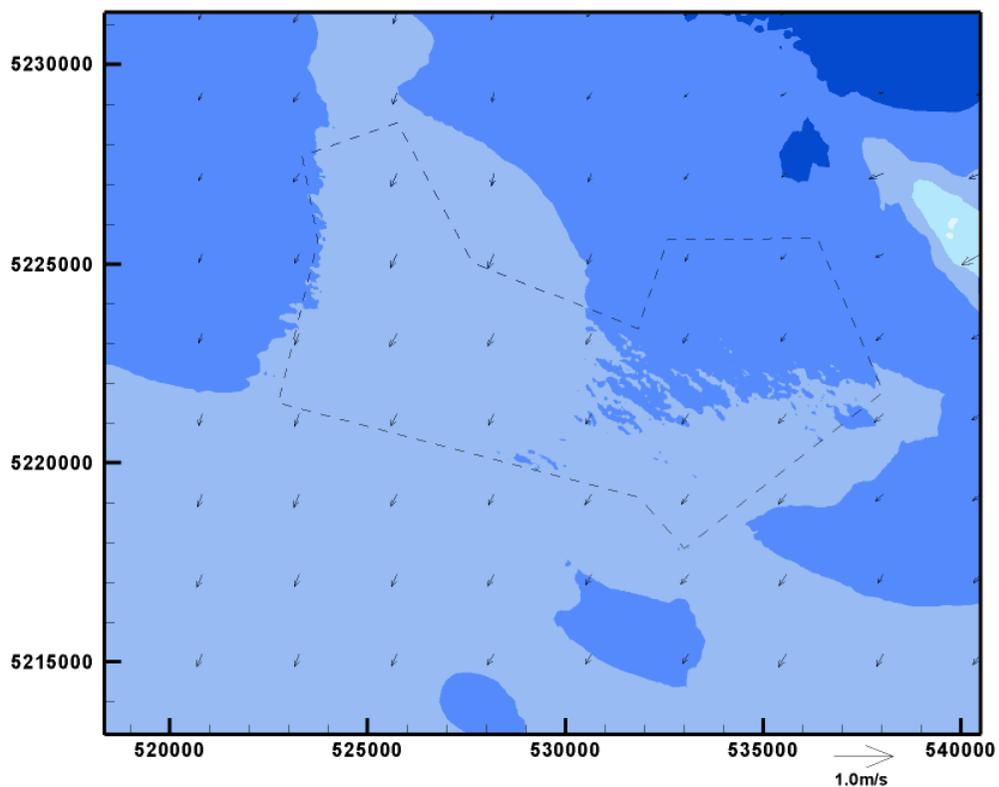


PM

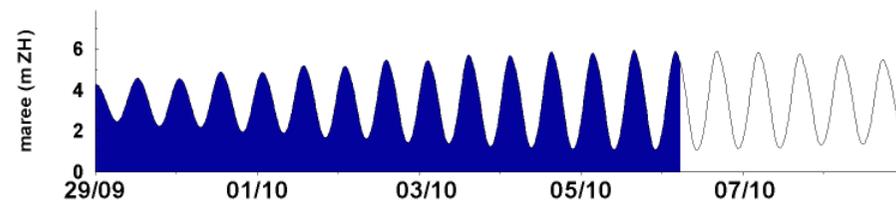
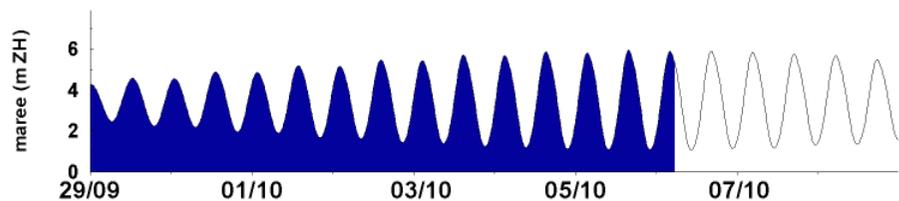
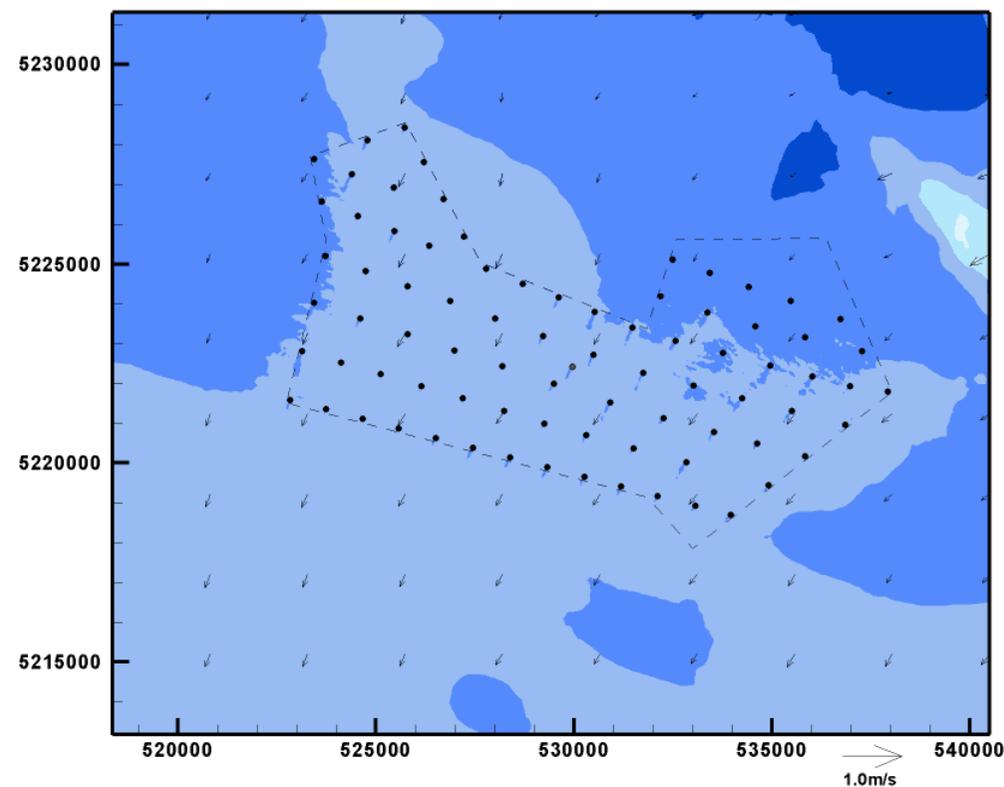
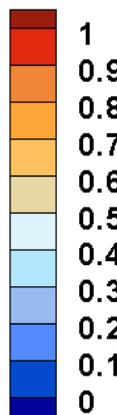
PM

ACTUEL

PROJET



m/s

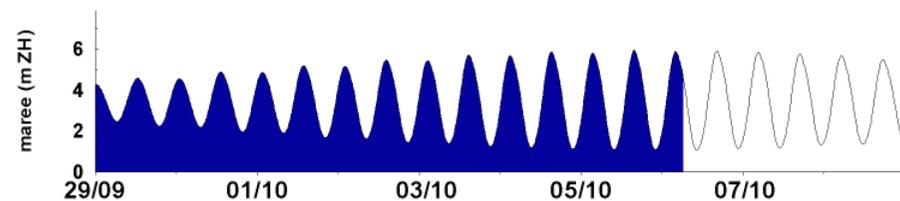
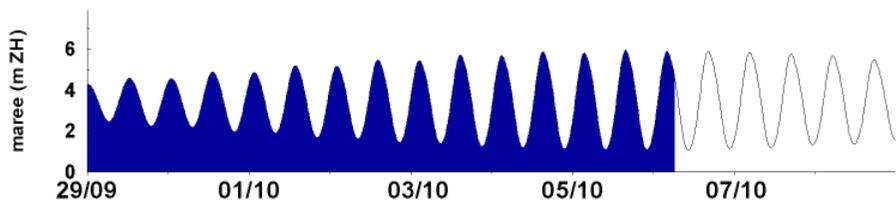
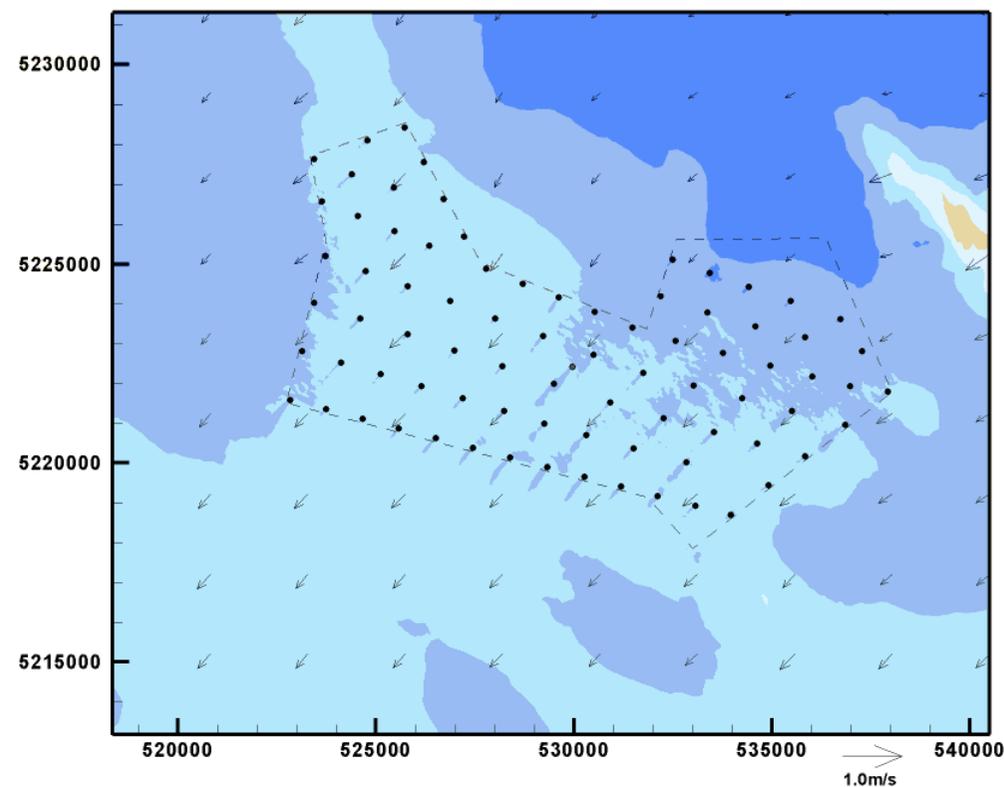
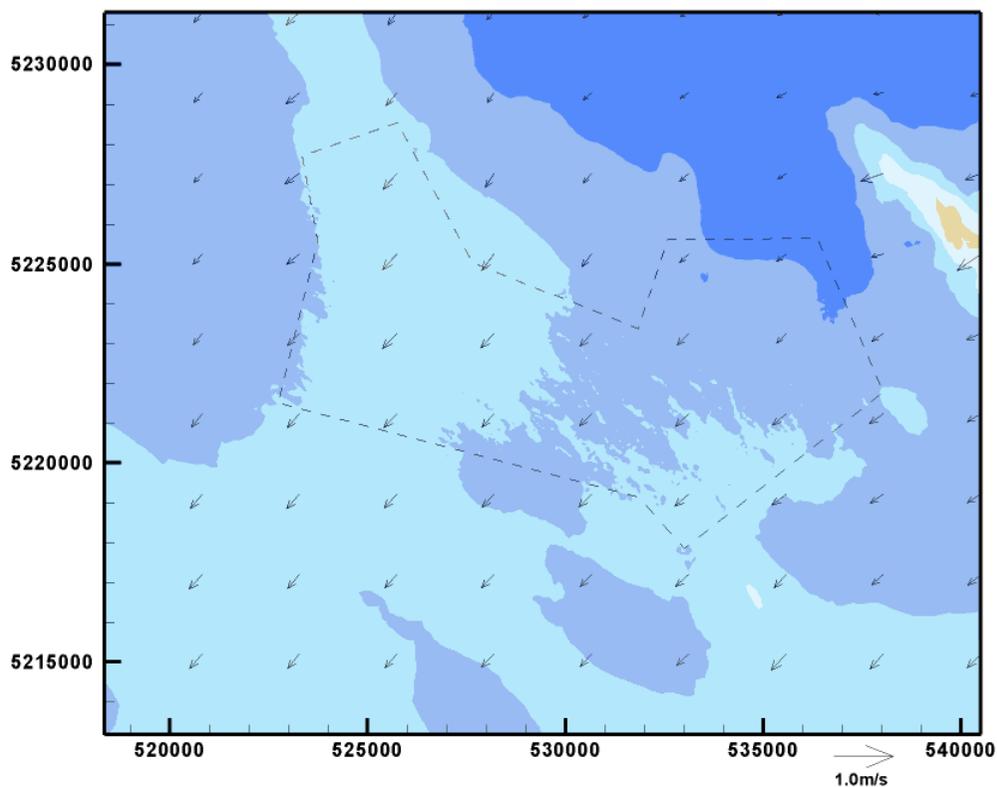


PM + 1

PM + 1

ACTUEL

PROJET

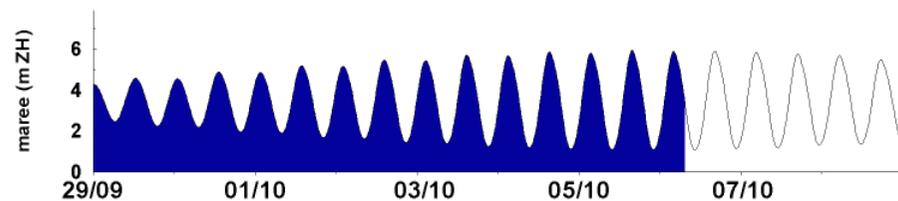
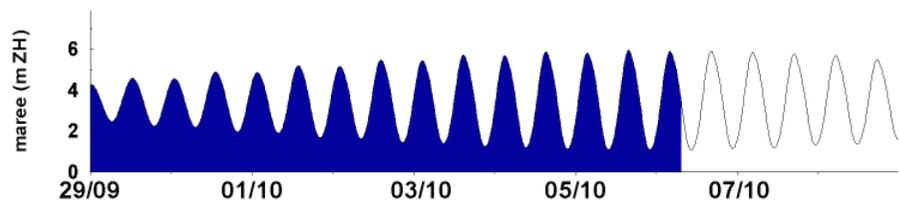
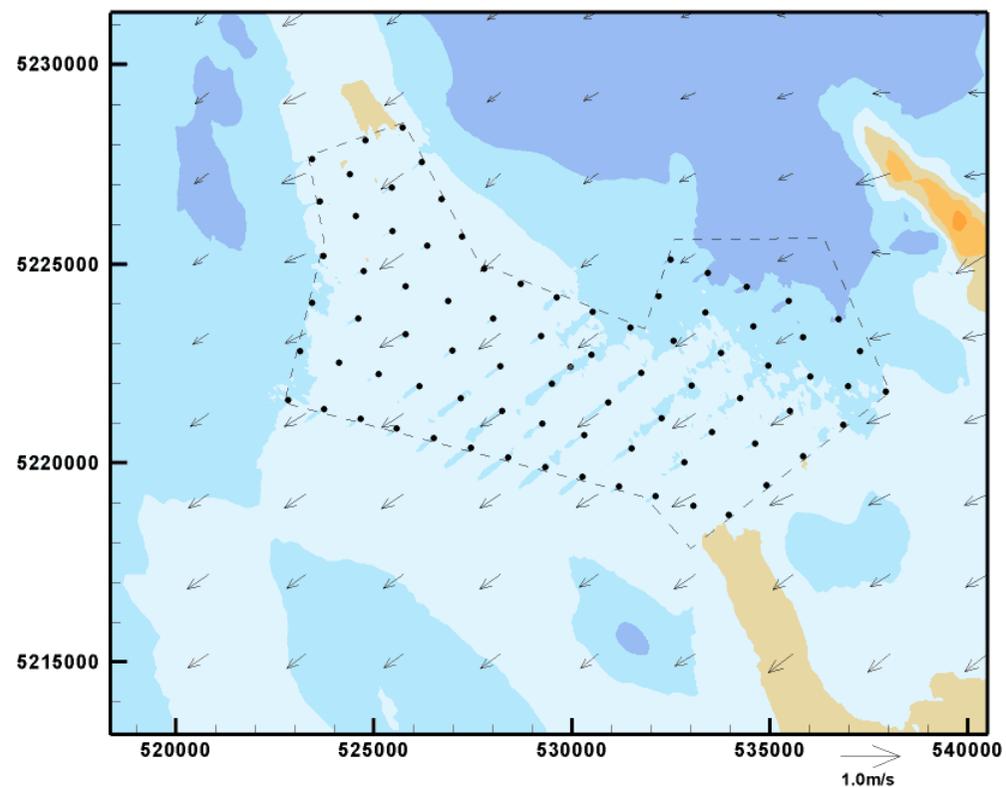
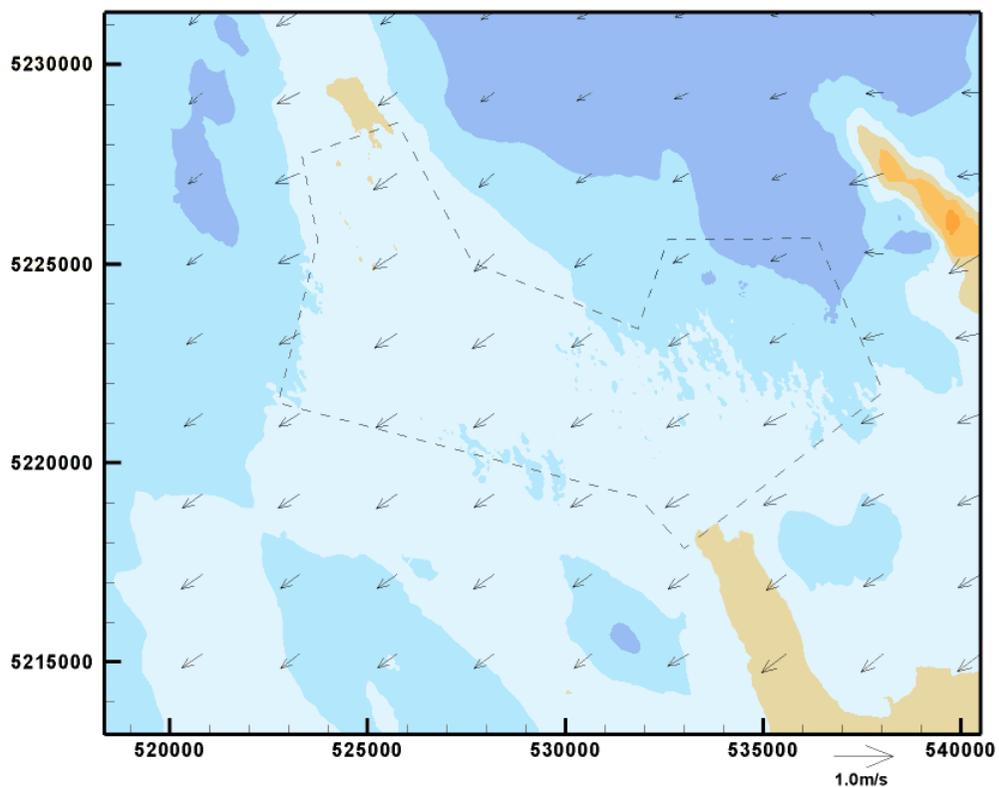


PM + 2

PM + 2

ACTUEL

PROJET

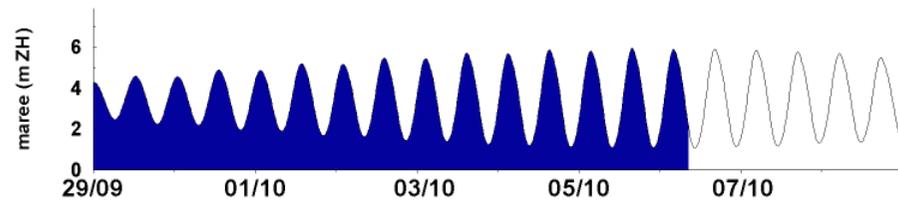
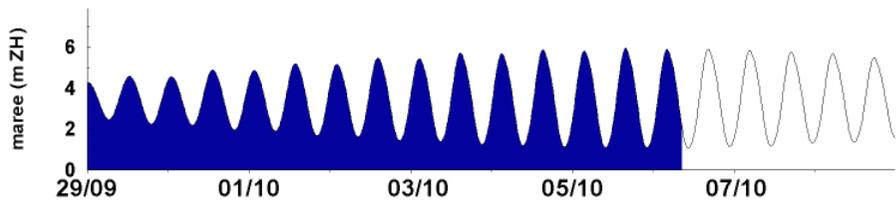
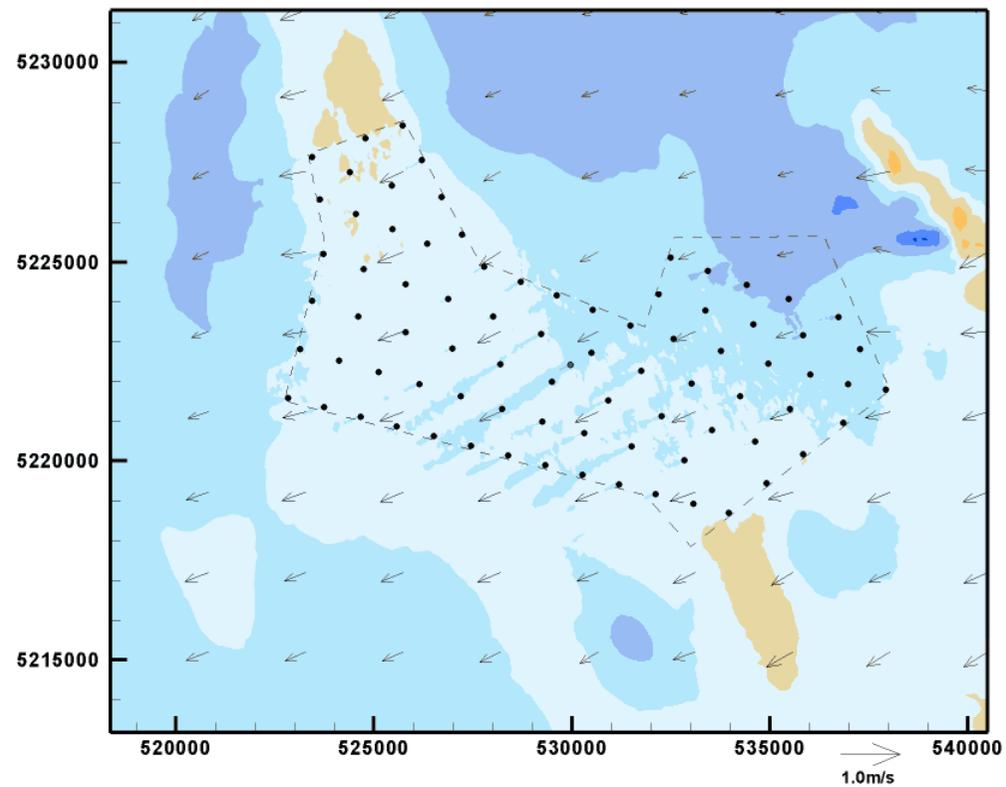
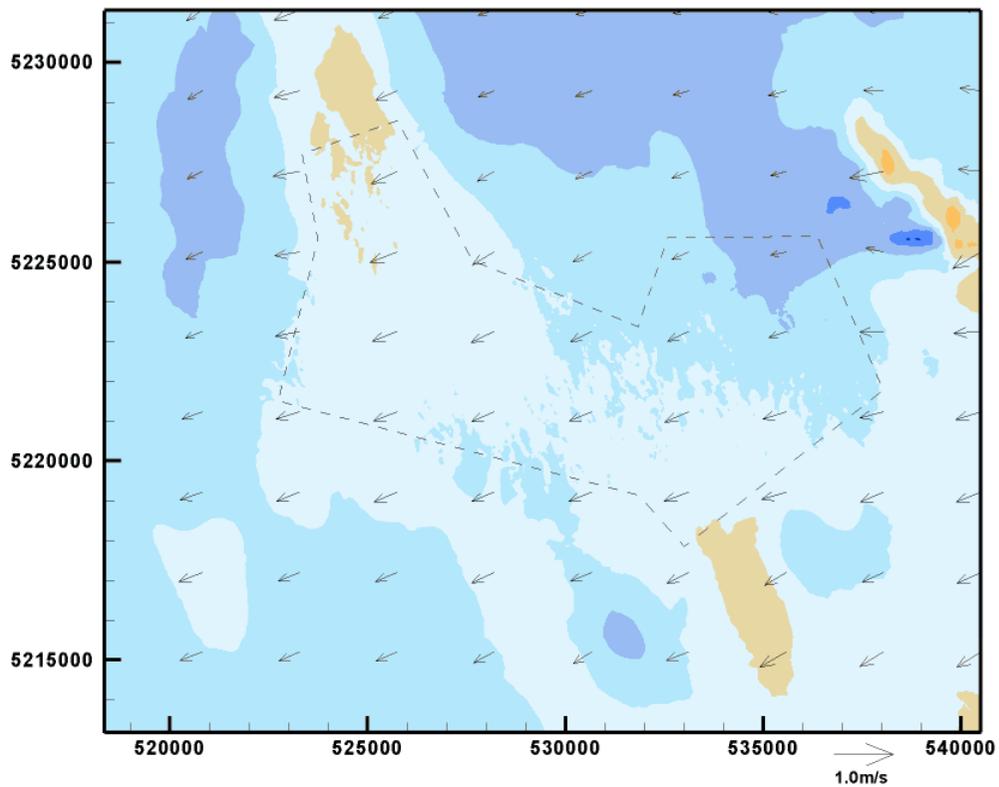


PM + 3

PM + 3

ACTUEL

PROJET

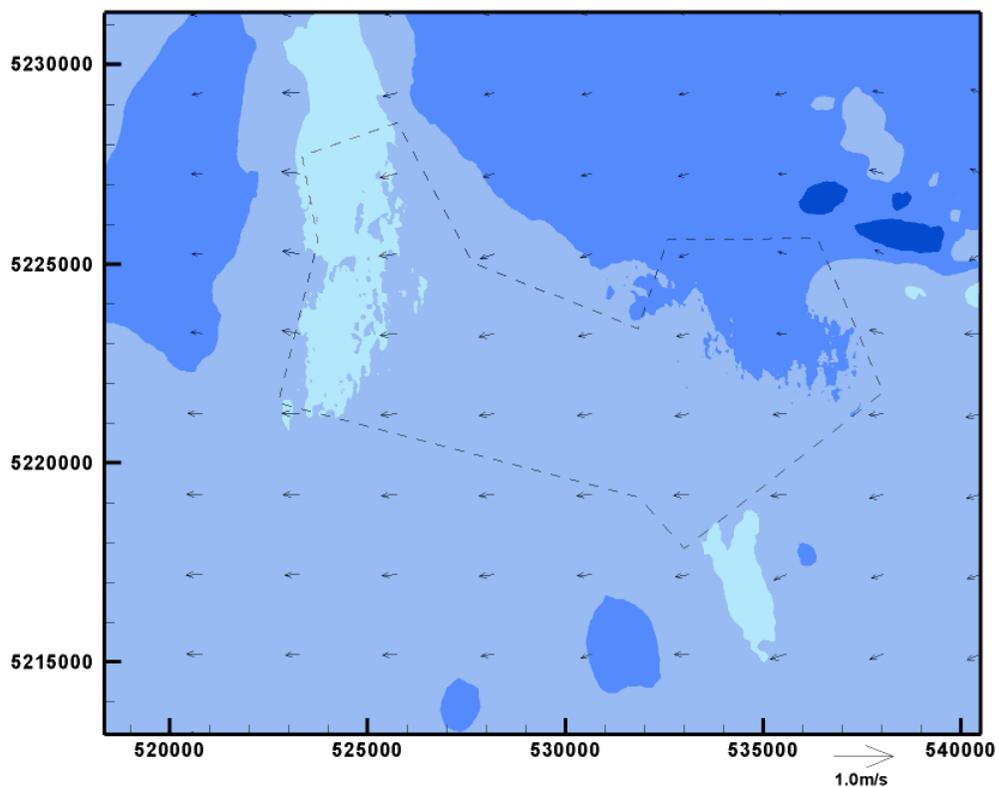


PM + 4

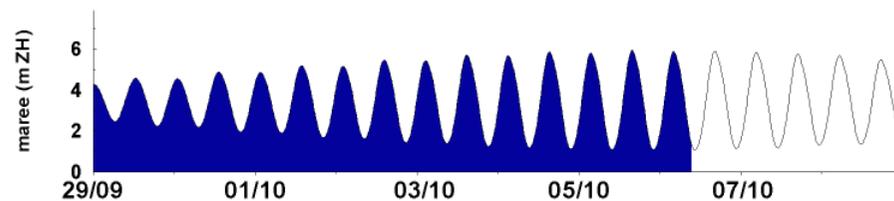
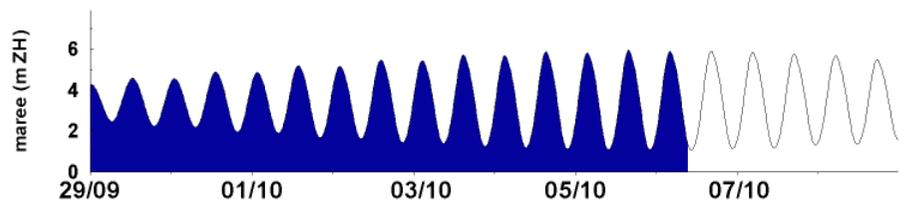
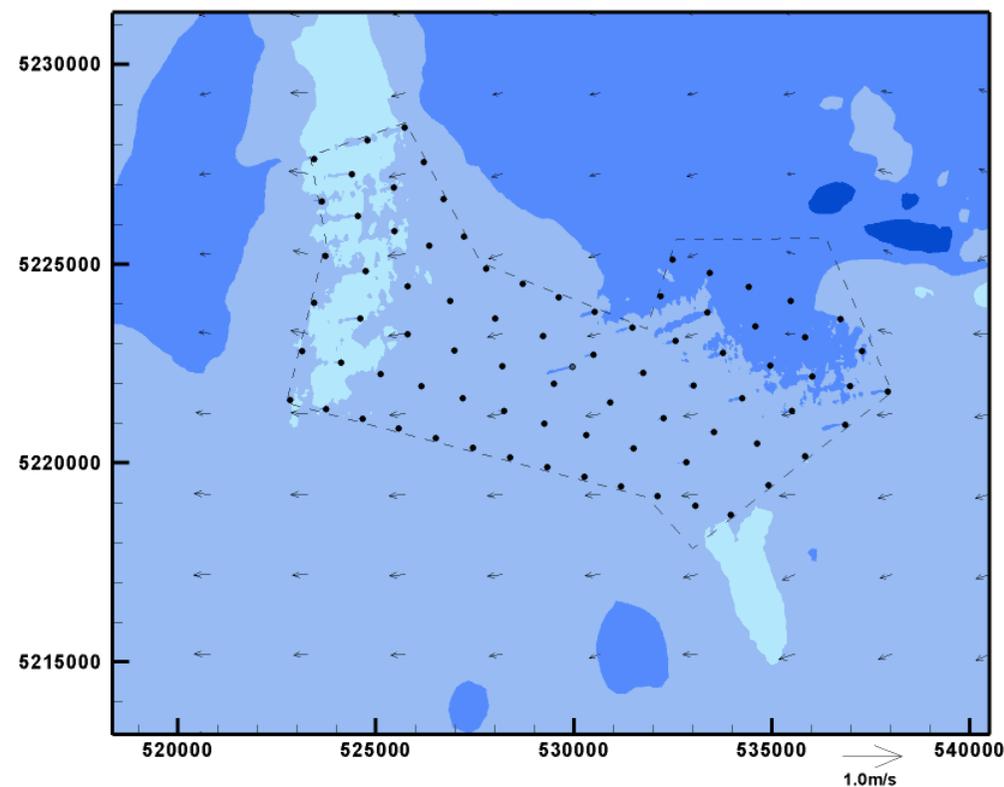
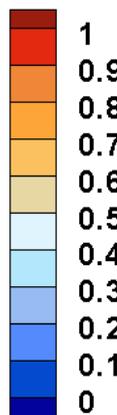
PM + 4

ACTUEL

PROJET



m/s

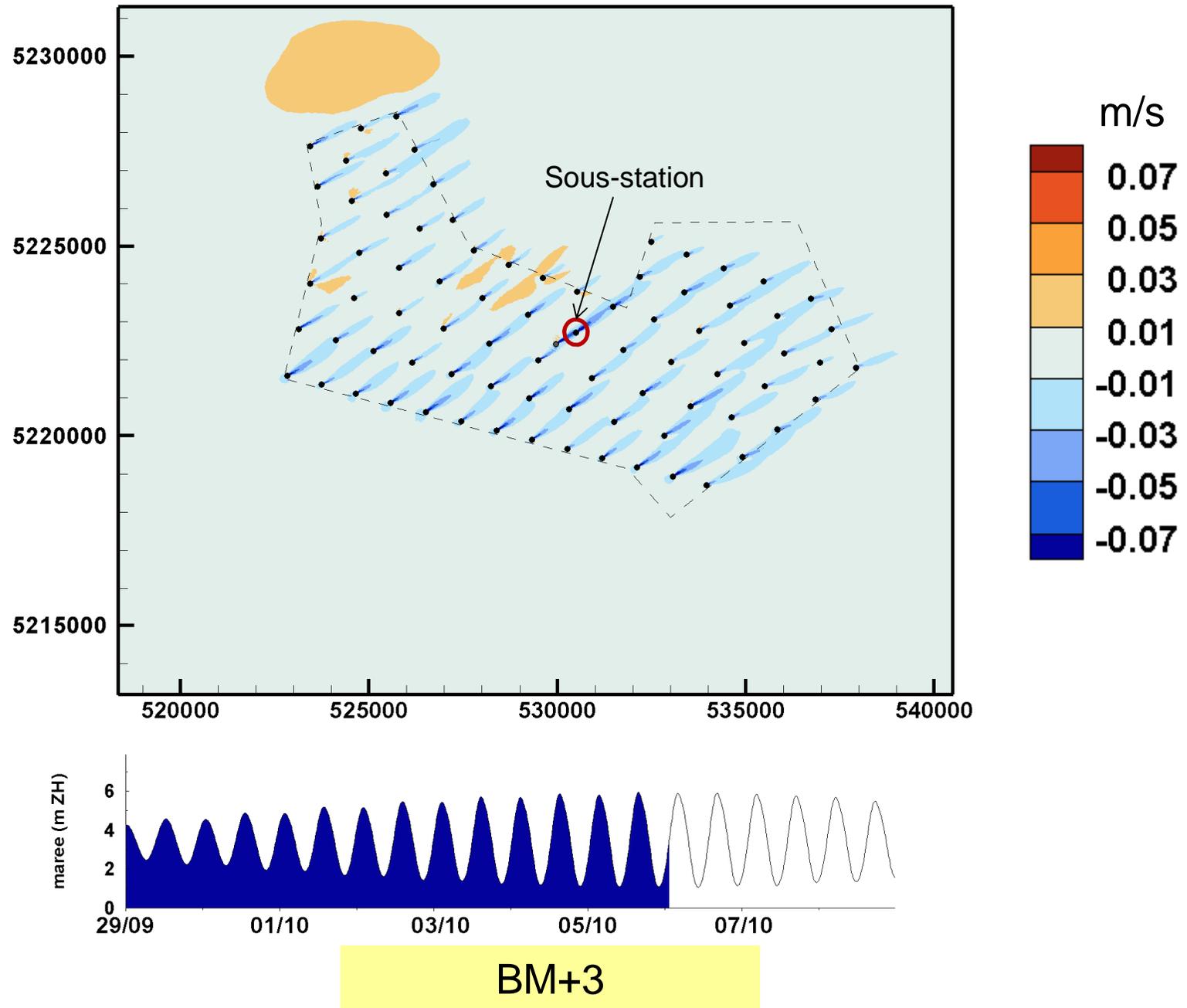


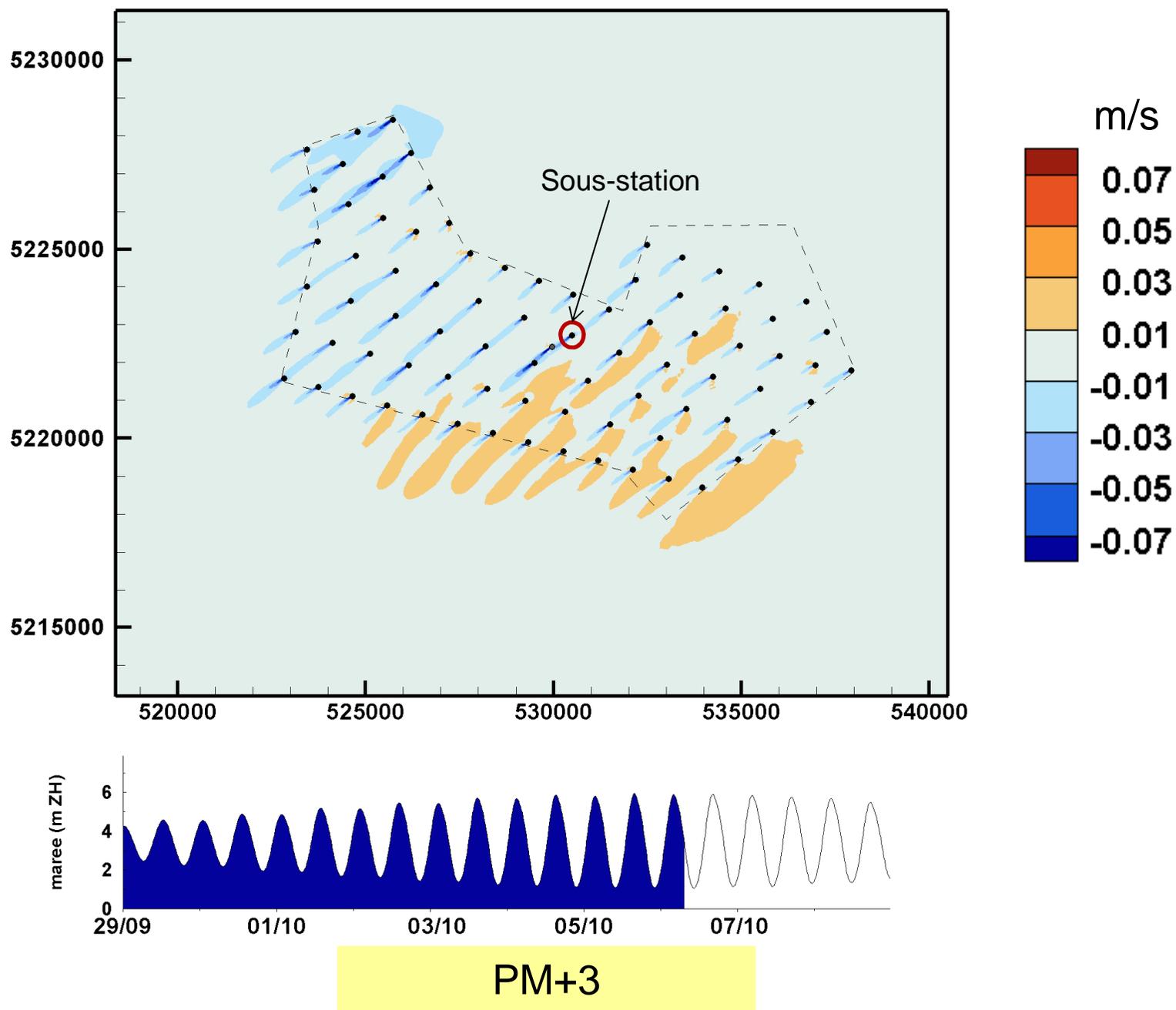
PM + 5

PM + 5

---

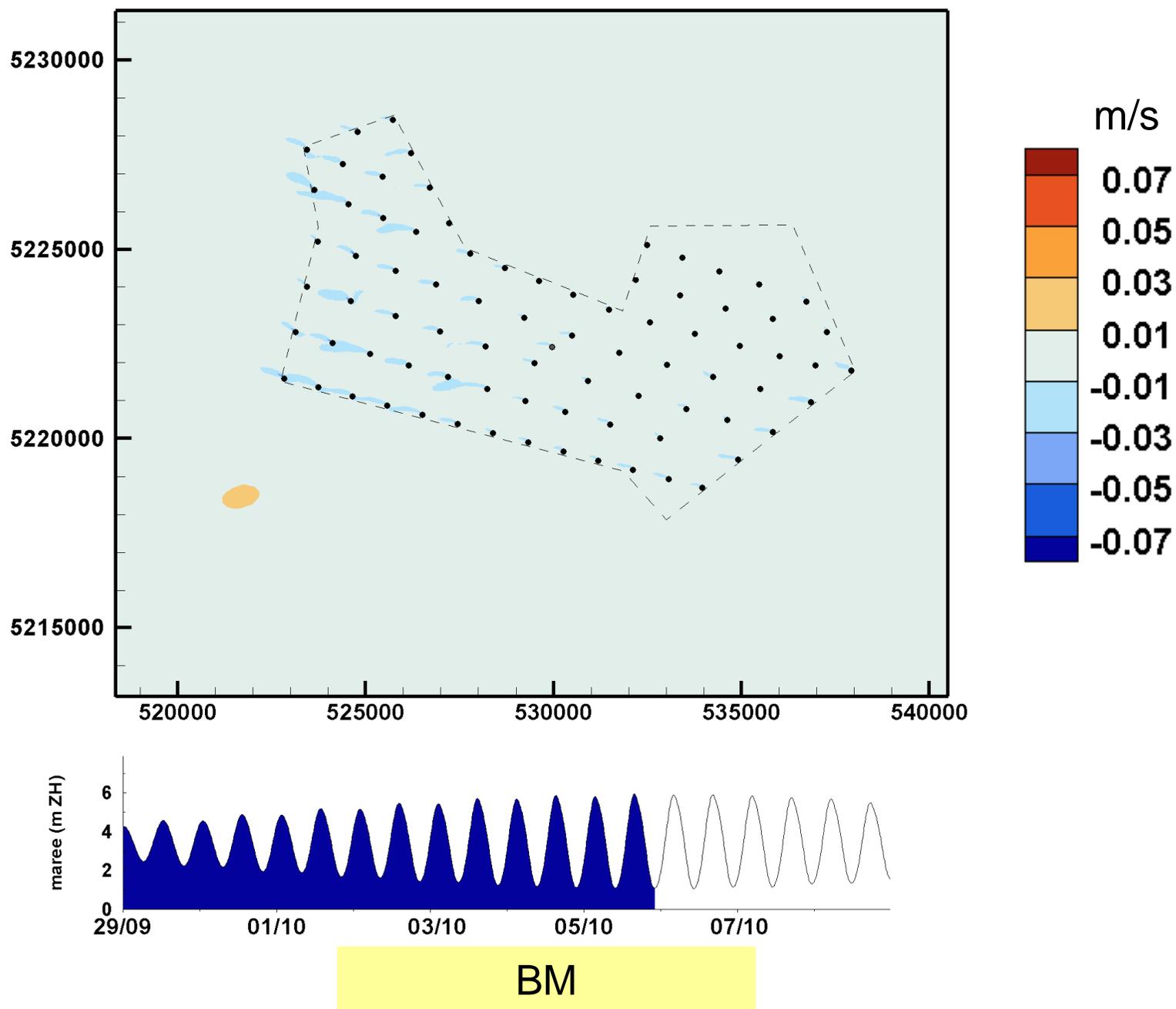
**DIFFÉRENTIEL DE COURANTS AUX PICS DE FLOT ET DE JUSANT POUR UNE  
MARÉE DE VIVES-EAUX DE COEFFICIENT 93  
ETAT AMÉNAGÉ - ÉTAT ACTUEL**

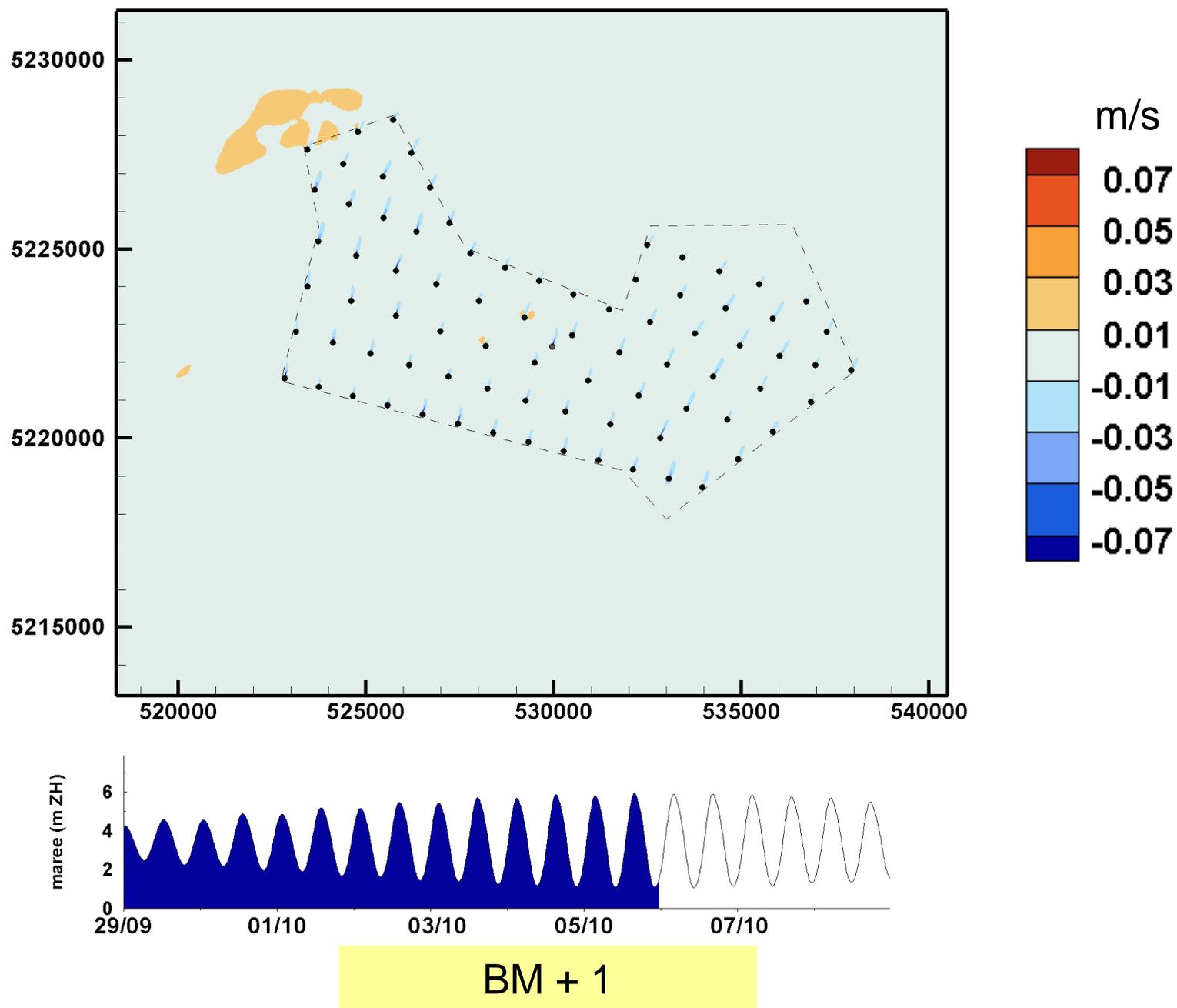


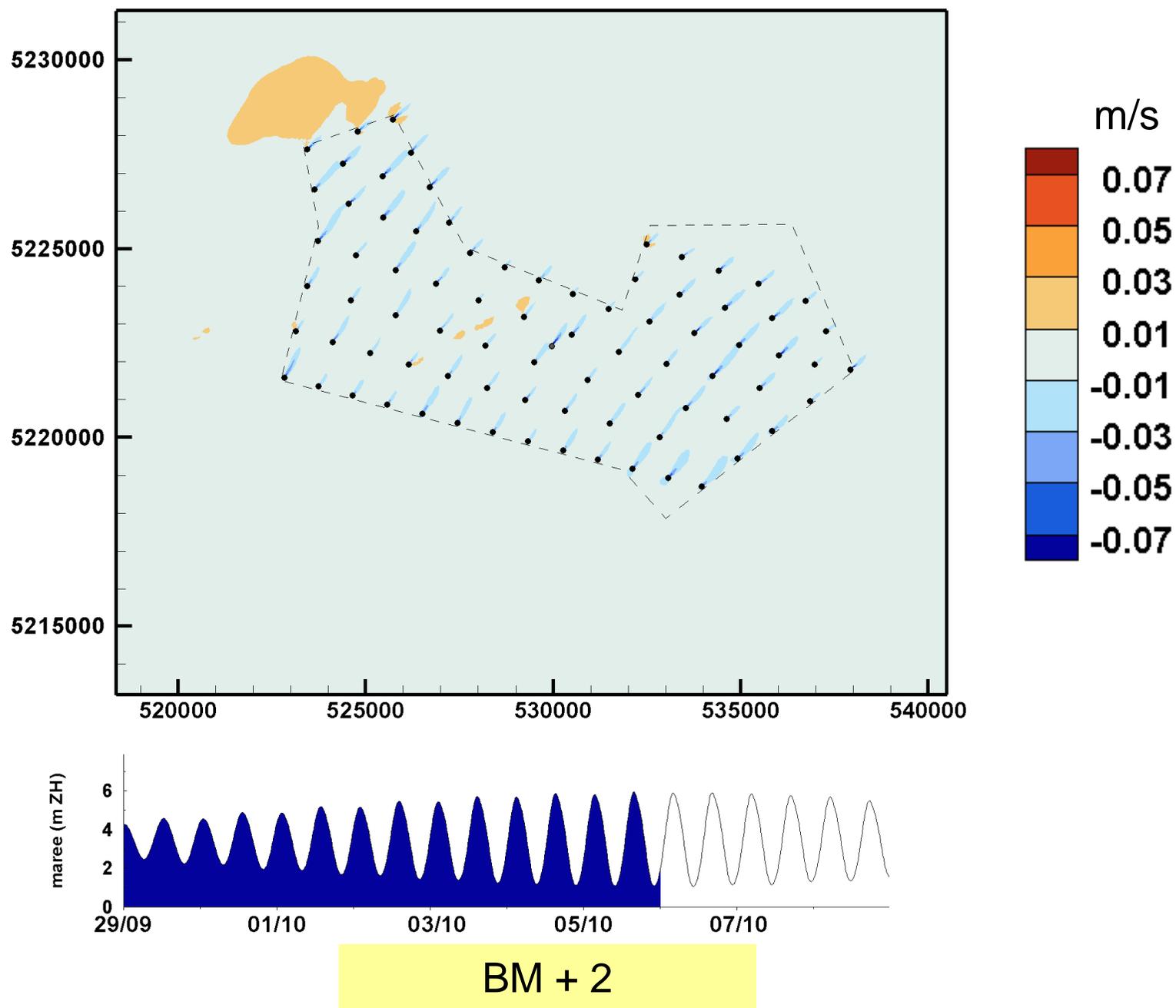


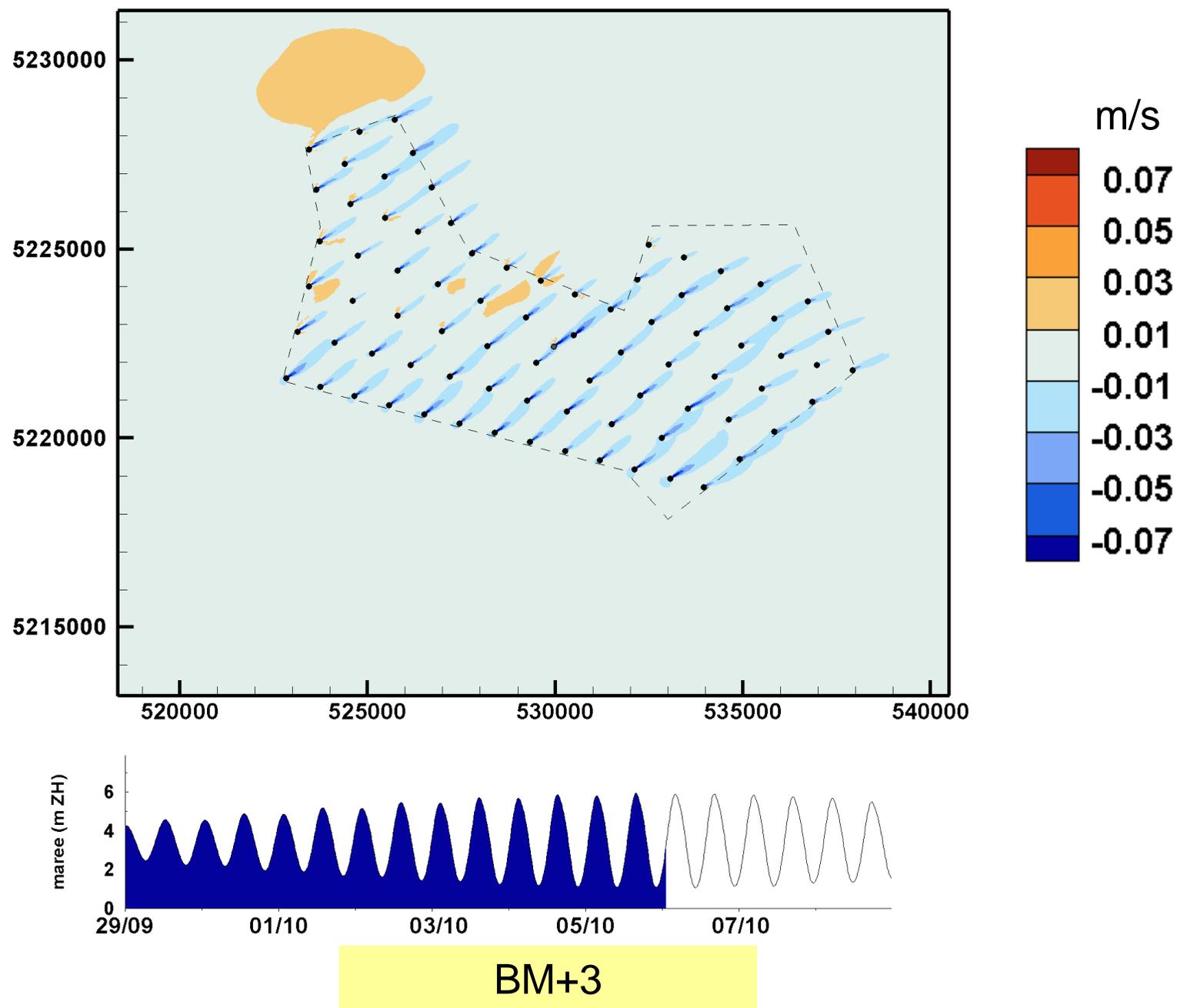
---

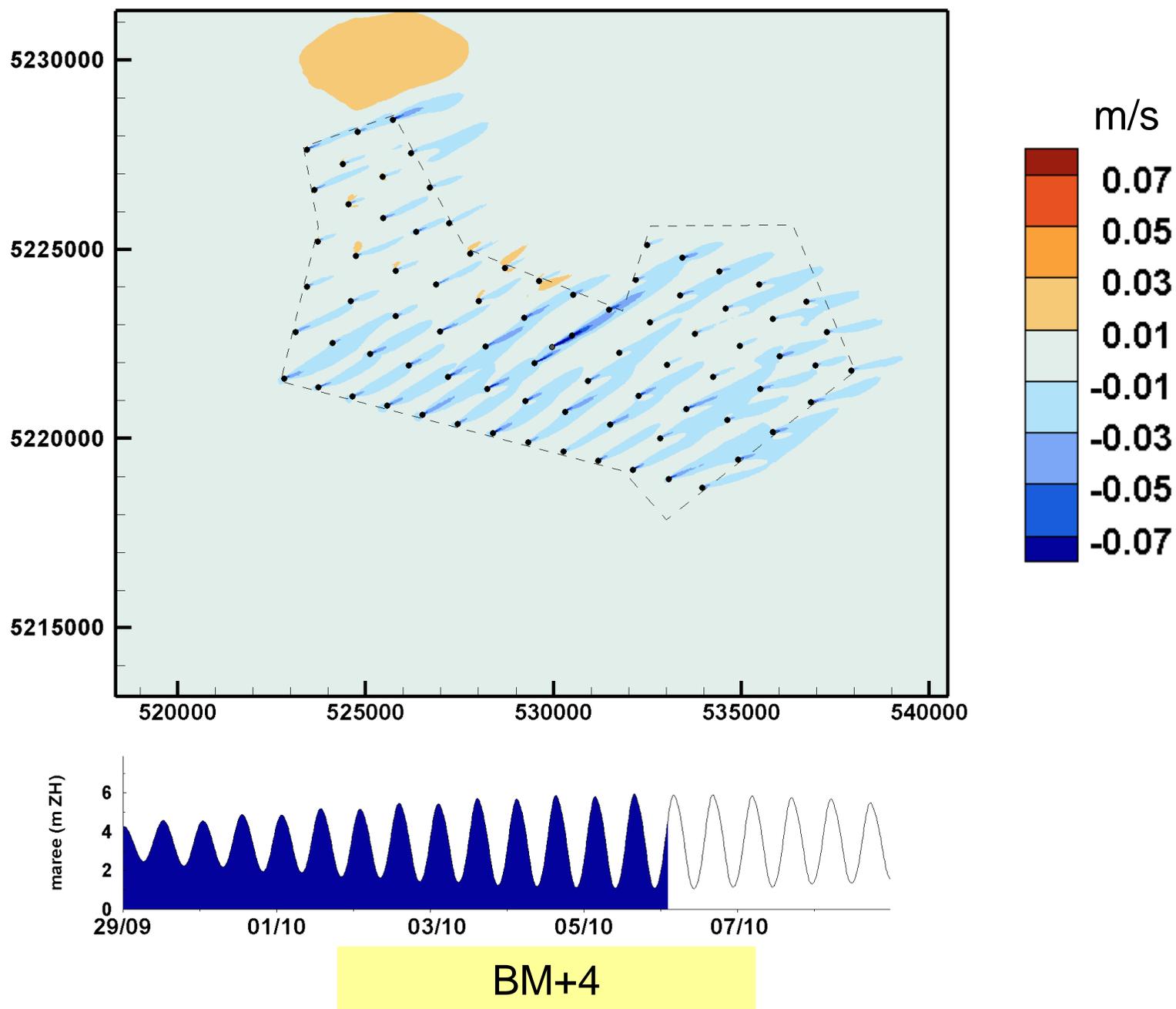
**CHAMPS DU DIFFÉRENTIEL DE COURANT HEURE PAR HEURE POUR UNE  
MARÉE DE VIVES-EAUX DE COEFFICIENT 93  
ÉTAT AMÉNAGÉ – ÉTAT ACTUEL**

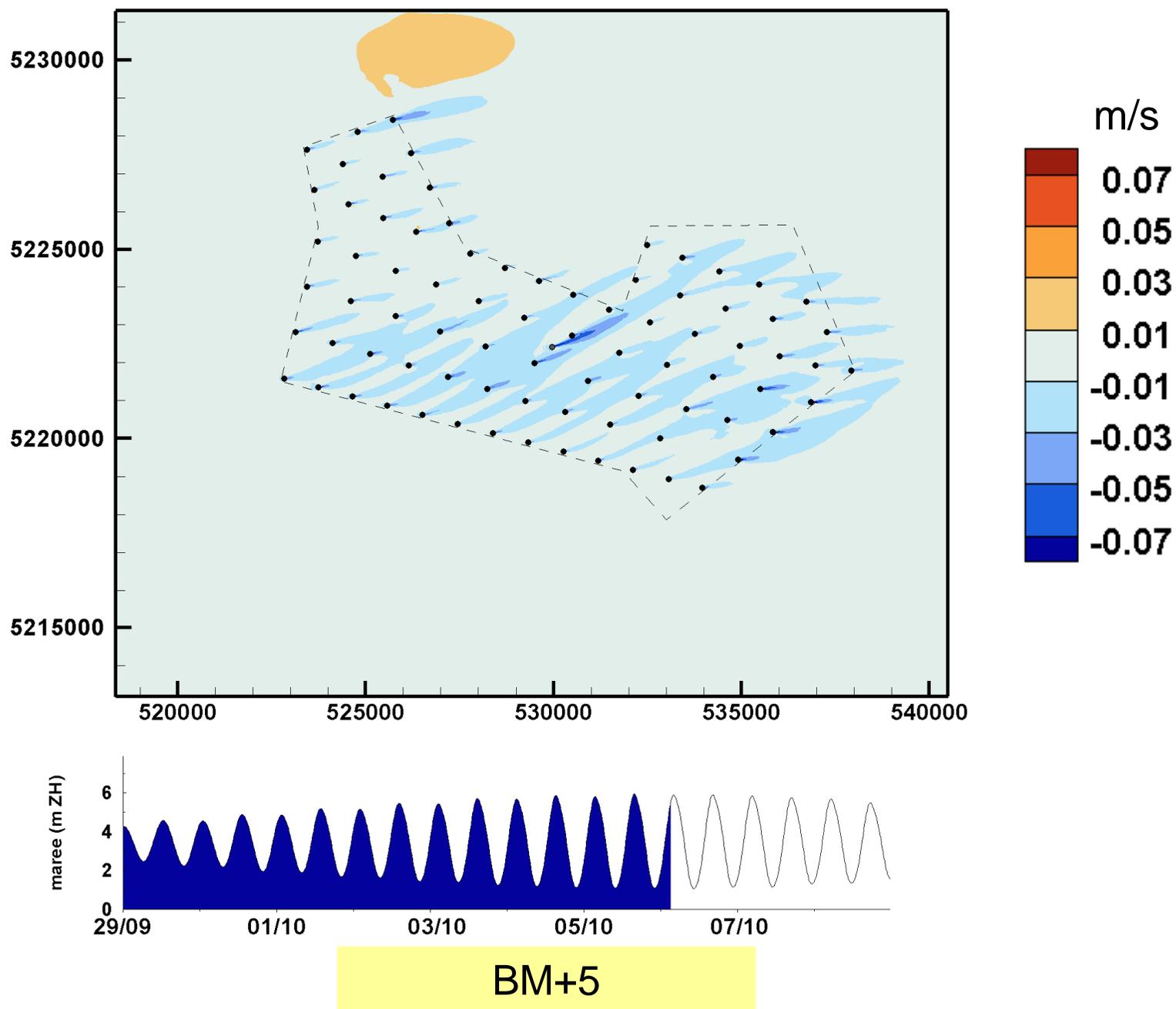


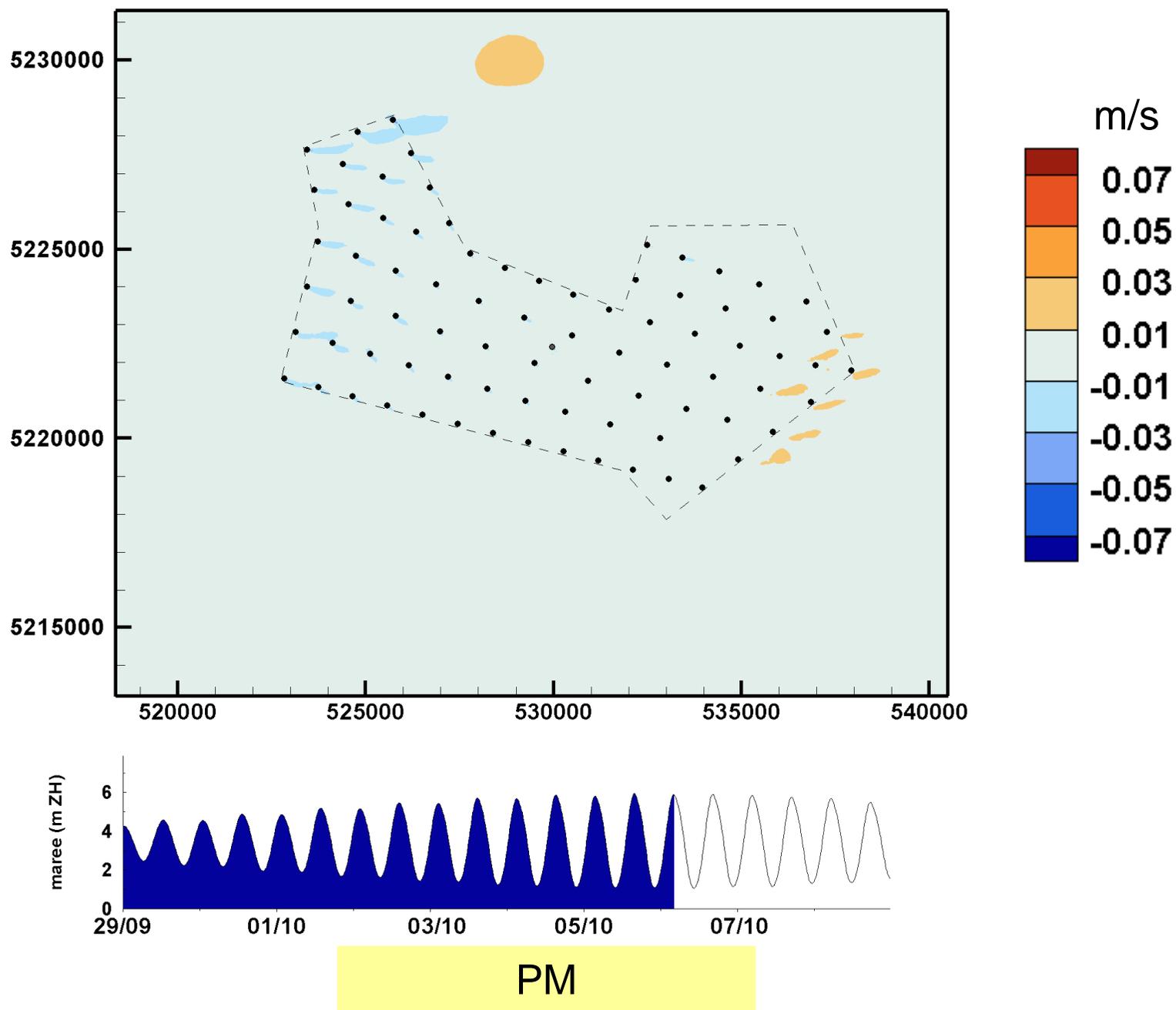


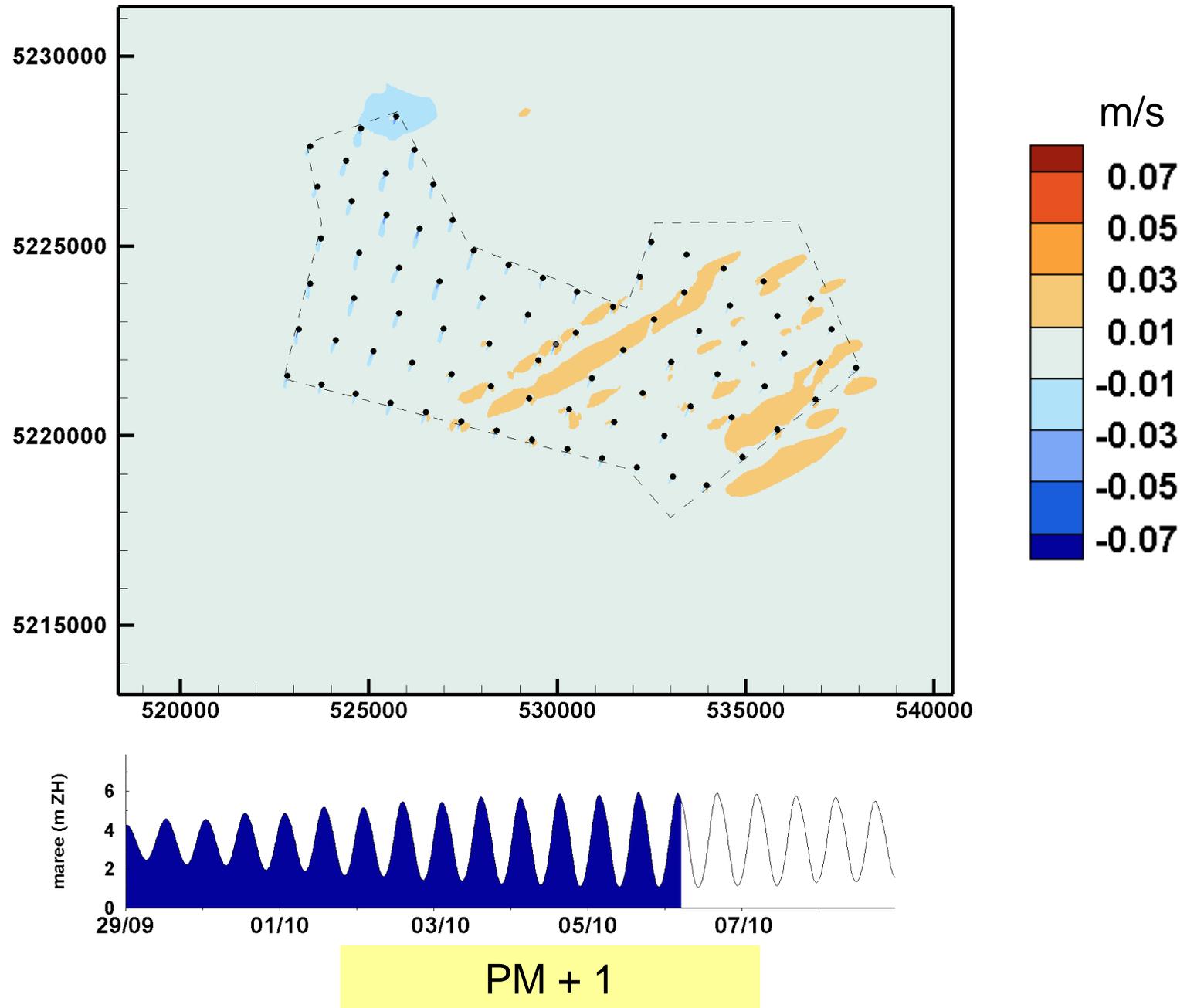


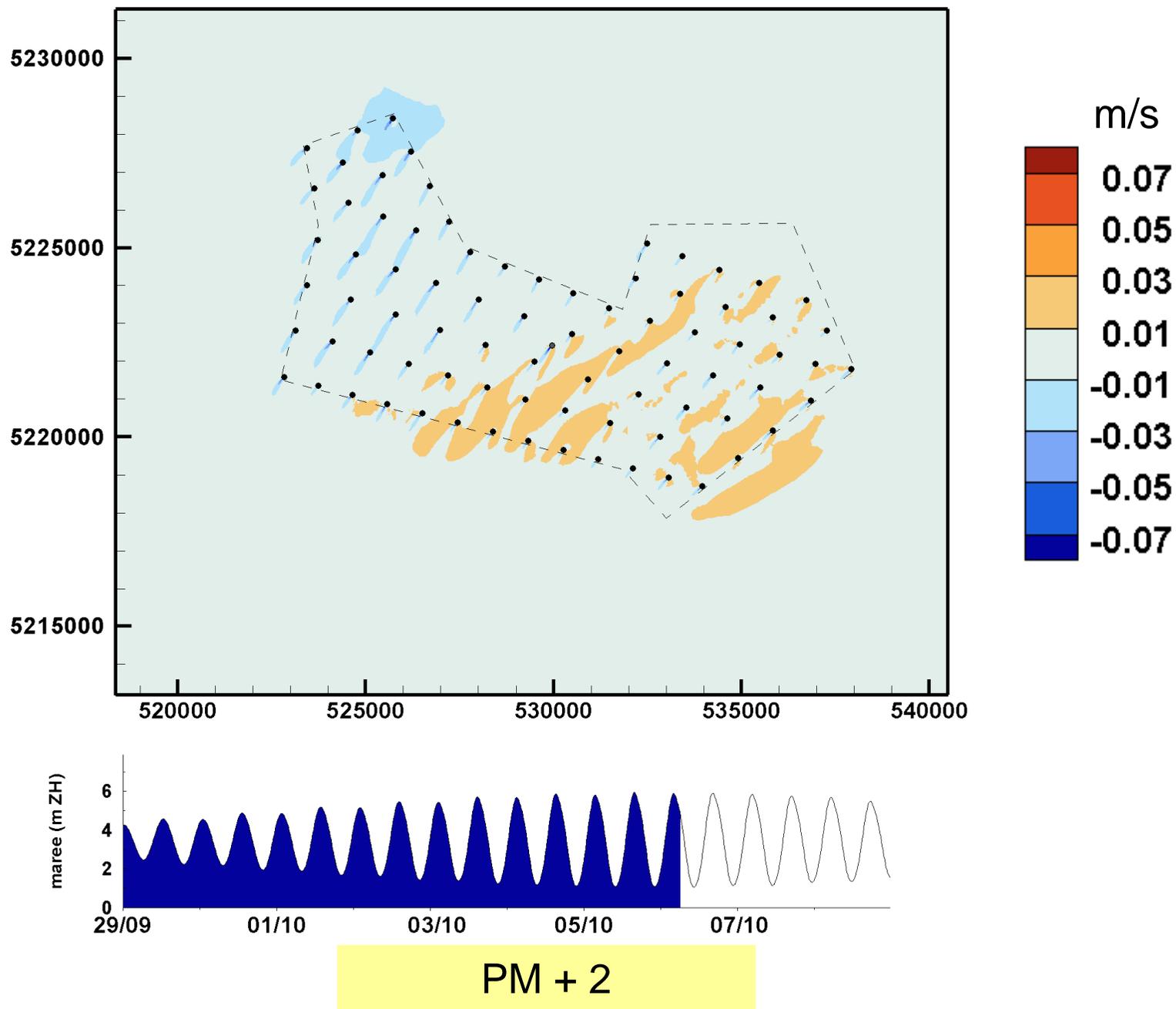


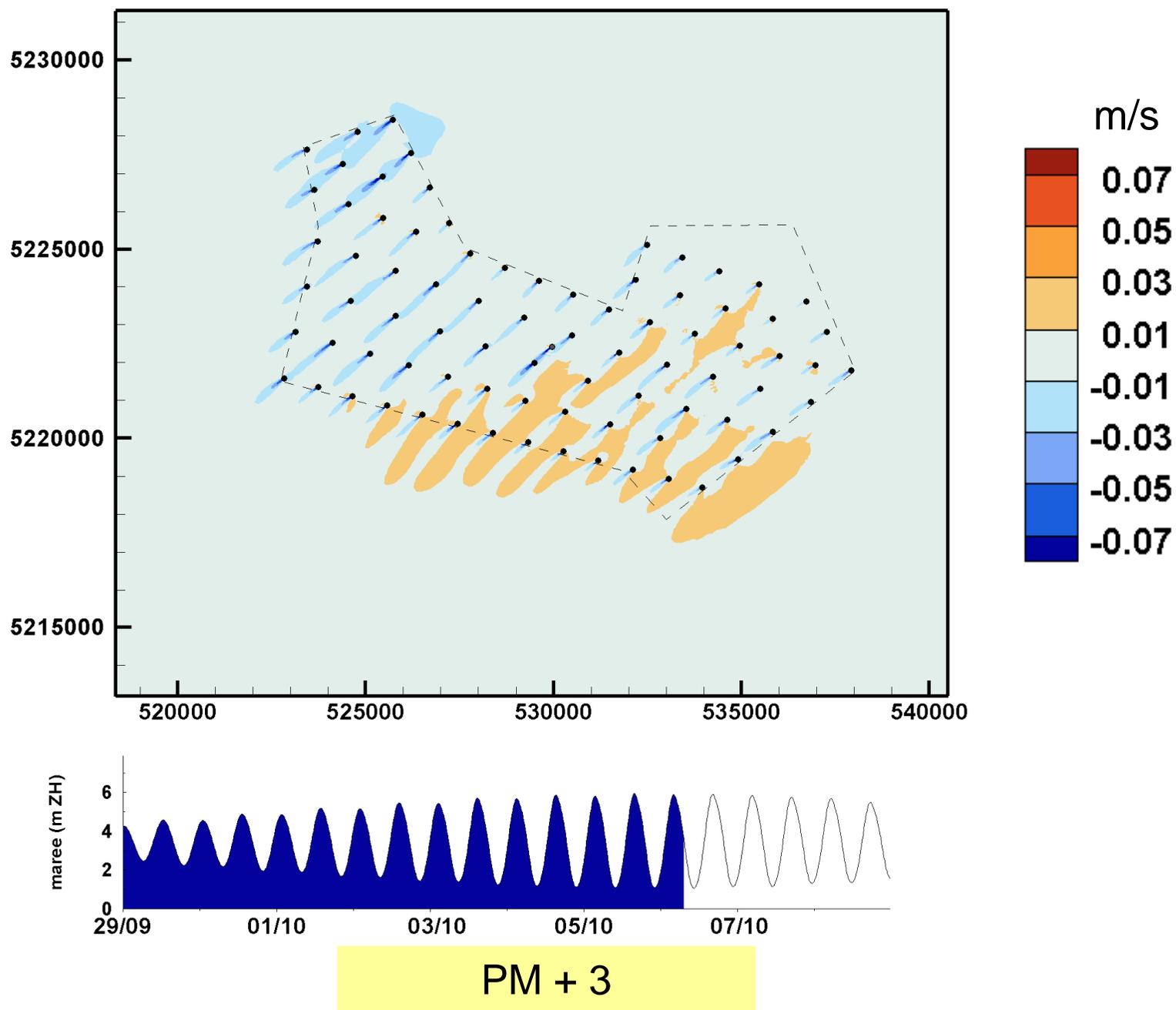


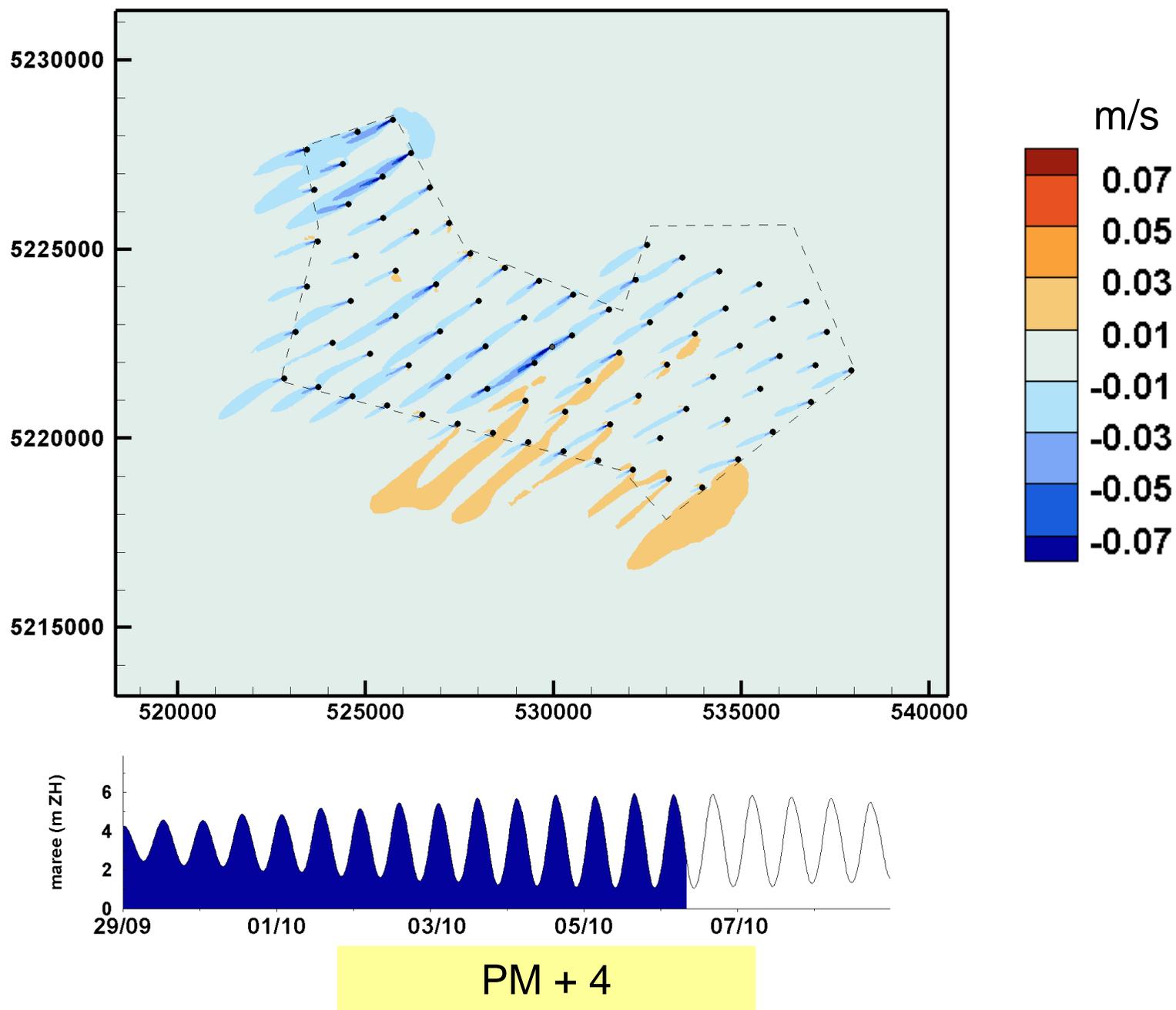


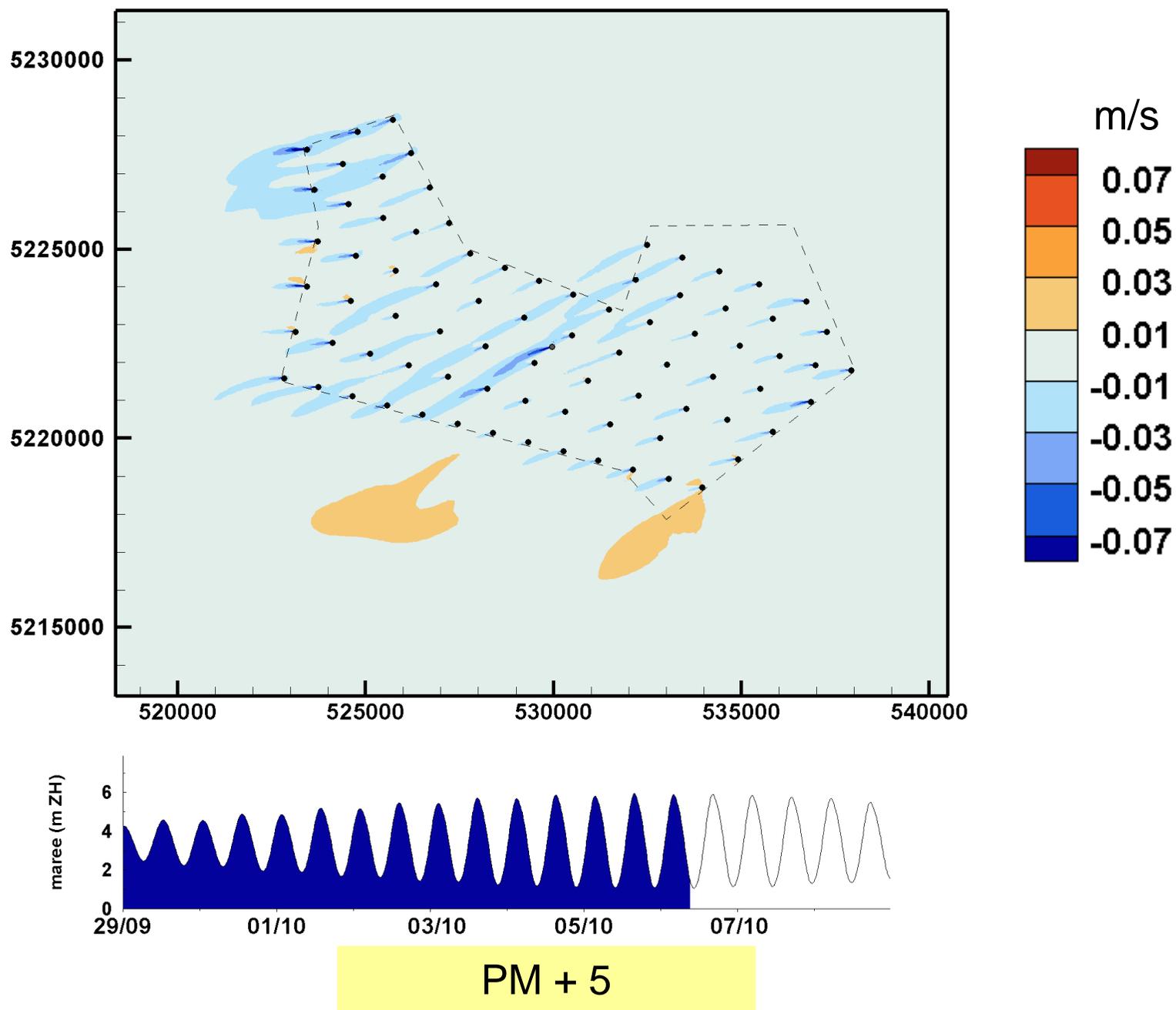






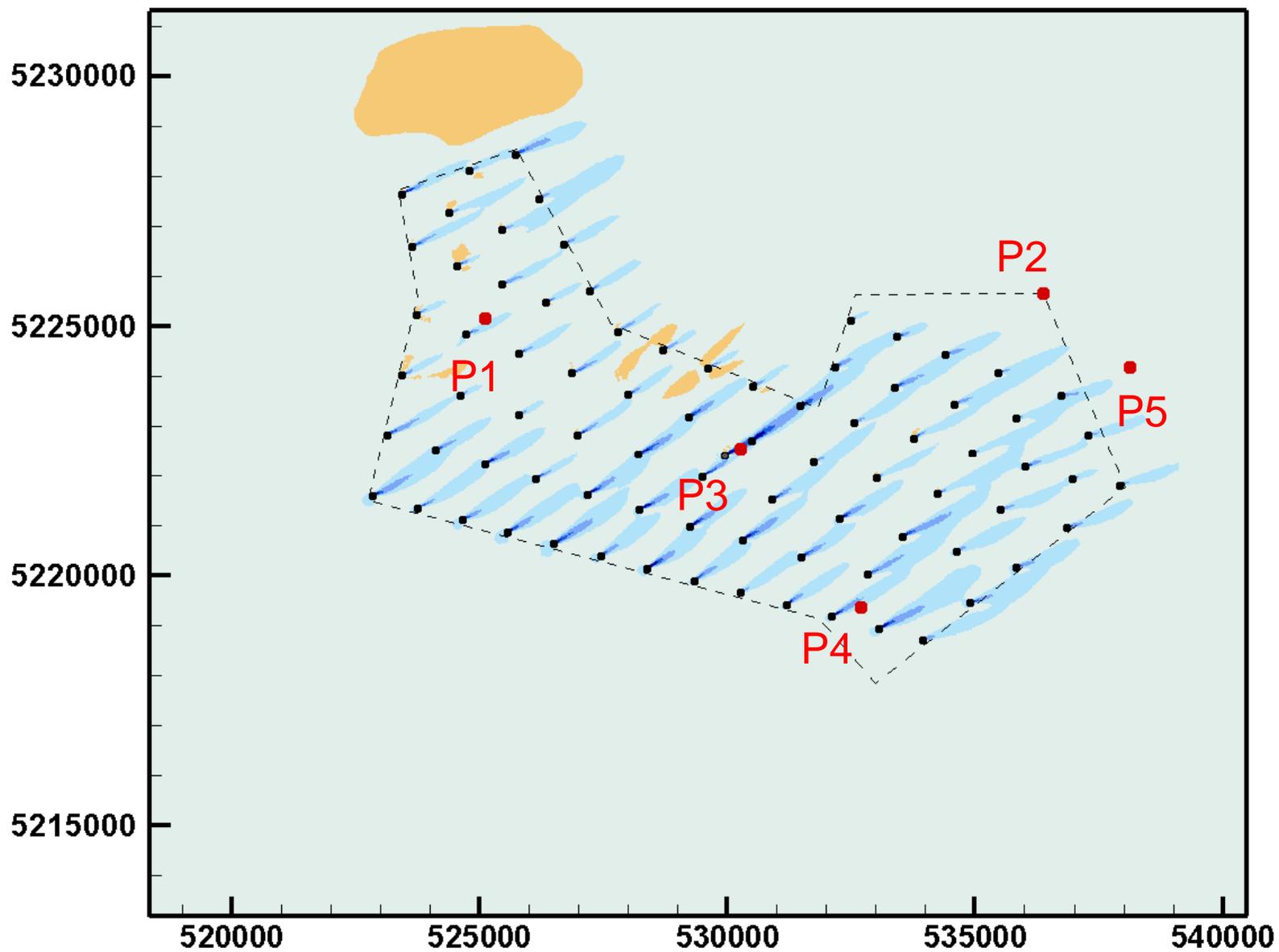


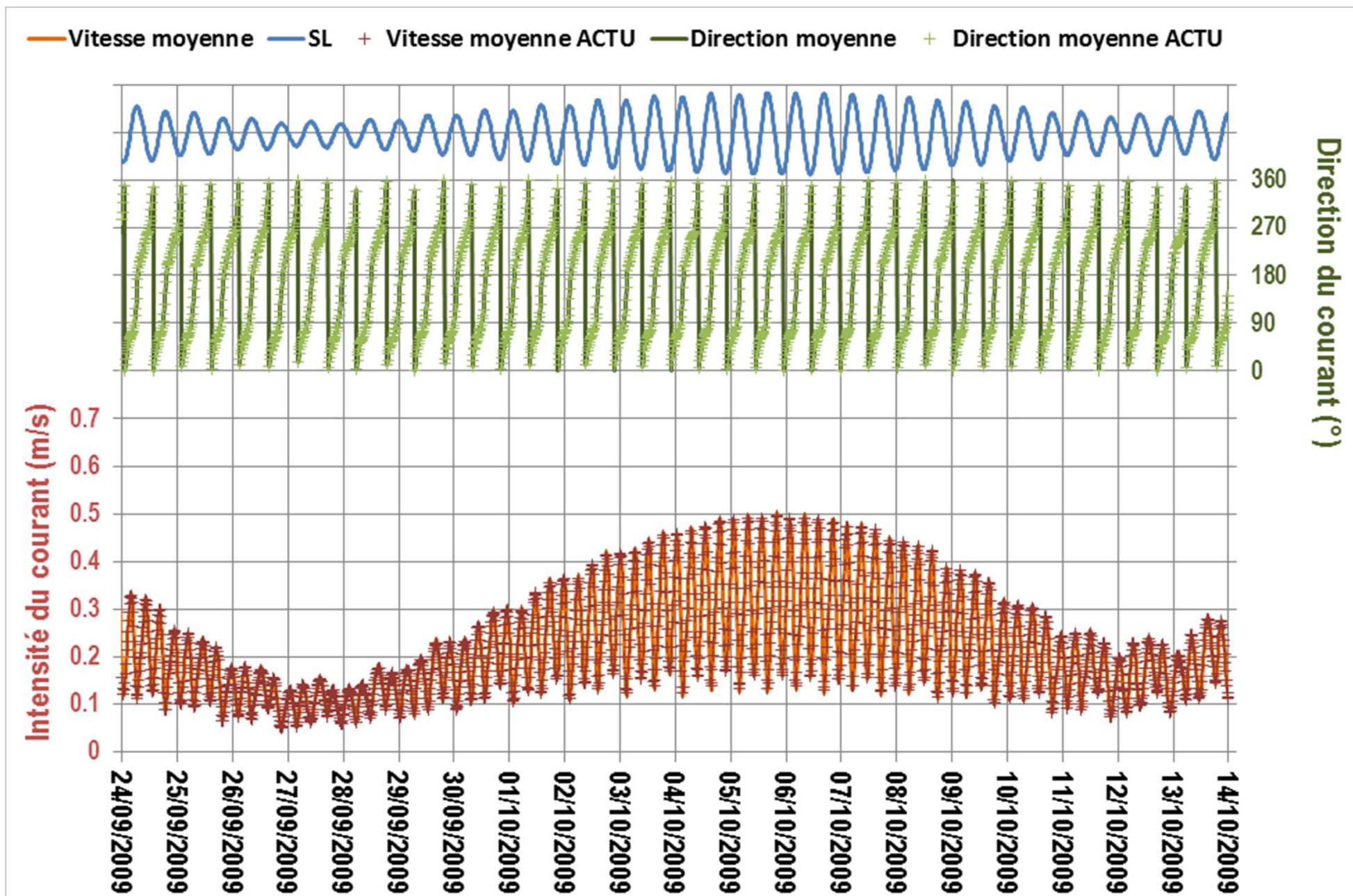


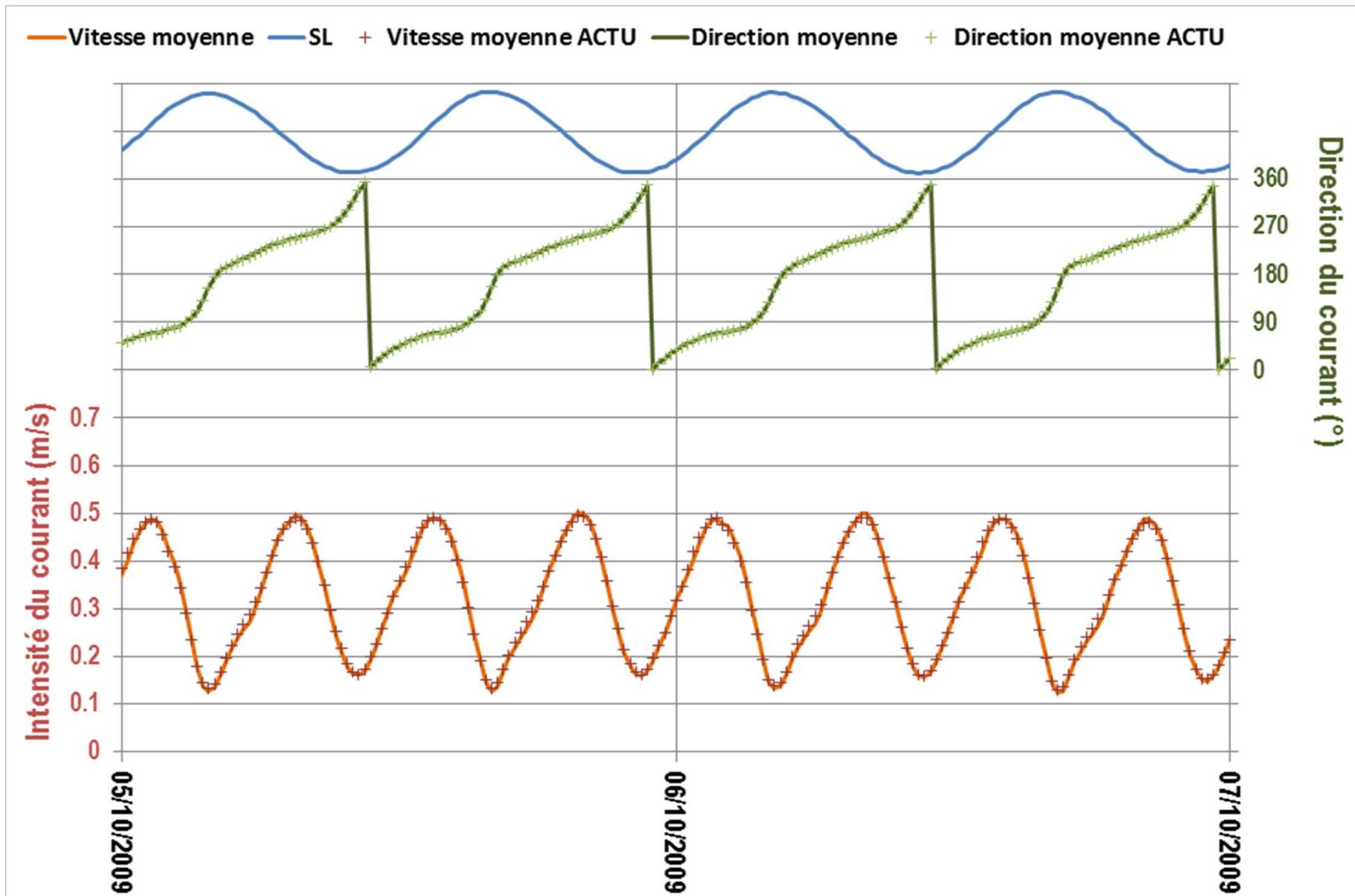


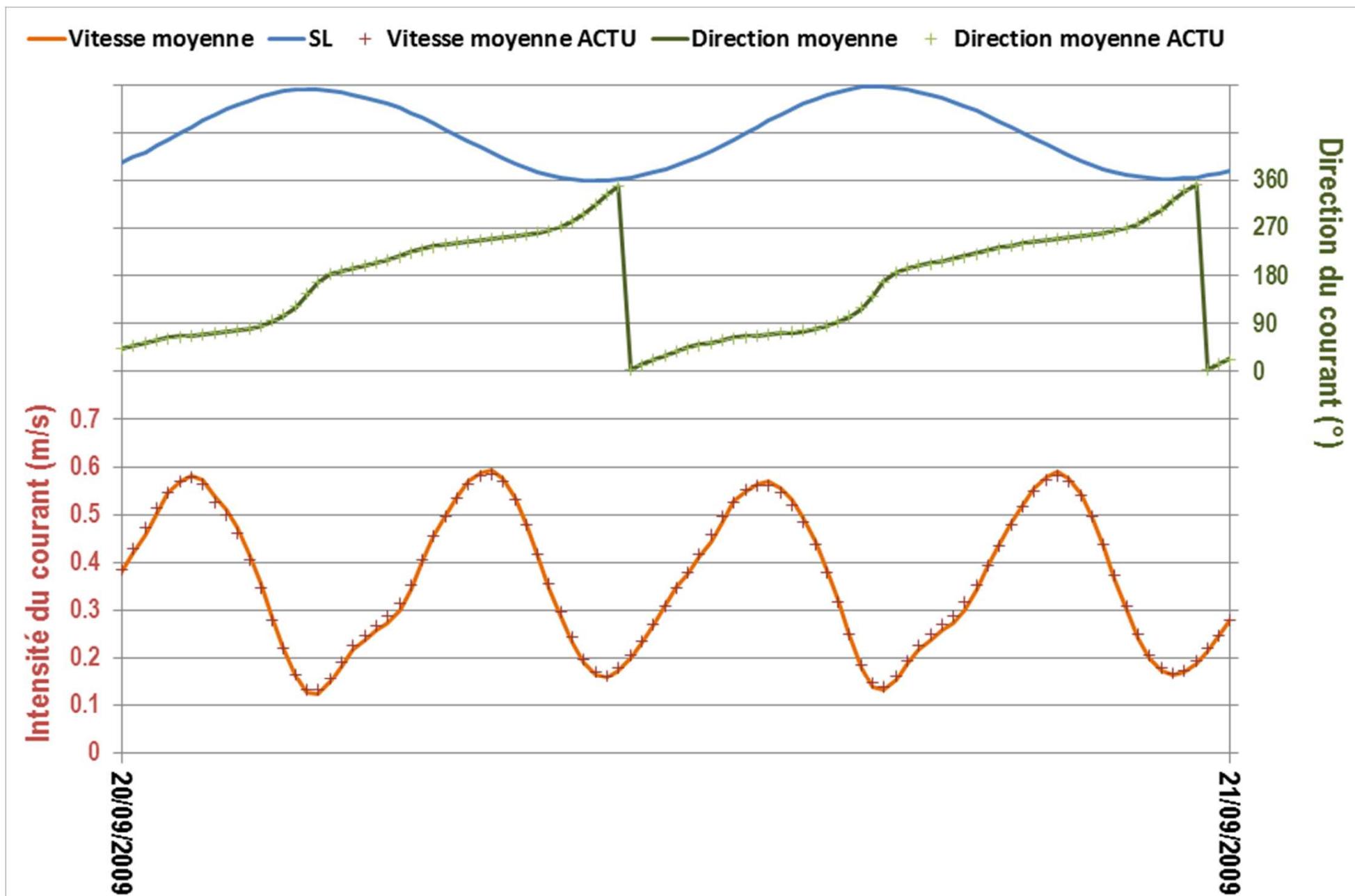
---

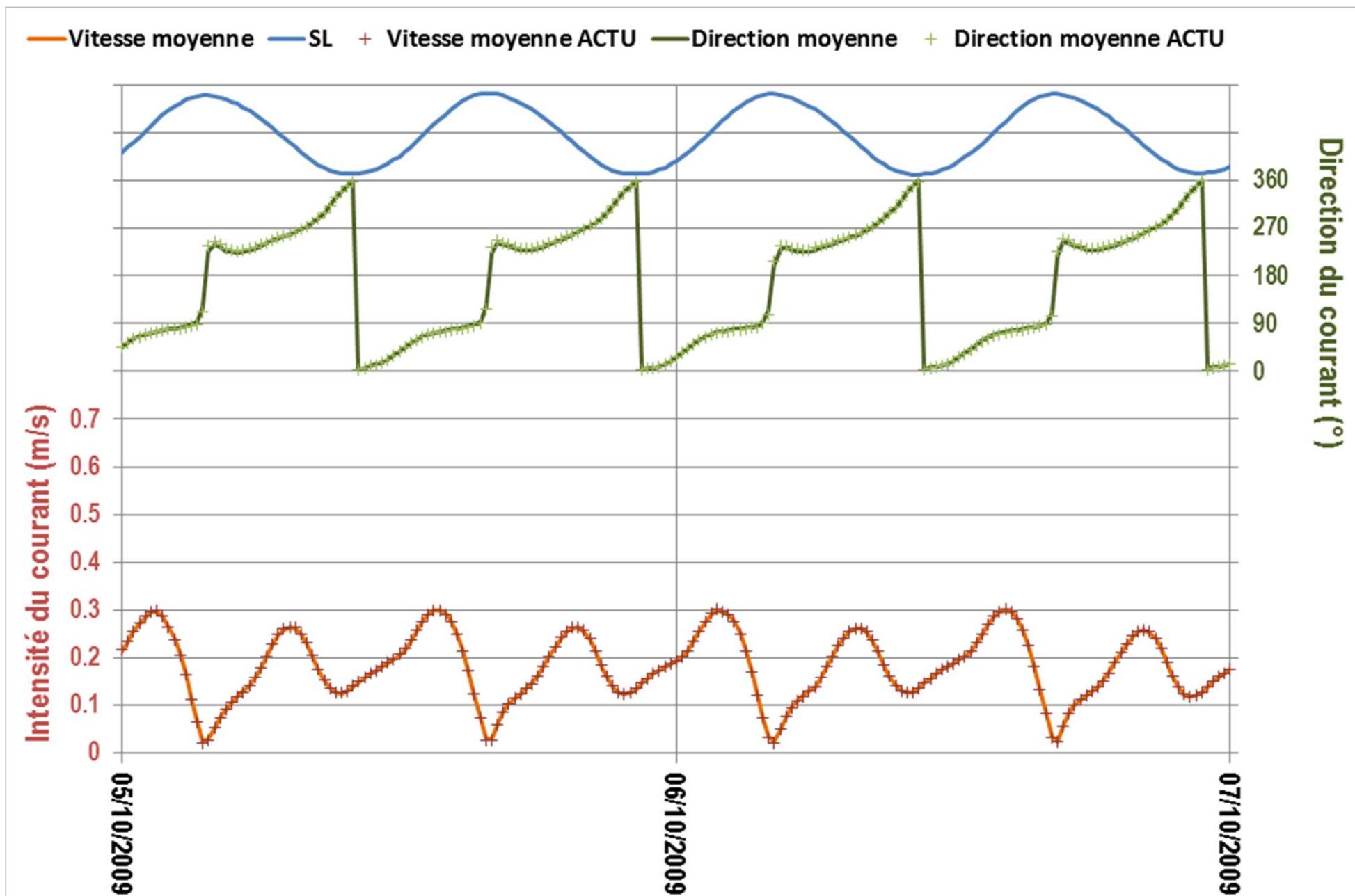
**SÉRIES TEMPORELLES DE NIVEAU ET COURANTS  
ÉTAT ACTUEL ET ÉTAT AMÉNAGÉ**

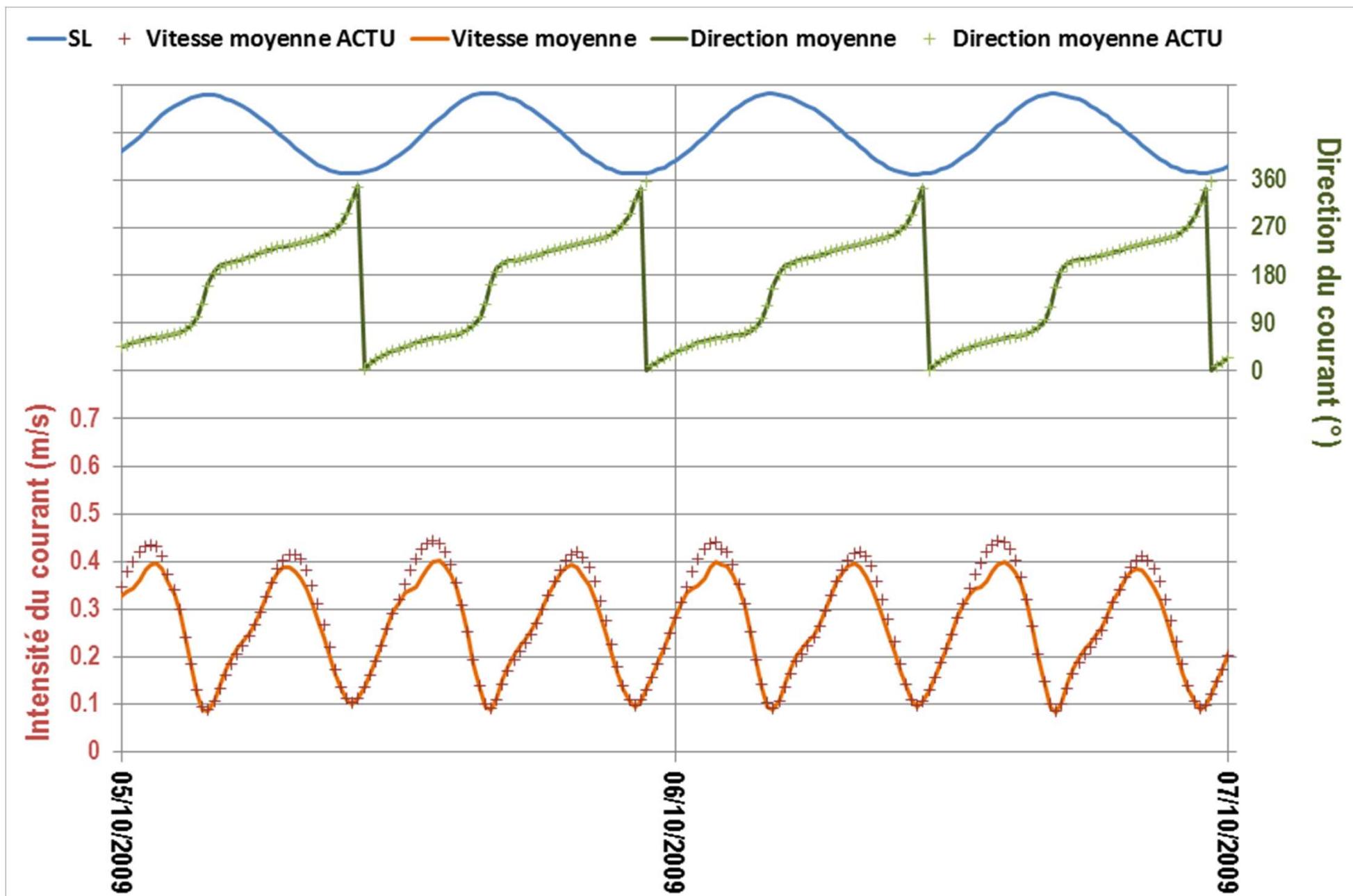


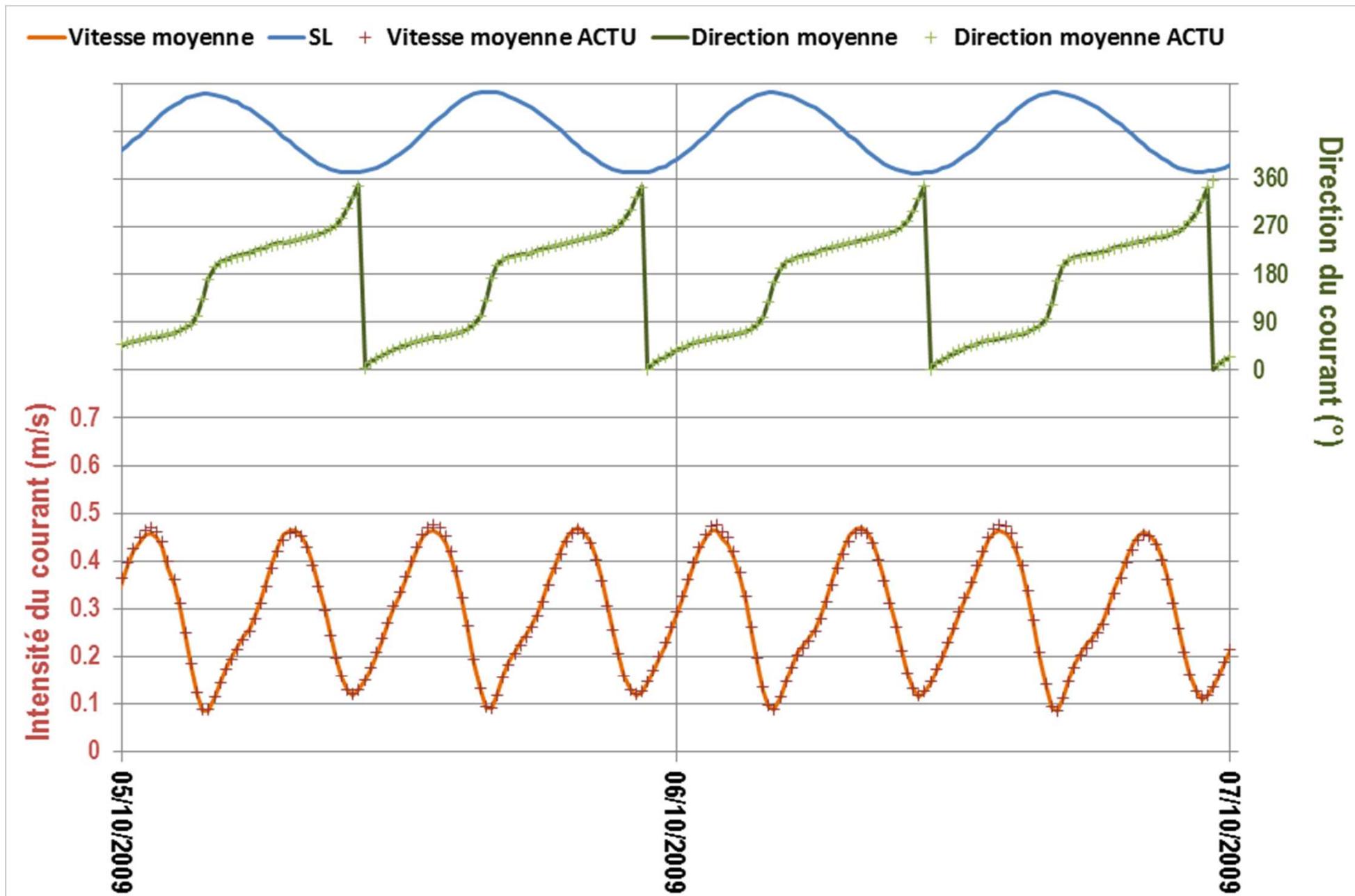


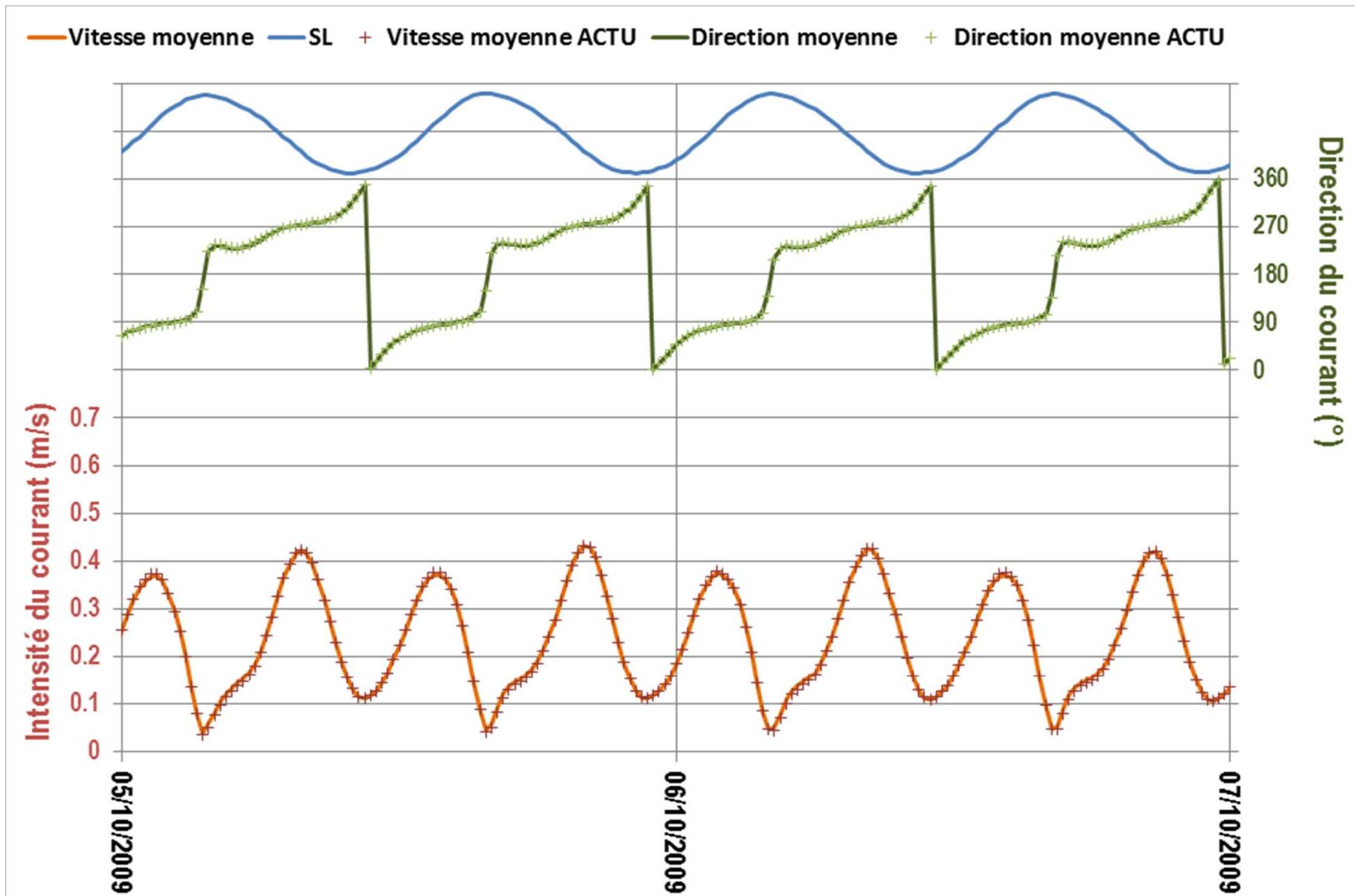










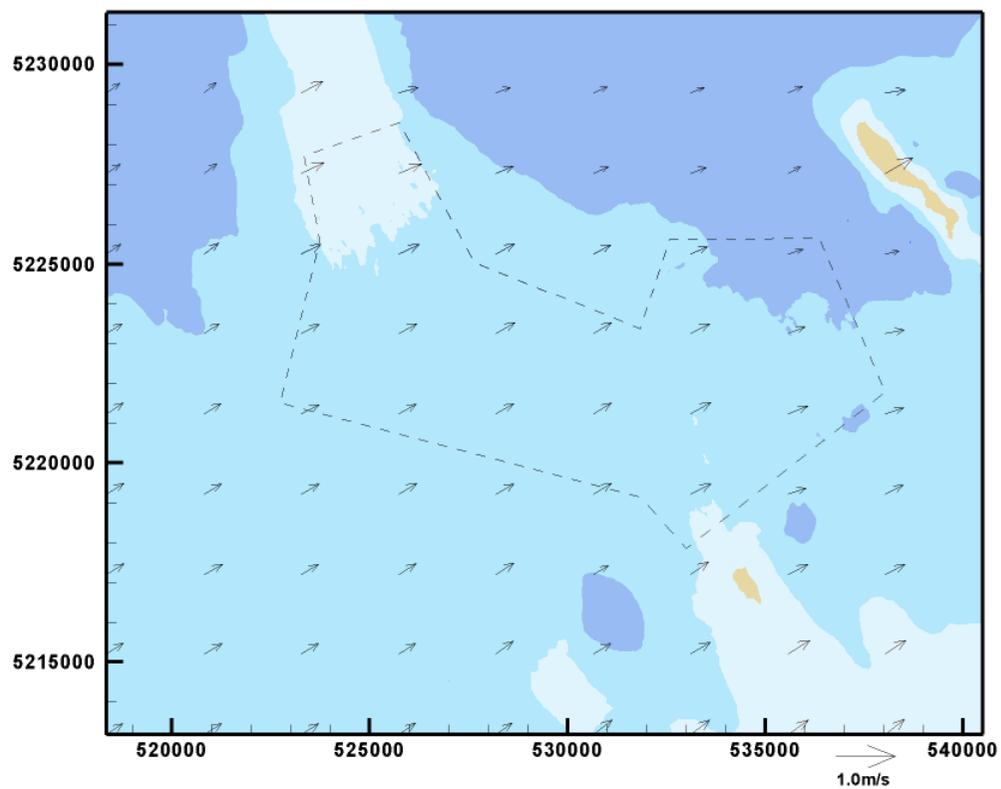


---

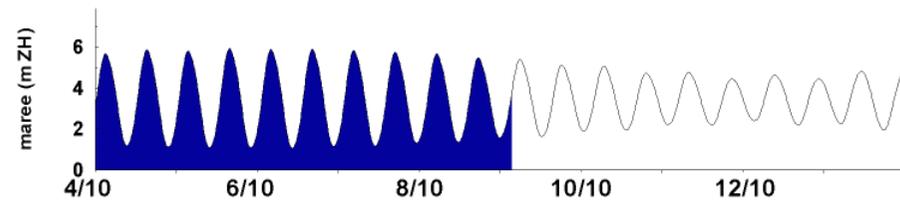
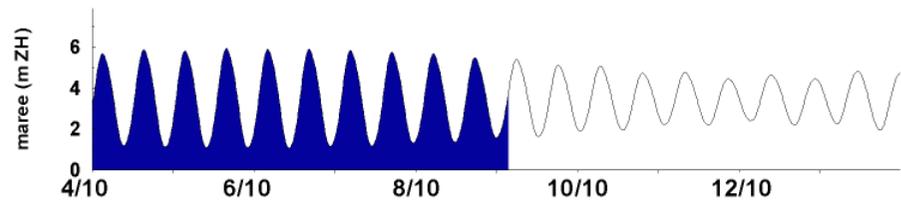
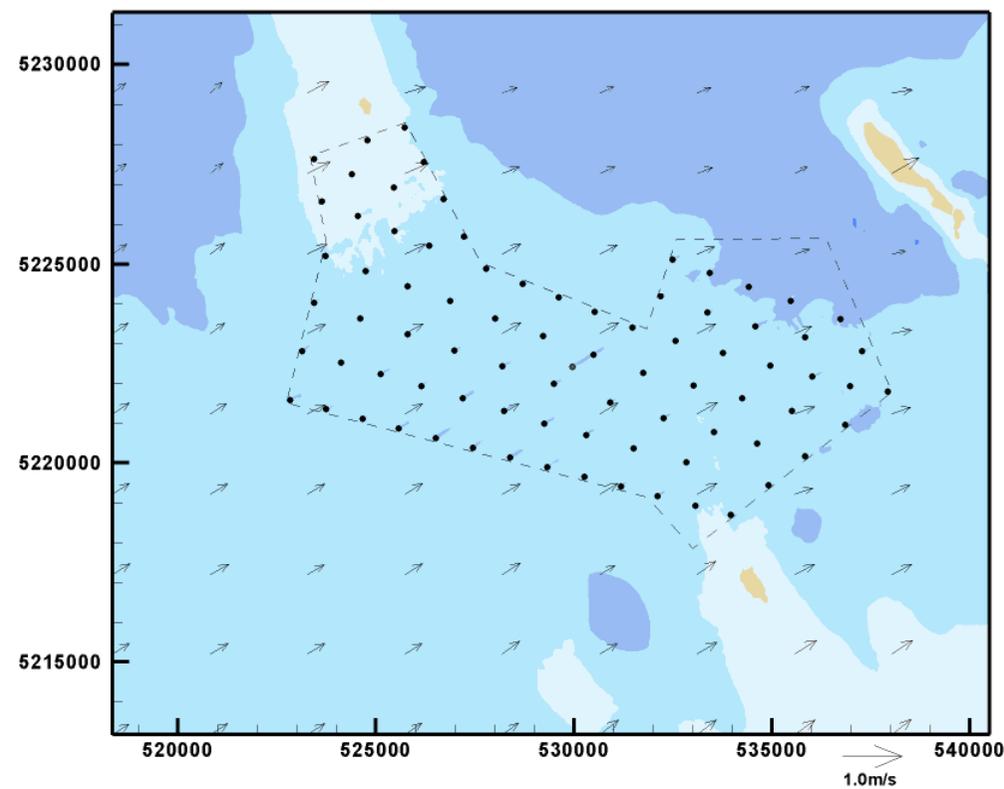
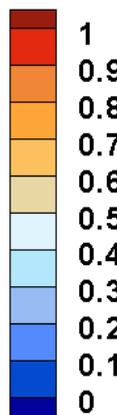
**CHAMPS DE COURANT AUX PICS DE FLOT ET DE JUSANT POUR UNE  
MARÉE DE VIVES-EAUX DE COEFFICIENT 73  
ETAT ACTUEL ET ETAT AMÉNAGÉ**

ACTUEL

PROJET



m/s

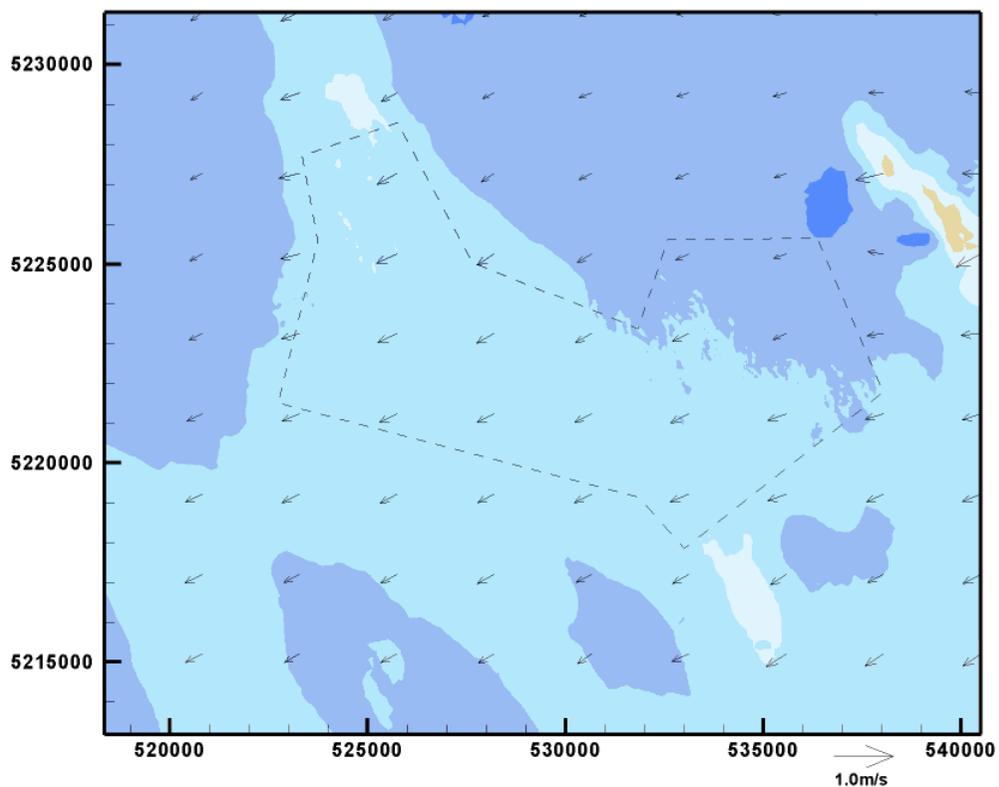


BM+3

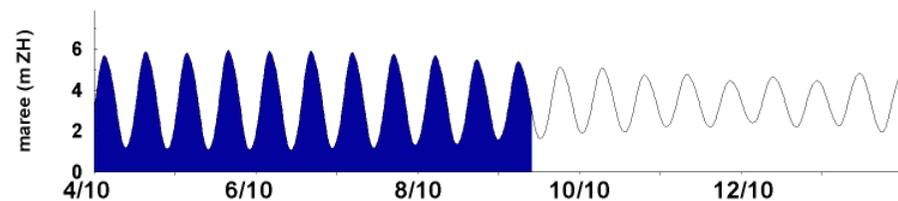
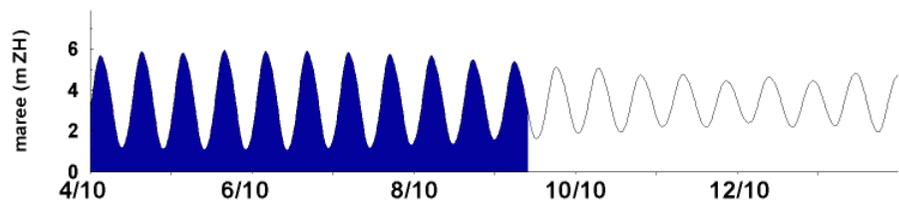
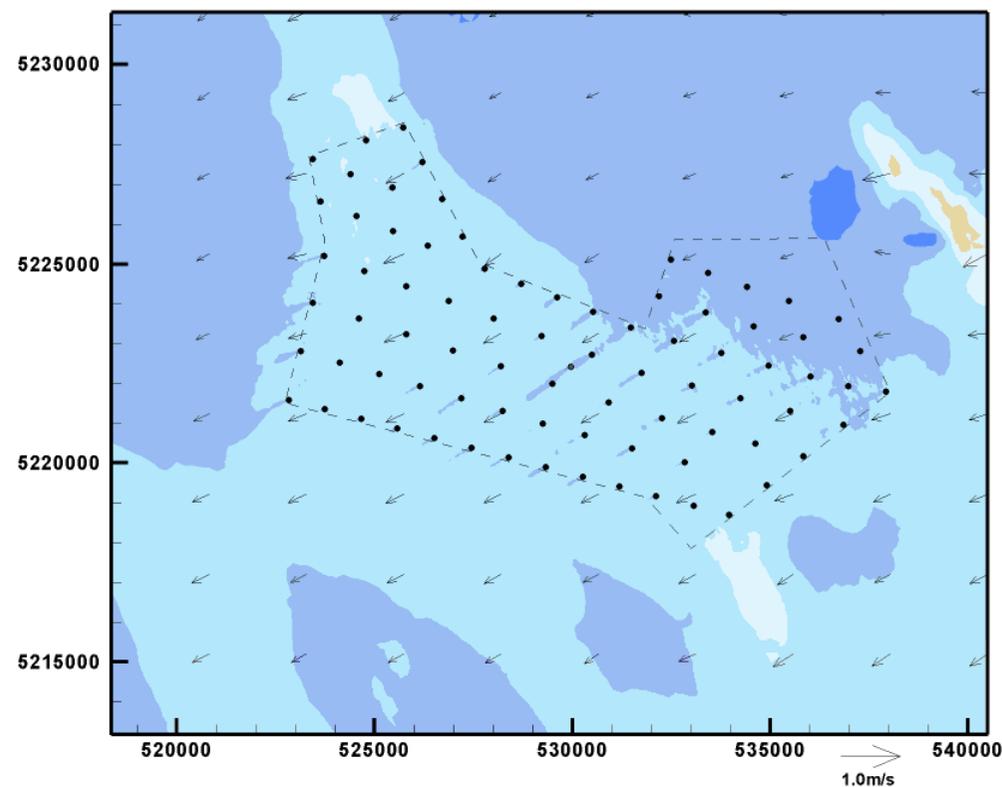
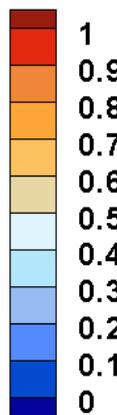
BM+3

ACTUEL

PROJET



m/s

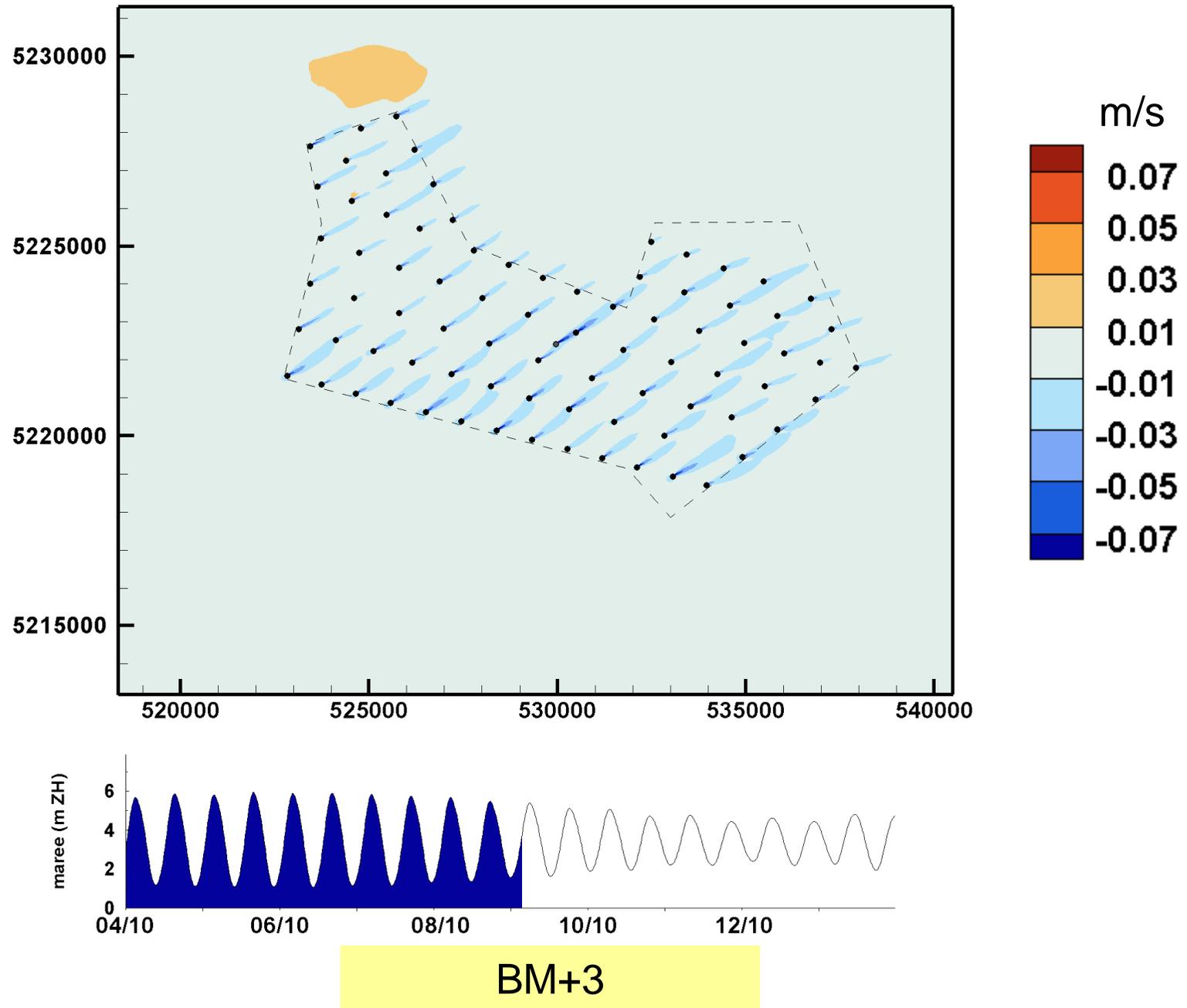


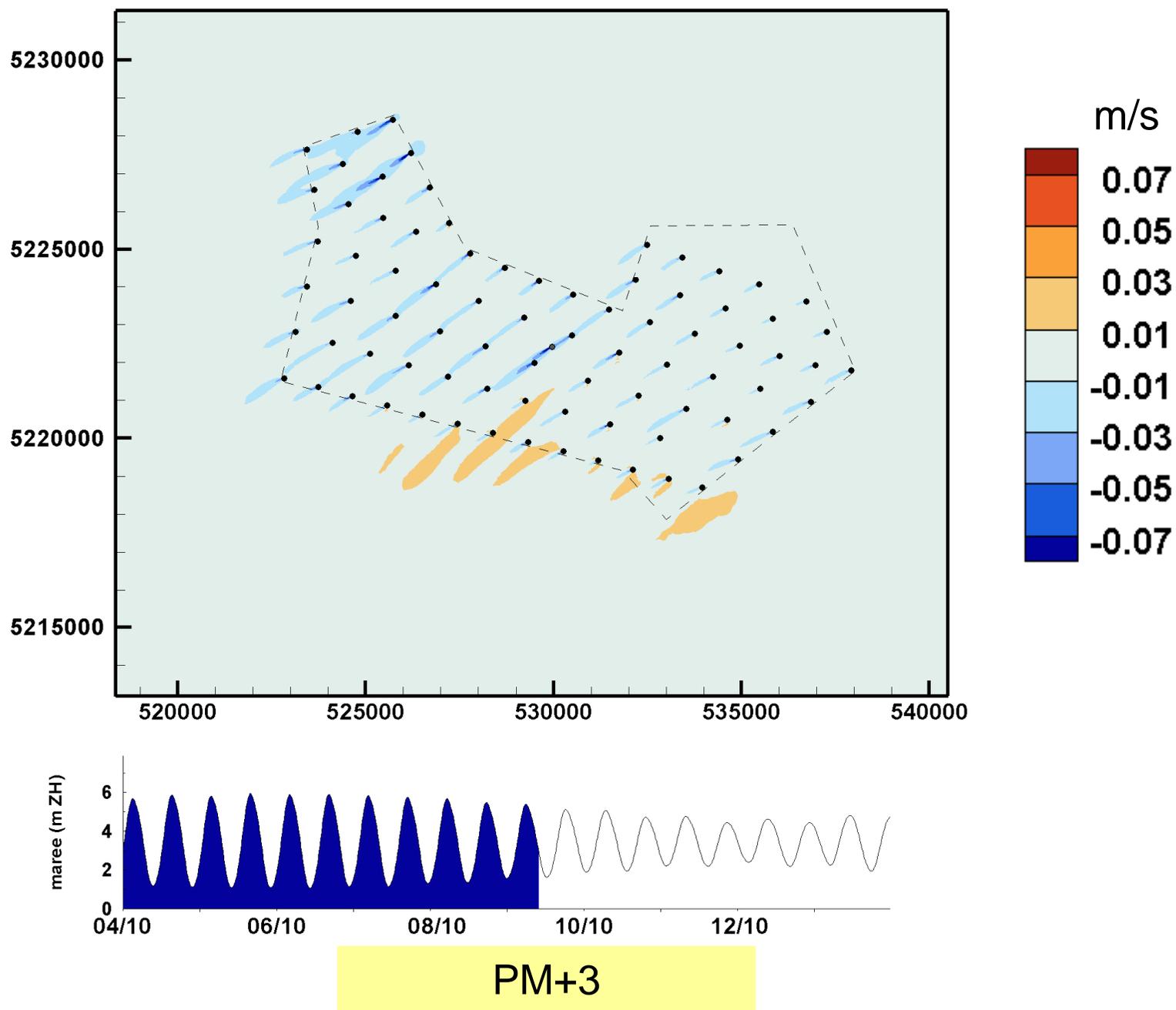
PM+3

PM+3

---

**DIFFÉRENTIEL DE COURANTS AUX PICS DE FLOT ET DE JUSANT POUR UNE  
MARÉE DE VIVES-EAUX DE COEFFICIENT 73  
ETAT AMÉNAGÉ - ÉTAT ACTUEL**



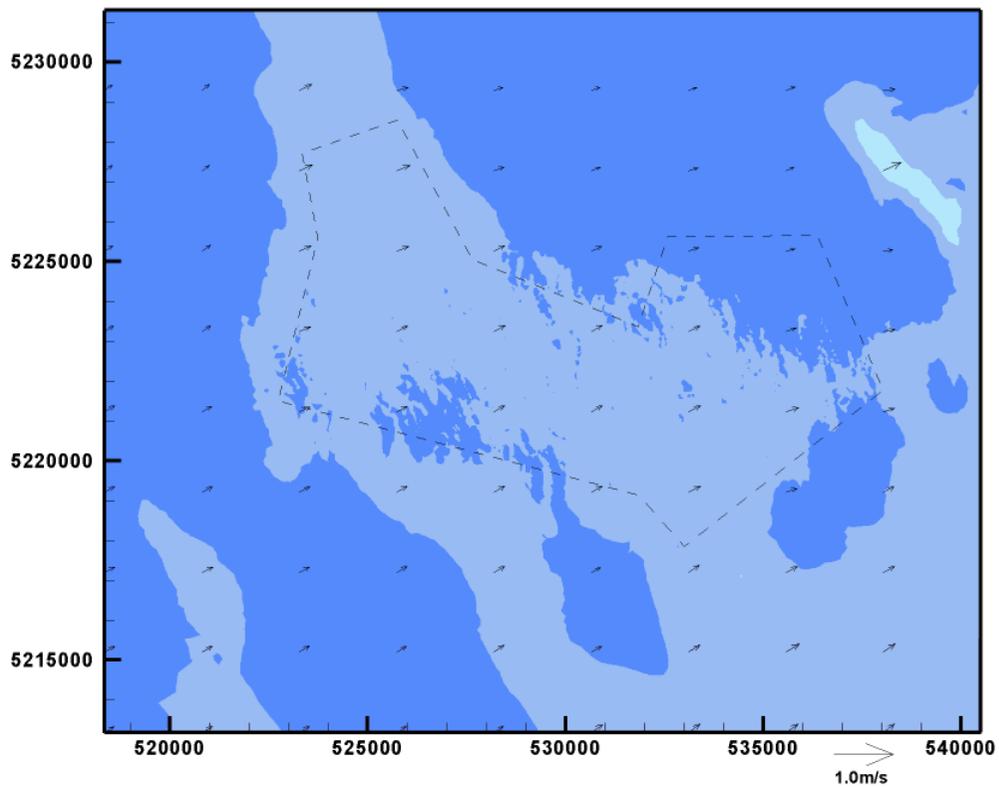


---

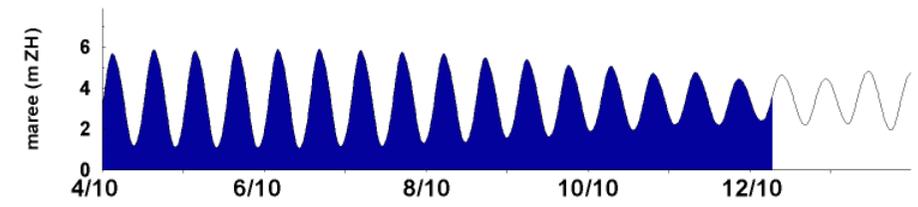
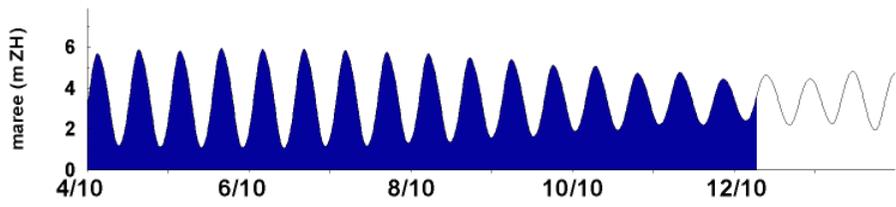
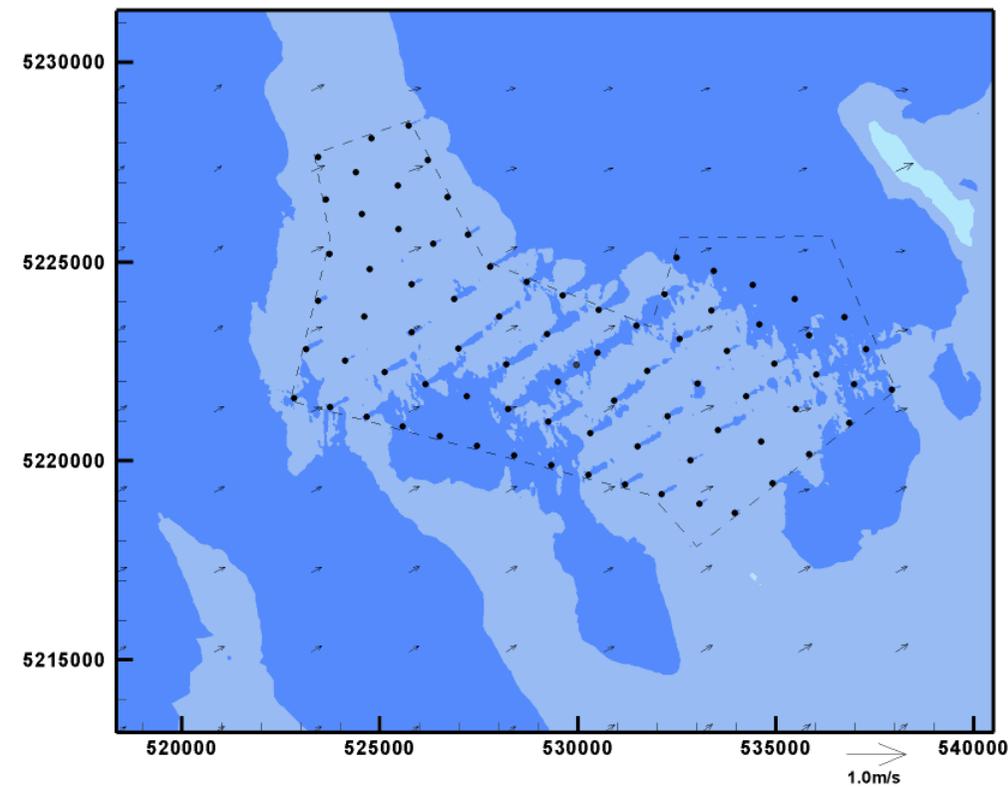
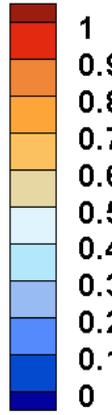
**CHAMPS DE COURANT AUX PICS DE FLOT ET DE JUSANT POUR UNE  
MARÉE DE VIVES-EAUX DE COEFFICIENT 43  
ETAT ACTUEL ET ETAT AMÉNAGÉ**

ACTUEL

PROJET



m/s

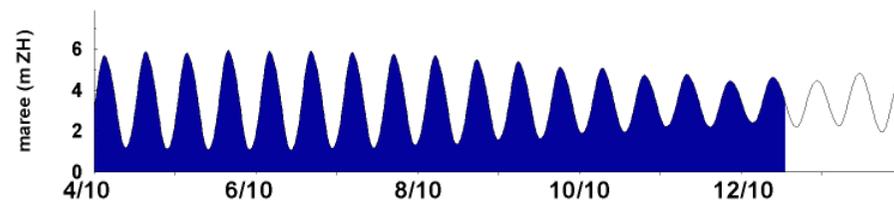
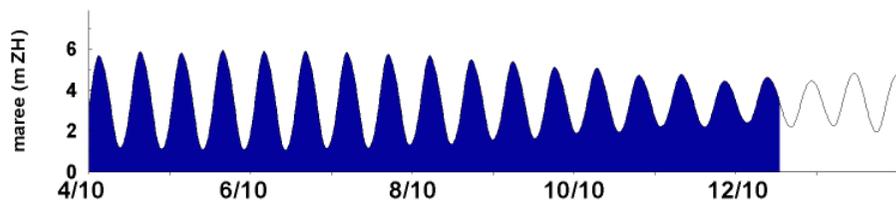
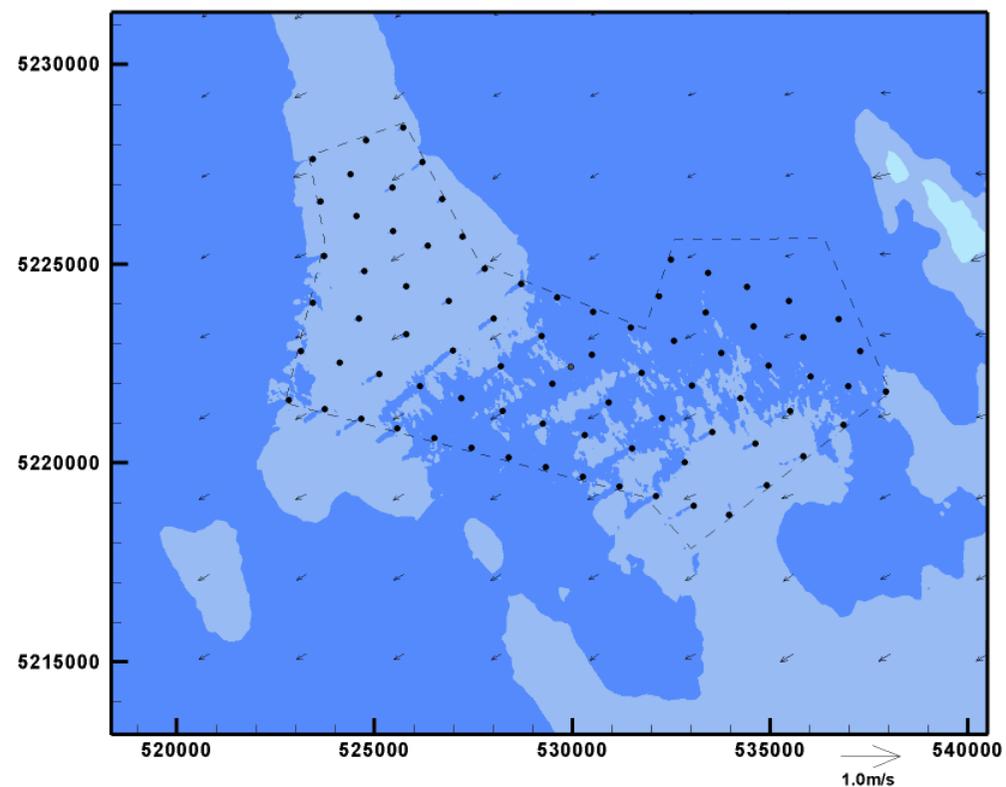
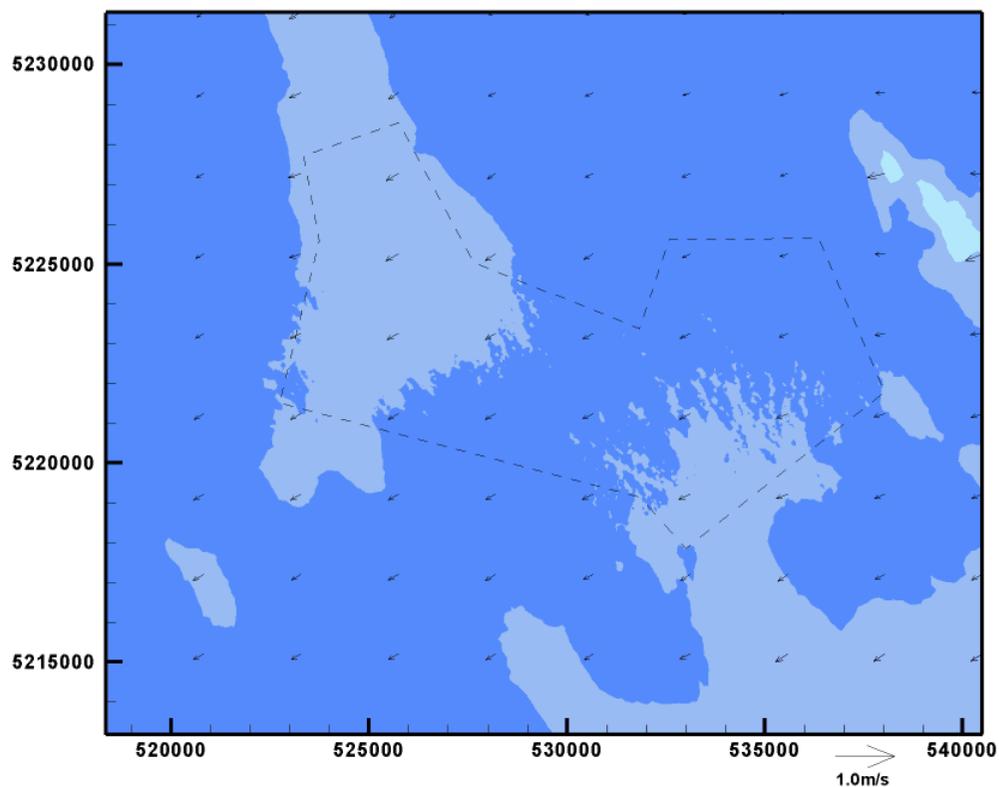


BM+3

BM+3

ACTUEL

PROJET

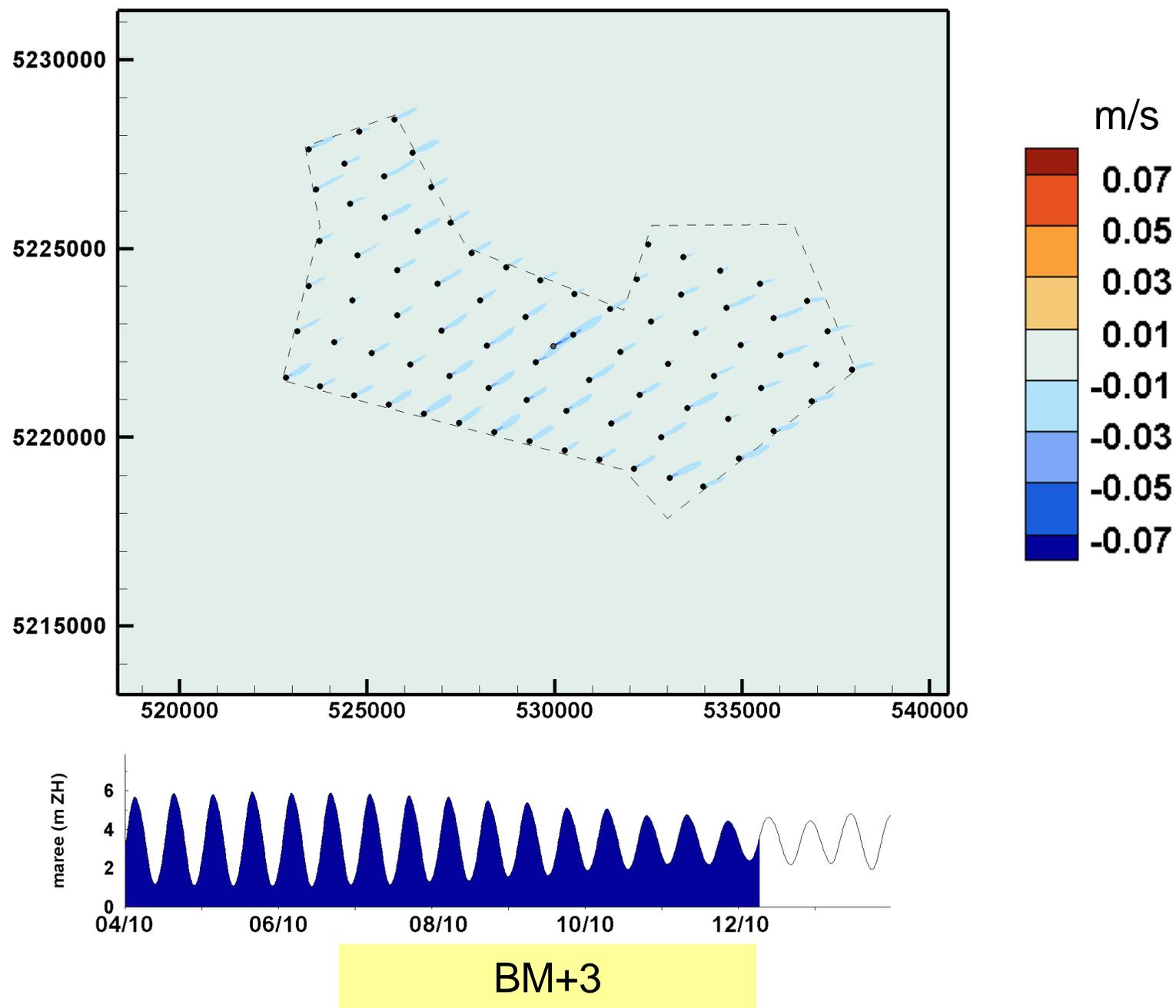


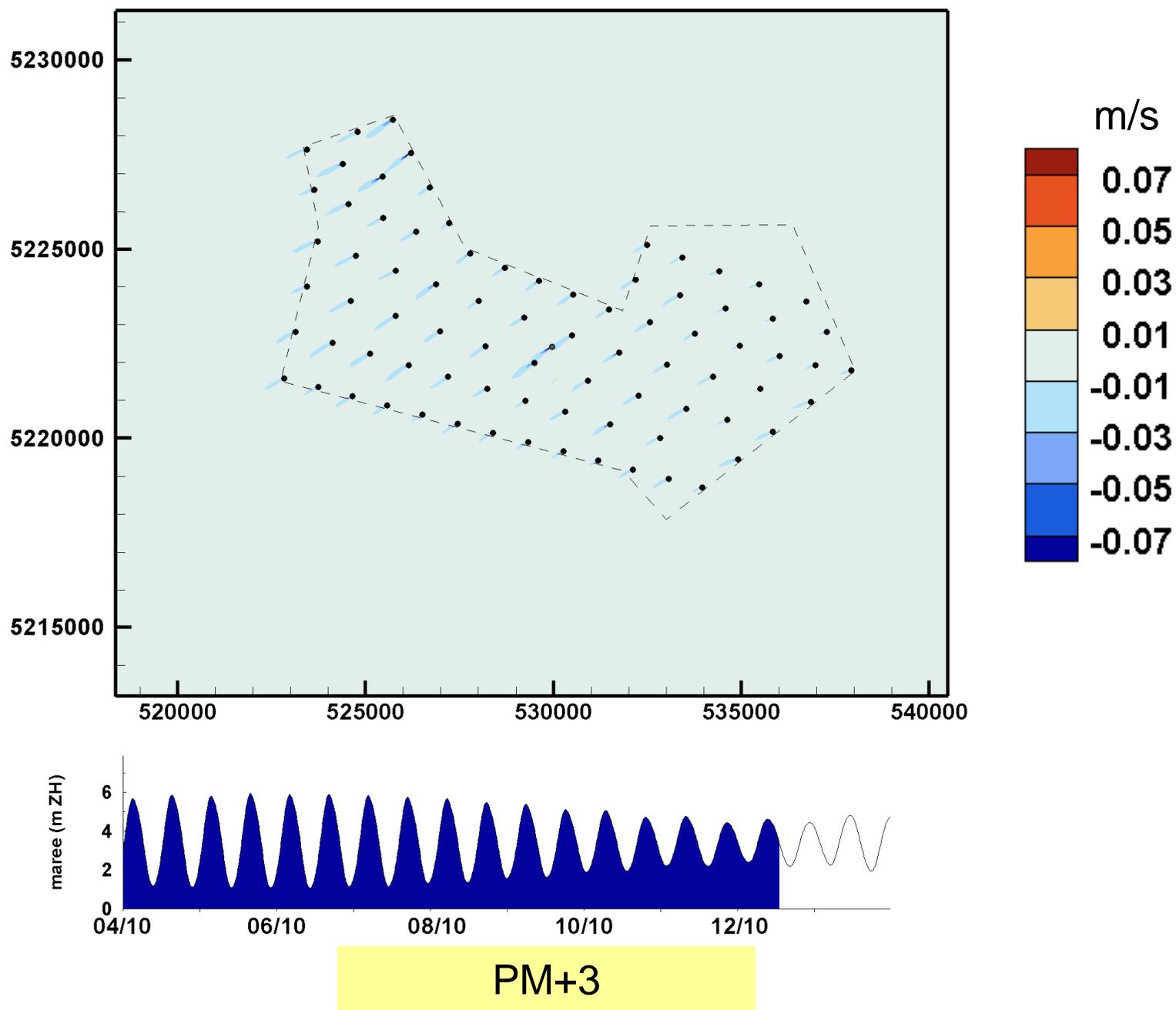
PM+3

PM+3

---

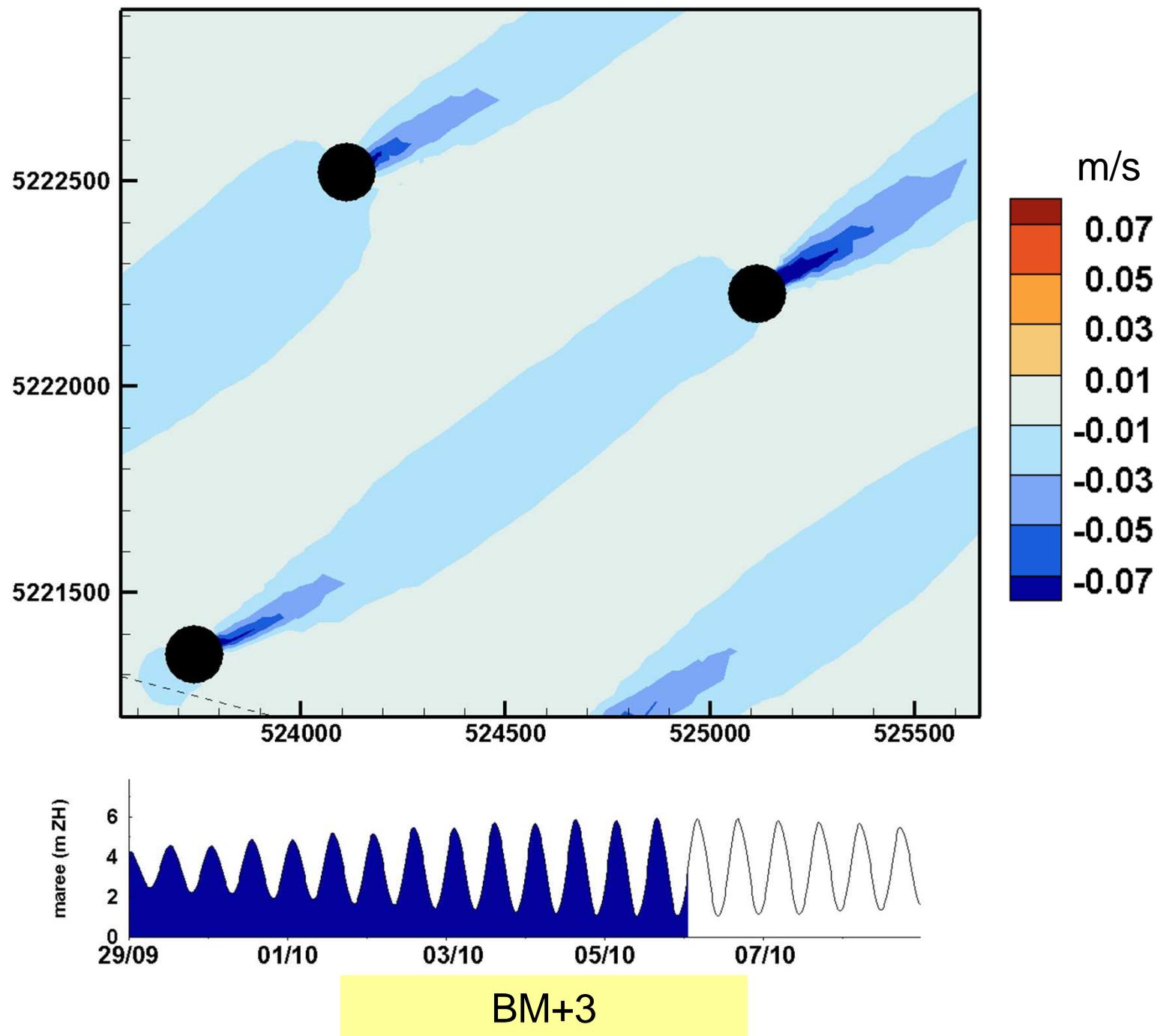
**DIFFÉRENTIEL DE COURANTS AUX PICS DE FLOT ET DE JUSANT POUR UNE  
MARÉE DE VIVES-EAUX DE COEFFICIENT 43  
ETAT AMÉNAGÉ - ÉTAT ACTUEL**

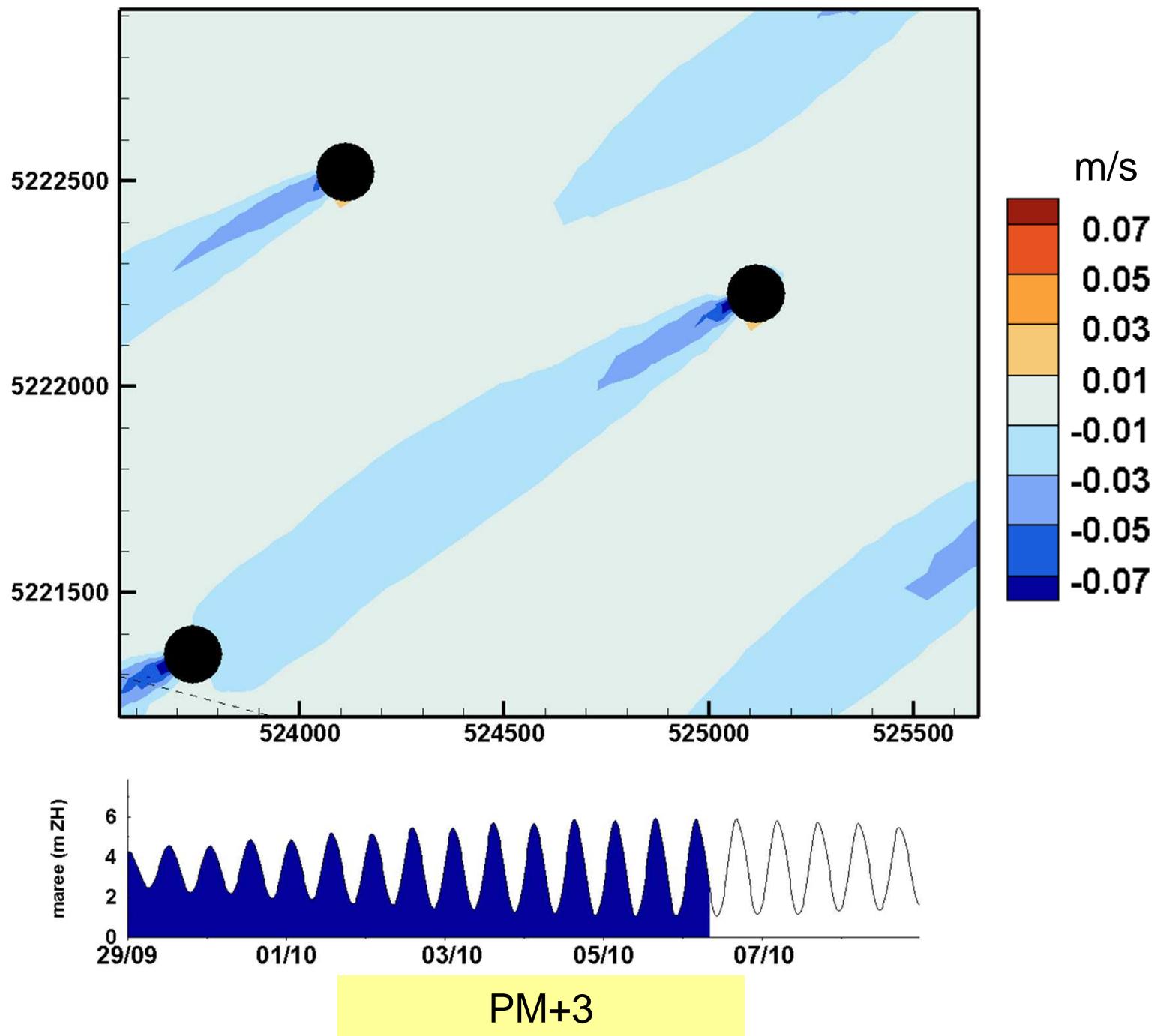




---

**ZOOM SUR LE DIFFÉRENTIEL DES VITESSES DE COURANT (ETAT  
AMÉNAGÉ – ETAT ACTUEL)**





**ANNEXE D**  
**FIGURES CHAPITRE 3 – EPURES DE  
PROPAGATION (MODELISATION DE LA  
HOULE)**

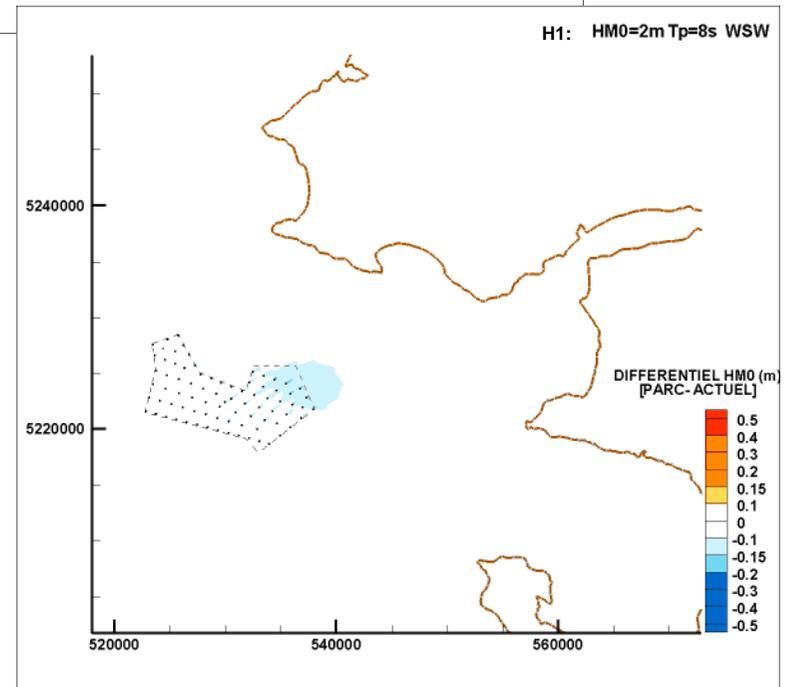
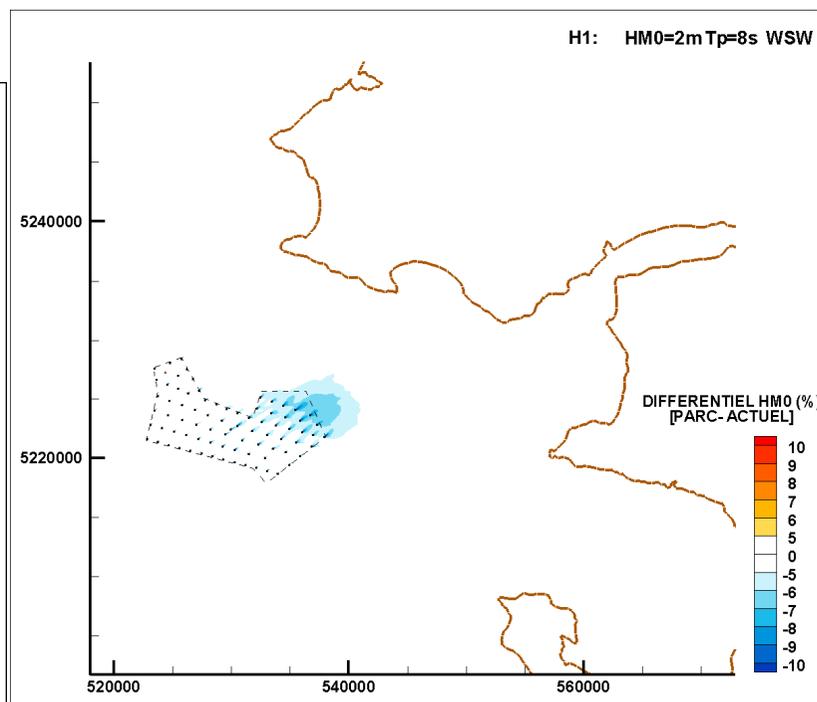
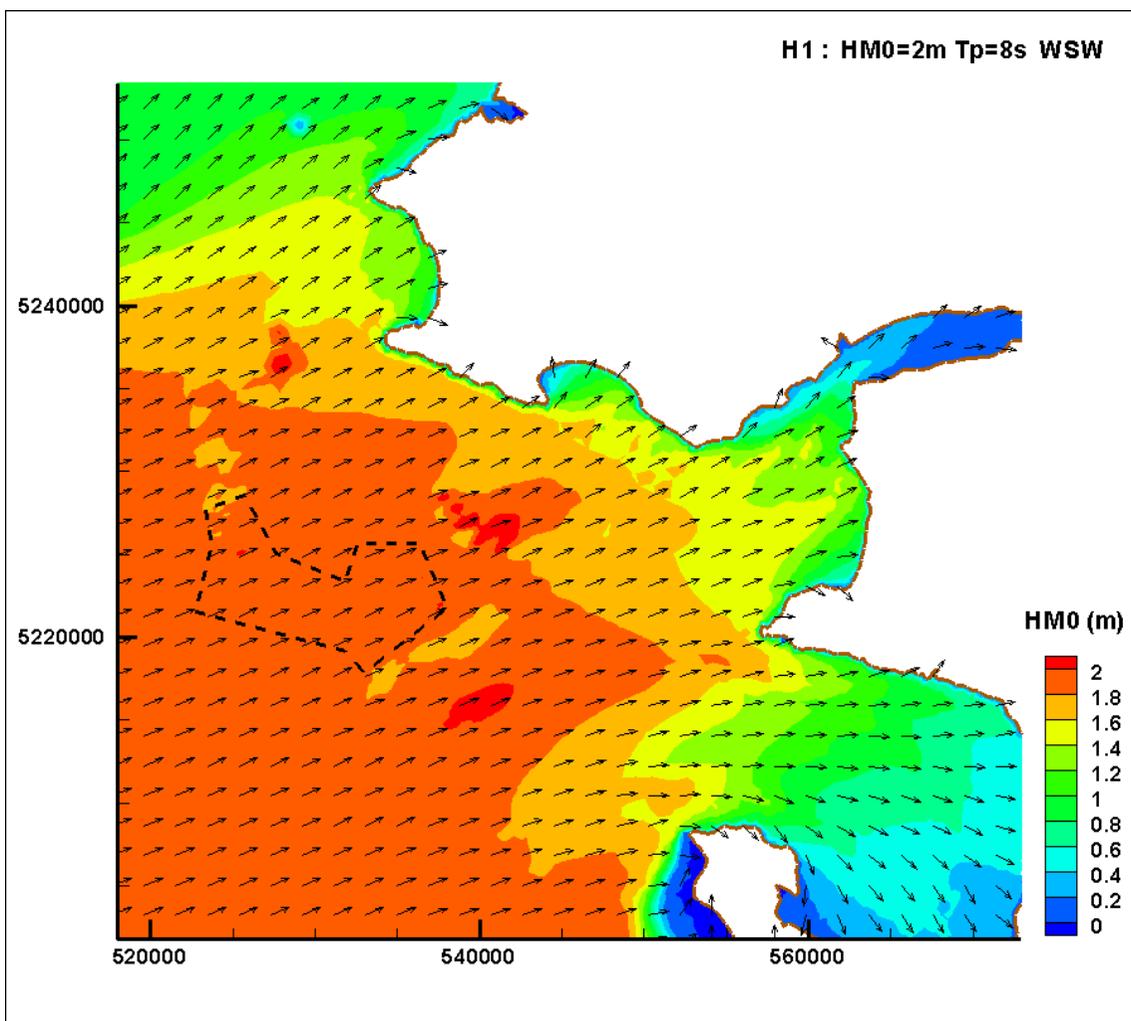
---

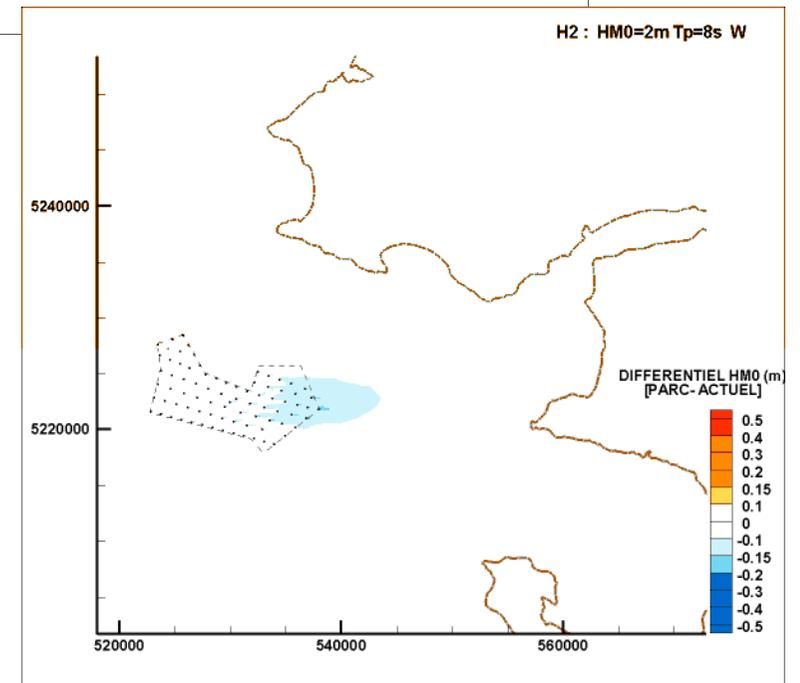
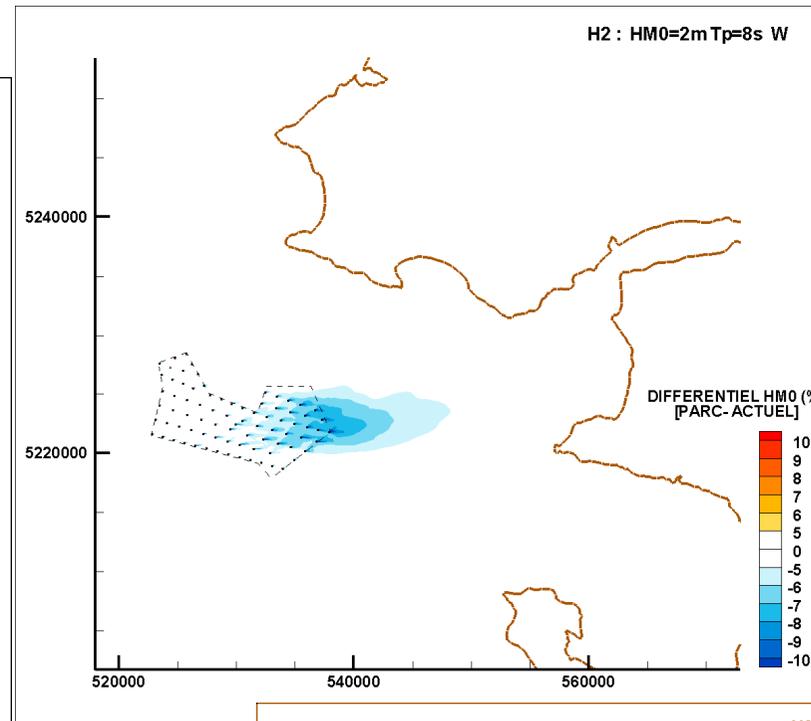
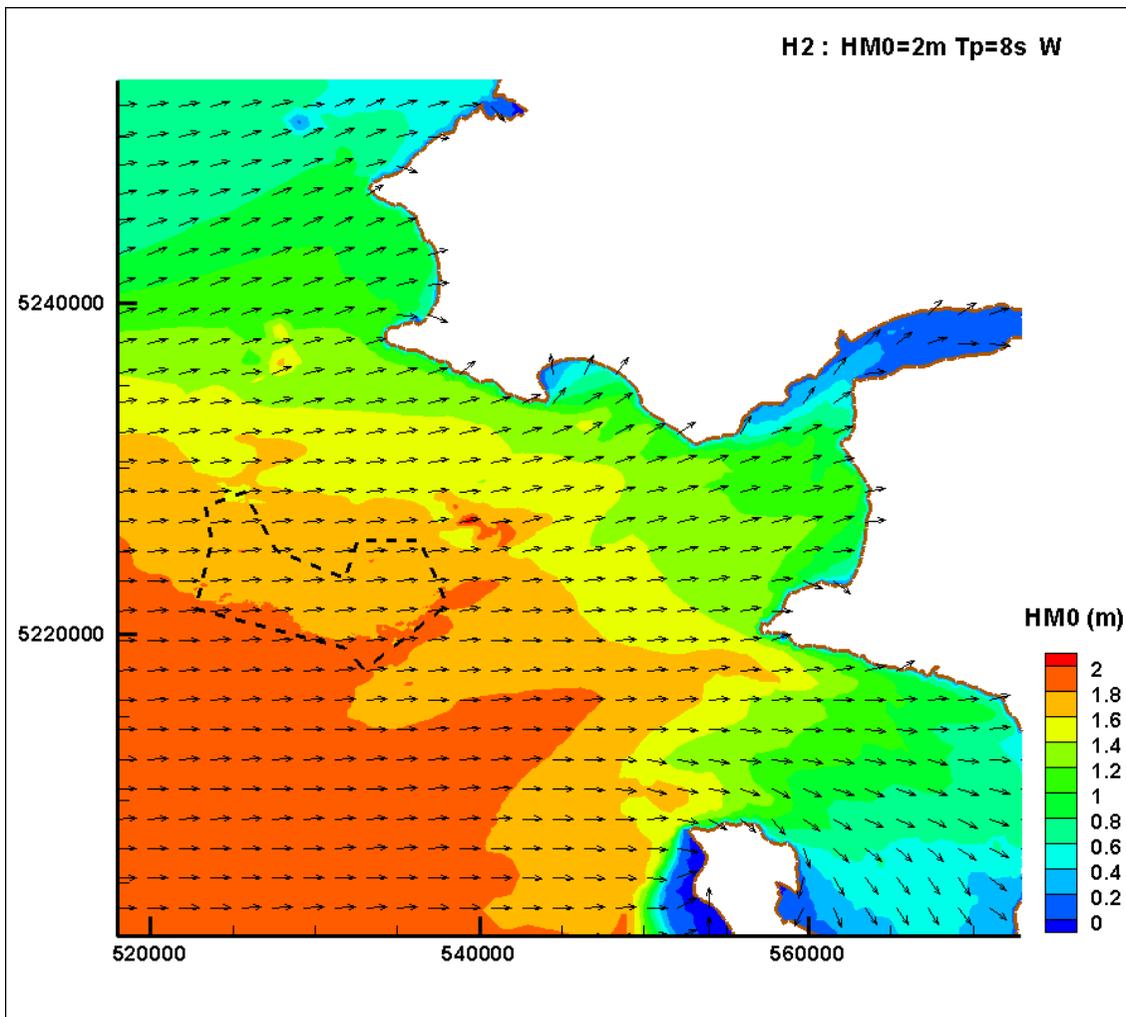
# Parc Eolien du Banc du Guérande

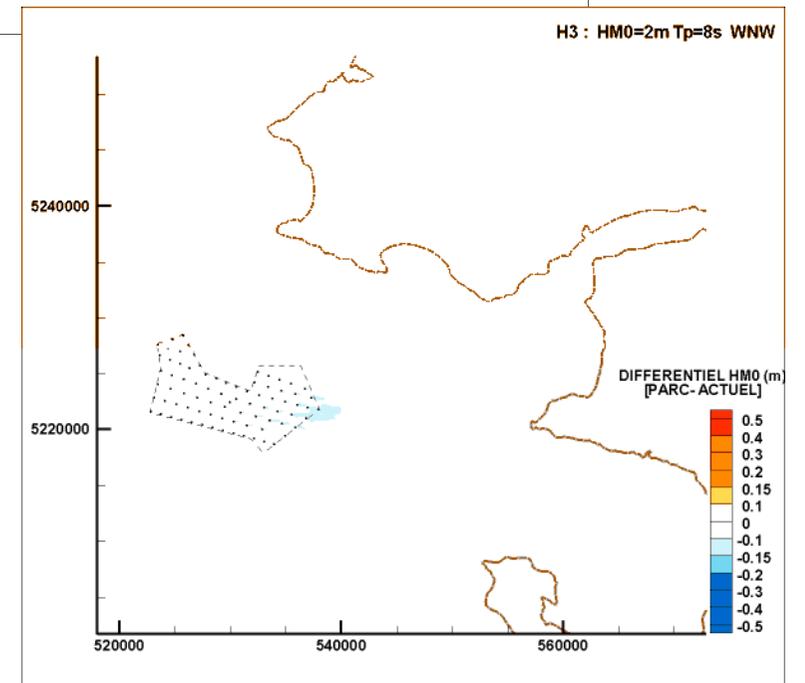
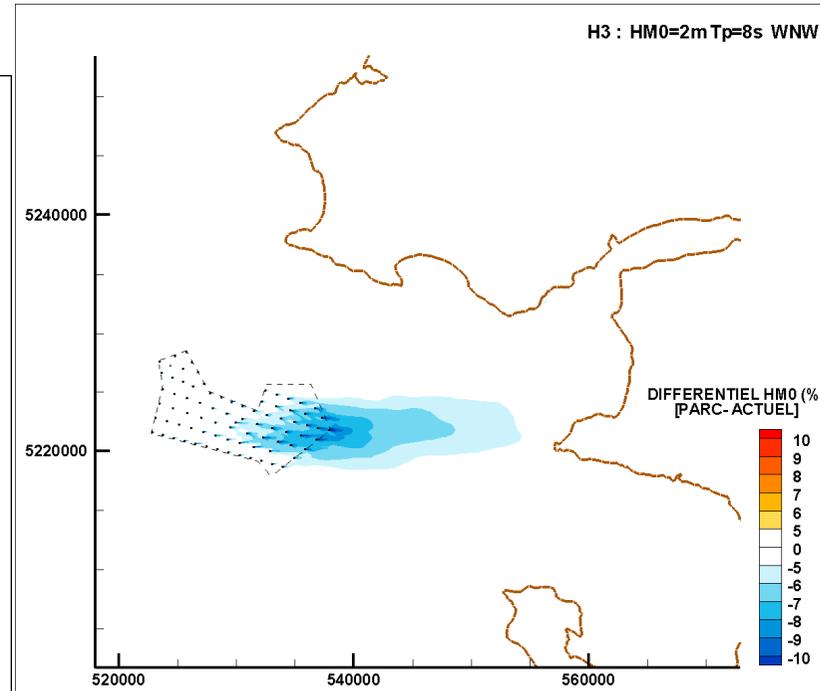
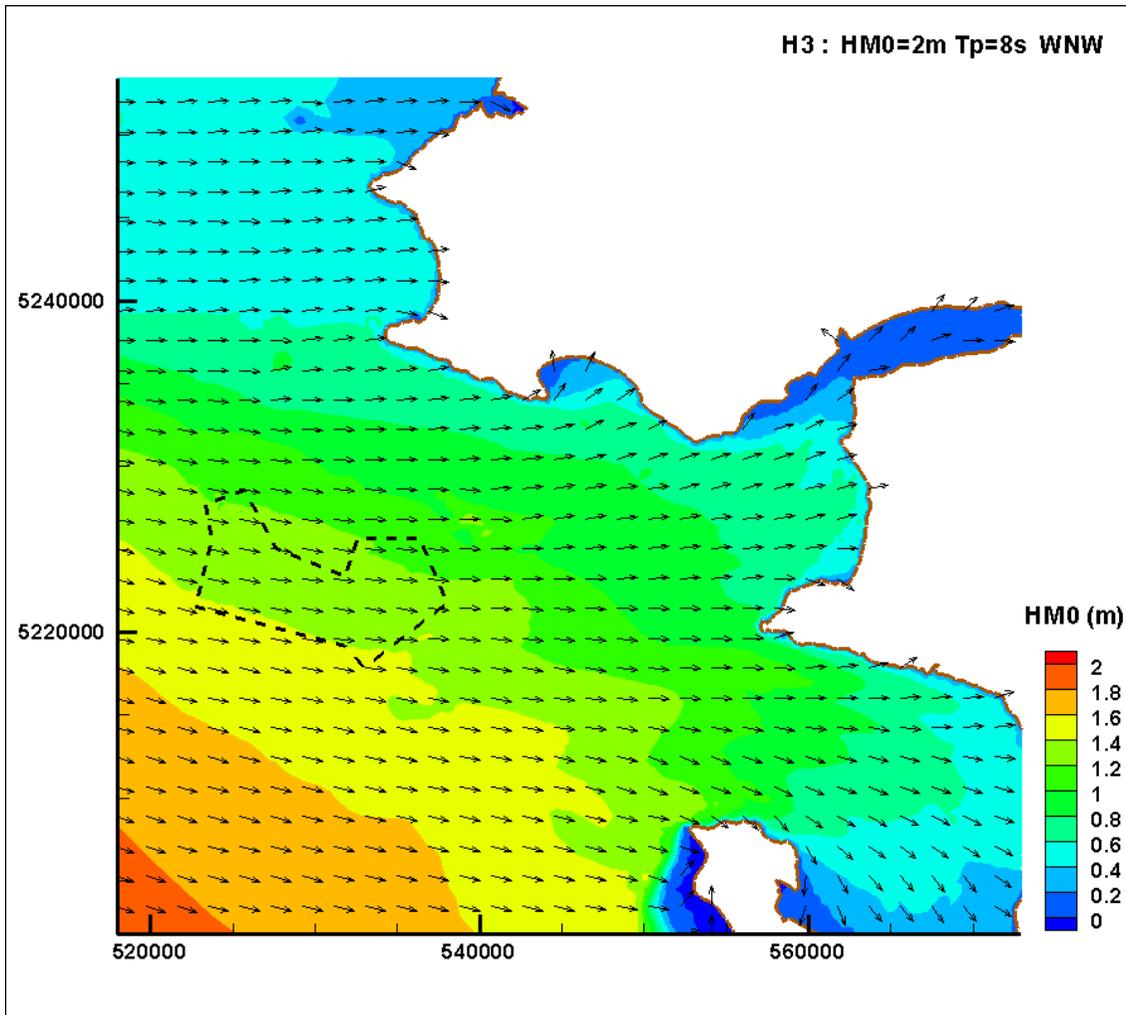
**Lot : hydrodynamisme – hydrosédimentaire**

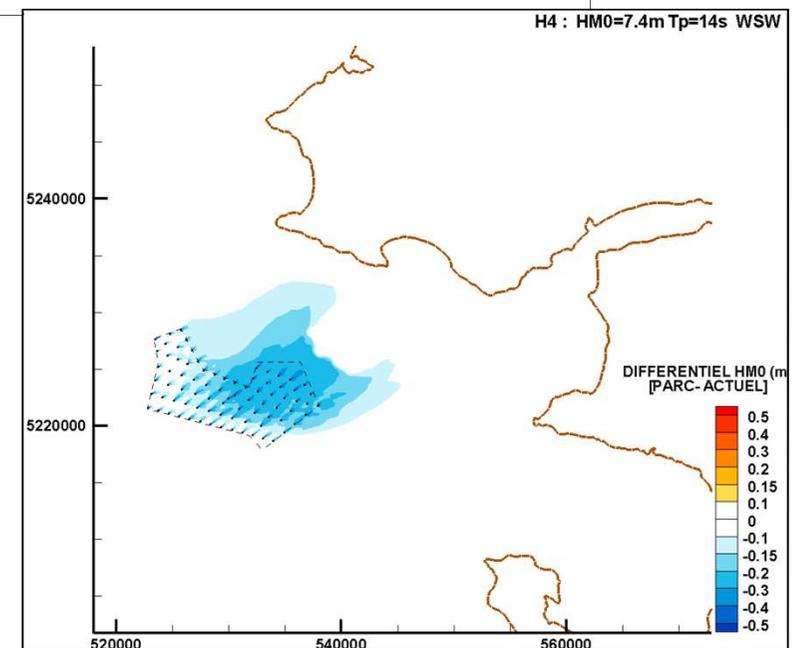
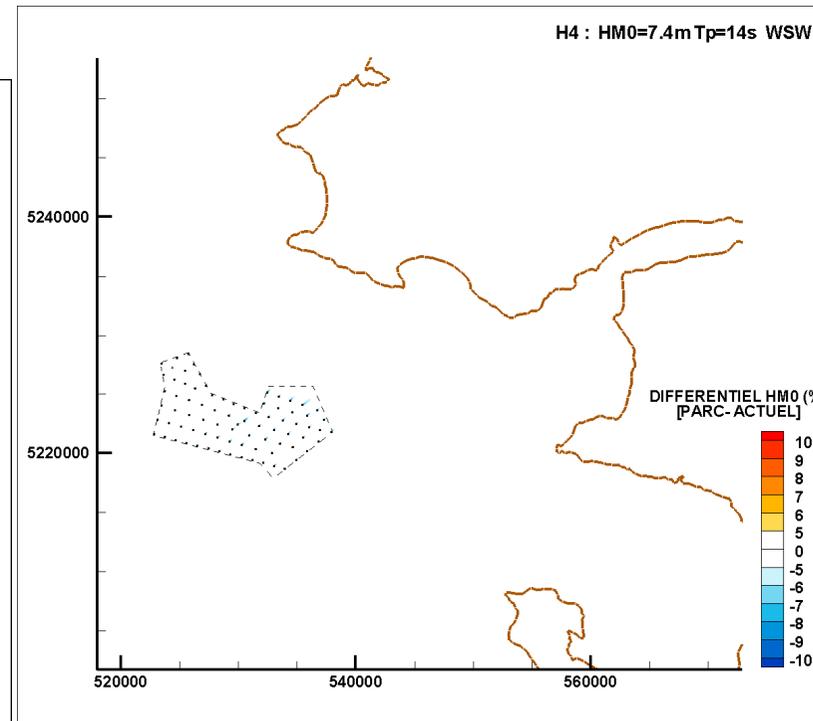
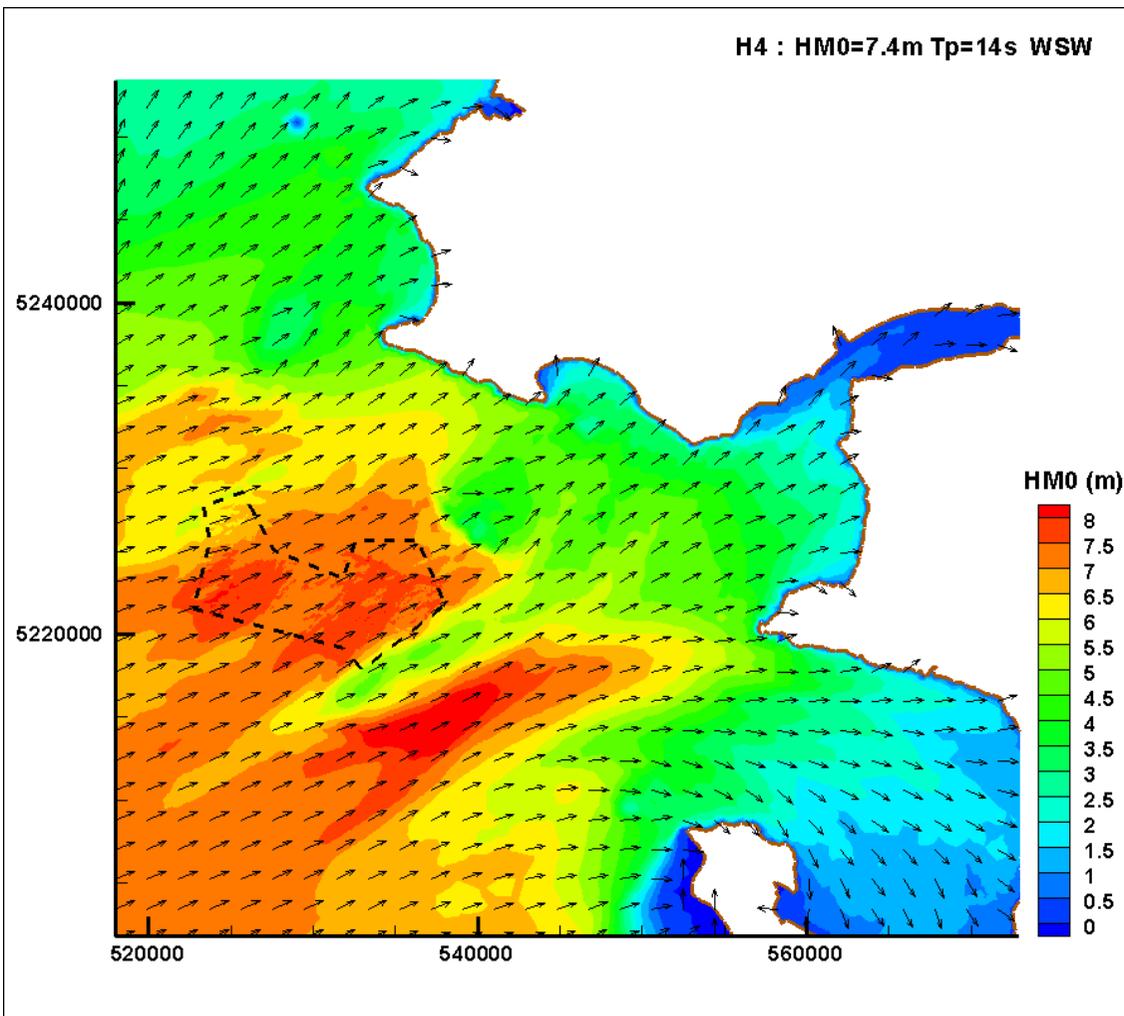
**Annexe D : Epures de propagation  
Fondations monopieu (diamètre 7 m)**

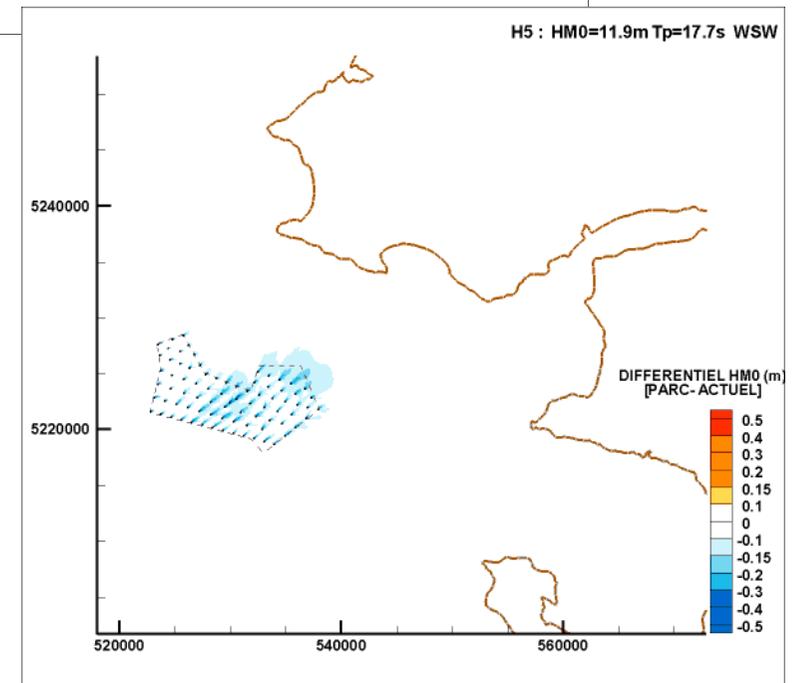
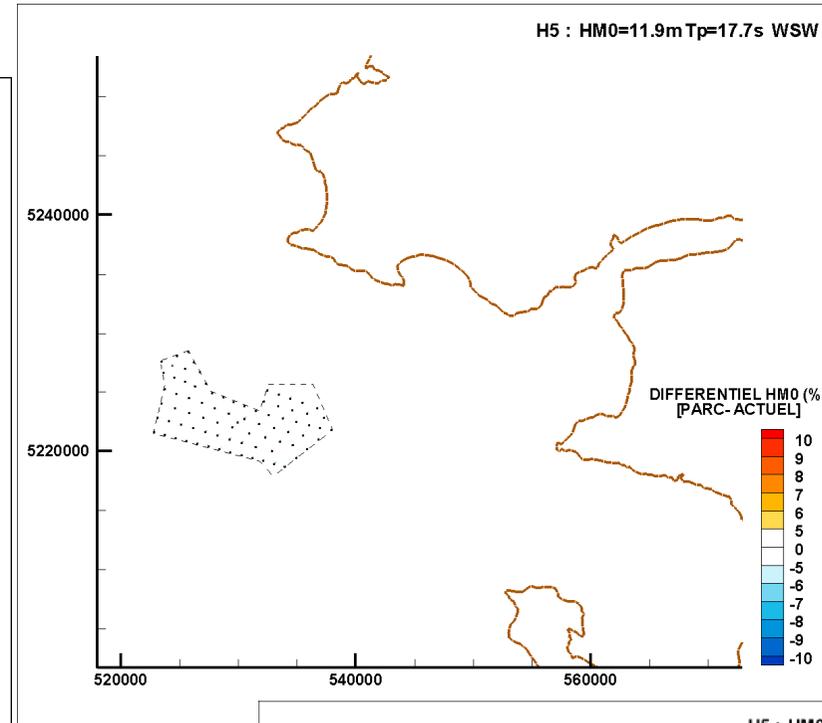
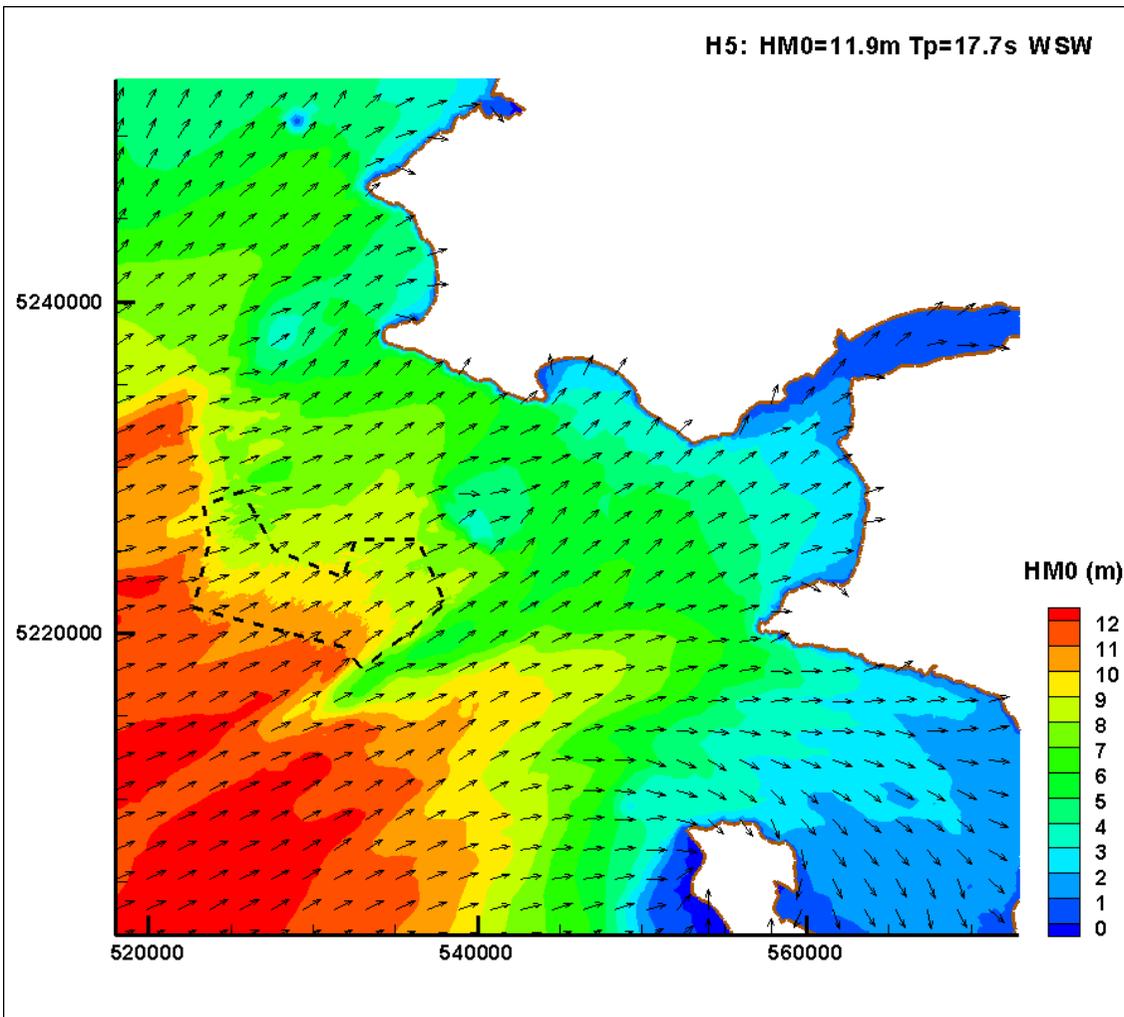












**ANNEXE E**  
**FIGURES CHAPITRE 6 – CARTES DE**  
**CONDITIONS DE SOL**

---

# Parc Eolien du Banc du Guérande

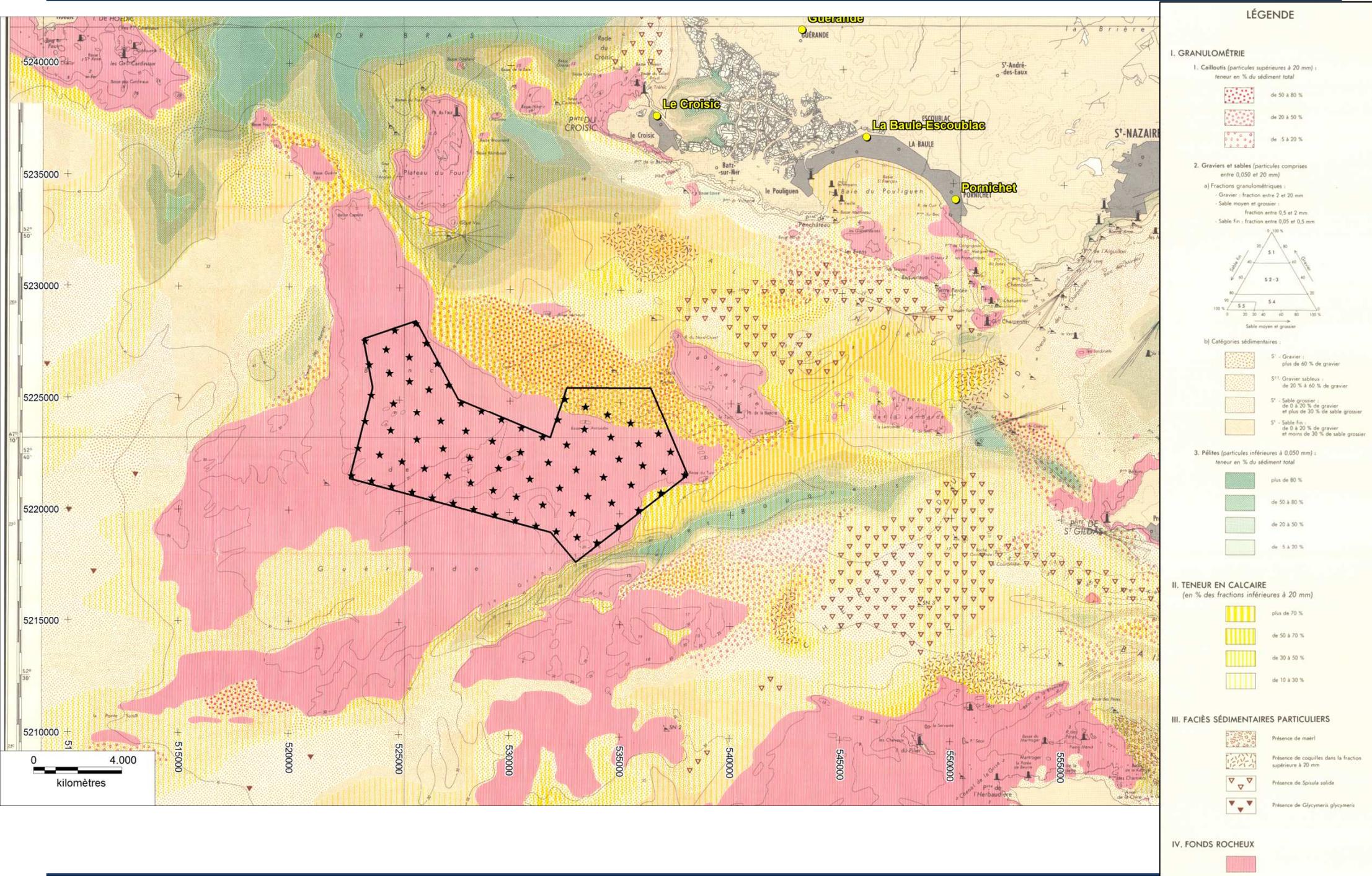
**Lot : hydrodynamisme – hydrosédimentaire**

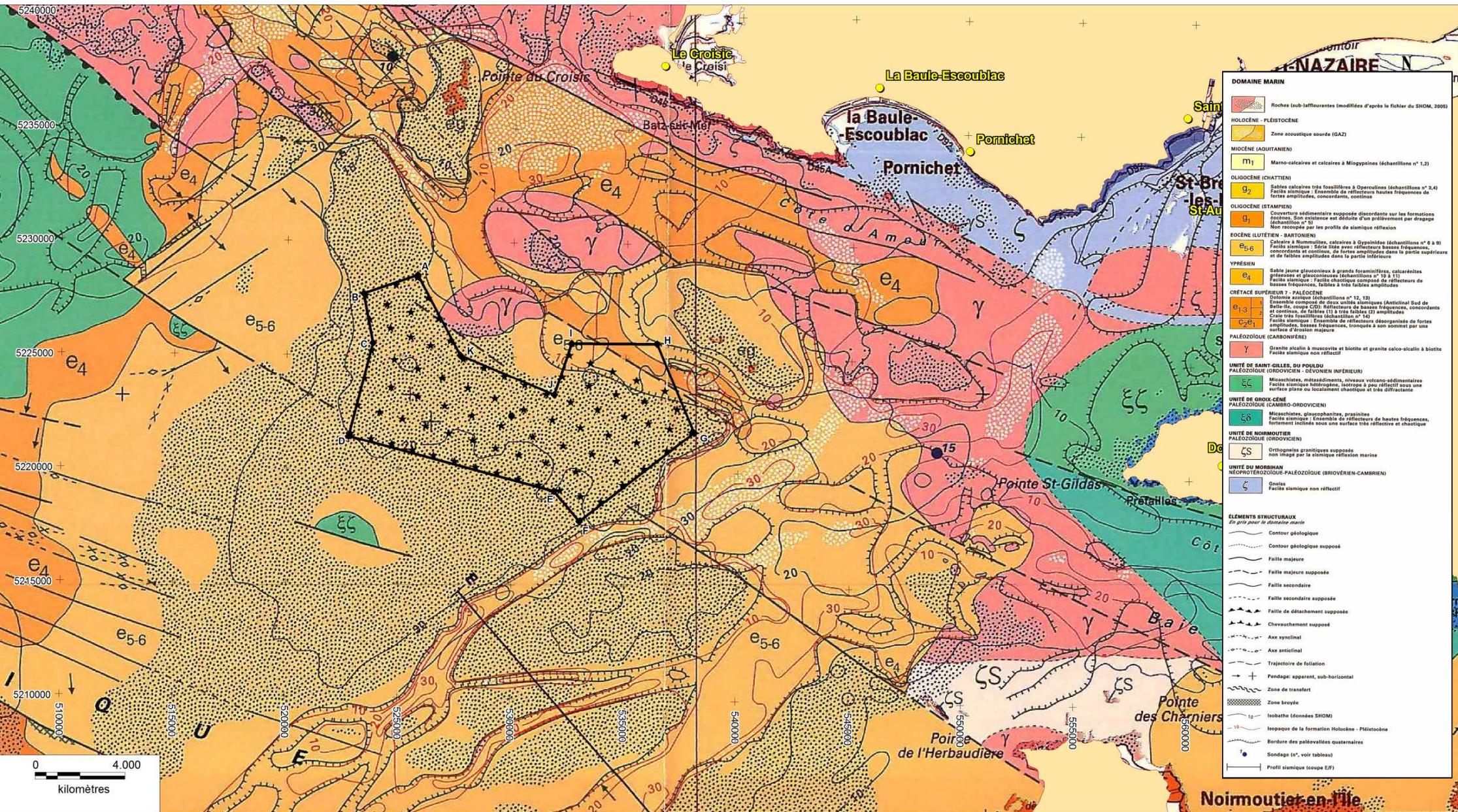
**Annexe E - Cartes des conditions de sol  
Fondations monopieu (diamètre 7 m)**



Figure E-1

Carte sédimentologique sous-marine "Saint-Nazaire" par J-R Vanney, 1968





**ANNEXE F**  
**FIGURES CHAPITRE 7 – RESULTATS**  
**CAMPAGNES IN VIVO 2011**

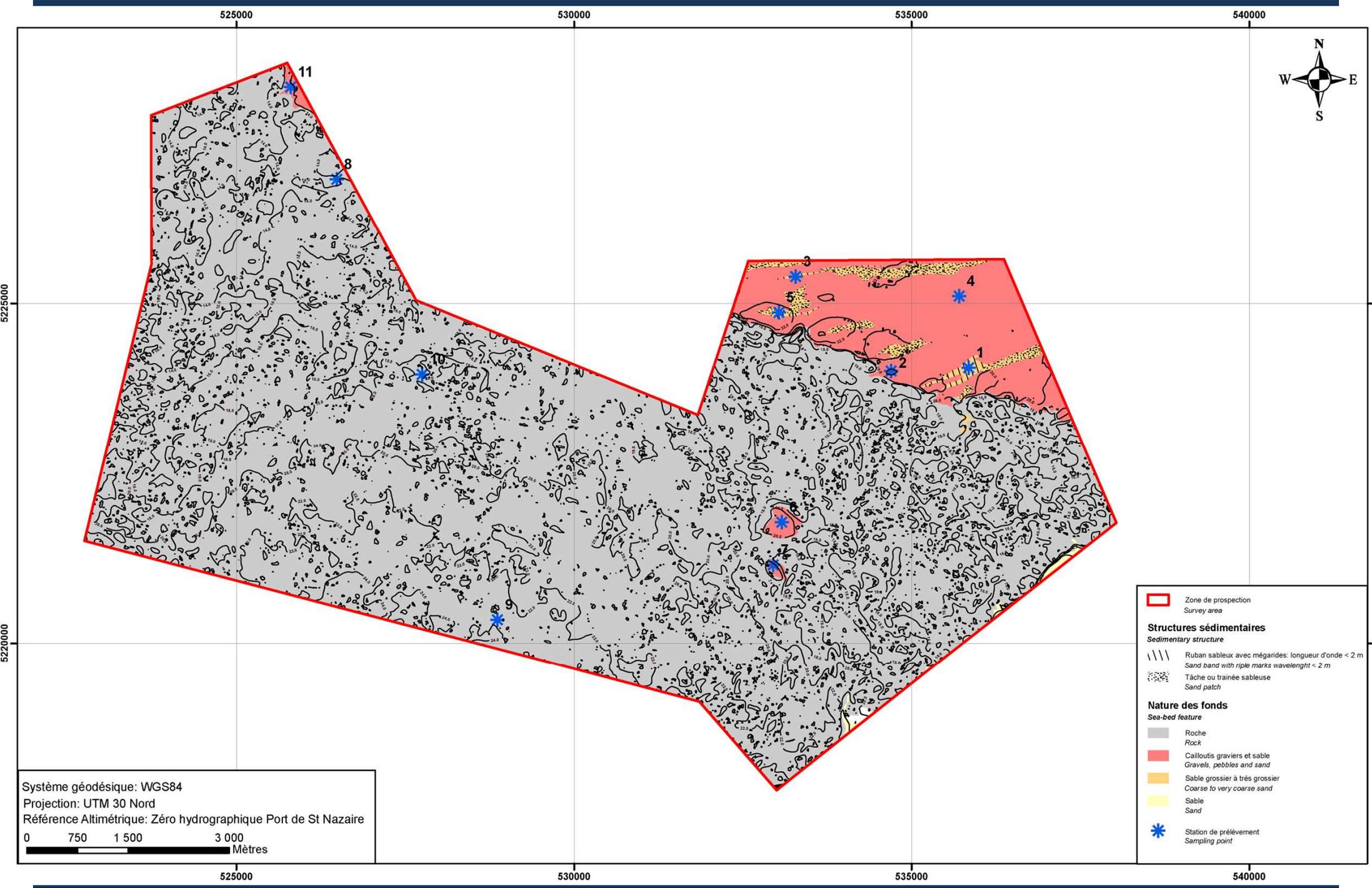
---

# Parc Eolien du Banc du Guérande

**Lot : hydrodynamisme – hydrosédimentaire**

**Annexe F : Résultat campagne sonar latéral, In Vivo 2011  
Fondations monopieu (diamètre 7 m)**





Système géodésique: WGS84  
 Projection: UTM 30 Nord  
 Référence Altimétrique: Zéro hydrographique Port de St Nazaire

0 750 1 500 3 000  
 Mètres

**Zone de prospection**  
 Survey area

**Structures sédimentaires**  
 Sedimentary structure

|||| Ruban sableux avec mégarides: longueur d'onde < 2 m  
 Sand band with ripple marks wavelenght < 2 m

⋯ Tâche ou traînée sableuse  
 Sand patch

**Nature des fonds**  
 Sea-bed feature

■ Roche  
 Rock

■ Cailloutis graviers et sable  
 Gravels, pebbles and sand

■ Sable grossier à très grossier  
 Coarse to very coarse sand

■ Sable  
 Sand

★ Station de prélèvement  
 Sampling point

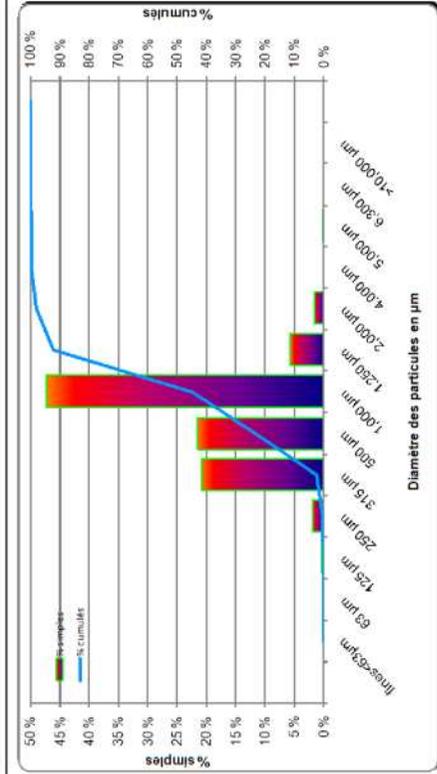
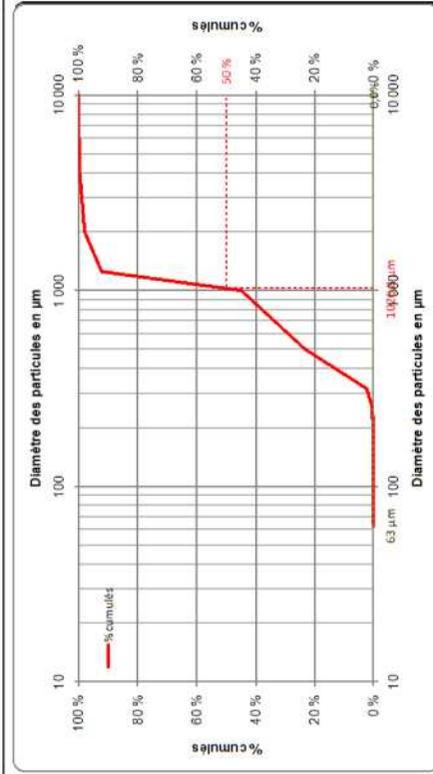


**GUERANDE- PRELEVEMENT DU 30/03/11**

Nom de l'échantillon: 1

Masse totale : 244,99 g

ouverture du tamis (en µm)	Masses simples (en g)	Masses cumulées (en g)	Fréquence simple en %	Fréquence cumulée en %
fines < 63 µm	0,00 g	0,00 g	0,00 %	0,00 %
63 µm	0,00 g	0,00 g	0,00 %	0,00 %
125 µm	1,00 g	1,00 g	0,41 %	0,00 %
250 µm	5,00 g	6,00 g	2,04 %	0,41 %
315 µm	51,00 g	57,00 g	20,82 %	2,45 %
500 µm	53,00 g	110,00 g	21,64 %	23,27 %
1 000 µm	116,00 g	226,00 g	47,37 %	44,92 %
1 250 µm	14,00 g	240,00 g	5,72 %	52,28 %
2 000 µm	4,00 g	244,00 g	1,63 %	58,00 %
4 000 µm	0,20 g	244,20 g	0,08 %	99,63 %
5 000 µm	0,70 g	244,90 g	0,29 %	99,71 %
6 300 µm	0,00 g	244,90 g	0,00 %	100,00 %
> 10 000 µm	0,00 g	244,90 g	0,00 %	100,00 %



ABLES TRES GROSSIER	
1 000 µm	382 µm
	425 µm
	1 70 P <sub>H</sub>
	540 µm
1 027 µm	1 159 µm
	1 206 µm
	-0,27 P <sub>H</sub>
	1 238 µm
	0,30 P <sub>H</sub>
	0,71 P <sub>H</sub>
	0,55
	0,84
	0,00 %

ABLES TRES GROSSIER	
Mode (µm)	
D <sub>10</sub> (µm)	
D <sub>50</sub> (µm)	
D <sub>90</sub> (µm)	
Médiane D <sub>50</sub> (µm)	
D <sub>10</sub> (µm)	
D <sub>90</sub> (µm)	
D <sub>95</sub> (µm)	
D <sub>98</sub> (µm)	
D <sub>99</sub> (µm)	
Diamètre moyen en φ	
Ecart type en unité φ (sorting)	
Indice d'asymétrie (Skewness)	
Indice d'angulosité (Kurtosis)	
Teneur en fines (diamètre < 63 µm)	

SOURCE : N VVO ENVIRONNEMENT - Janvier 2010

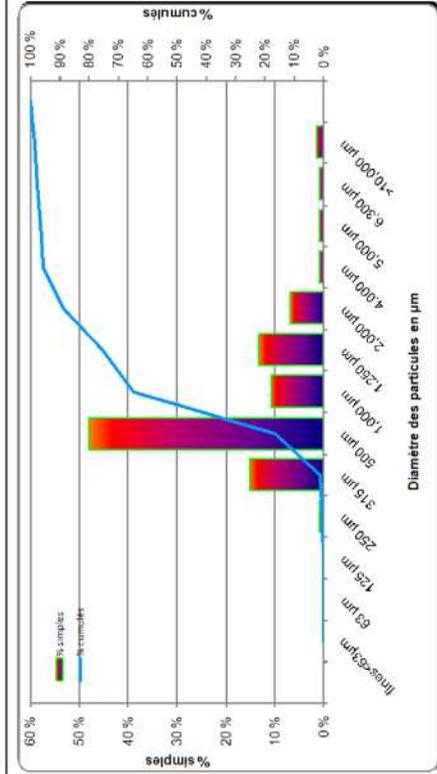
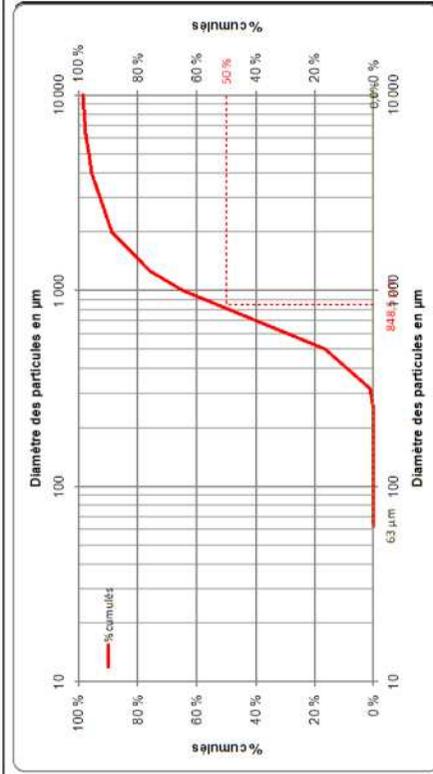


**GUERANDE- PRELEVEMENT DU 300311**

Nom de l'échantillon : 3

Masse totale : 203,40 g

ouverture du tamis (en µm)	Masses simples (en g)	Masses cumulées (en g)	Fréquence simple en %	Fréquence cumulée en %
fines<63µm	0,00 g	0,00 g	0,00 %	0,00 %
63 µm	0,00 g	0,00 g	0,00 %	0,00 %
125 µm	0,40 g	0,40 g	0,20 %	0,20 %
250 µm	2,00 g	2,40 g	0,98 %	0,20 %
315 µm	31,00 g	33,40 g	15,24 %	1,18 %
500 µm	98,00 g	131,40 g	48,18 %	16,42 %
1 000 µm	22,00 g	153,40 g	10,82 %	64,60 %
1 250 µm	27,00 g	180,40 g	13,27 %	75,42 %
2 000 µm	14,00 g	194,40 g	6,88 %	88,69 %
4 000 µm	2,00 g	196,40 g	0,98 %	95,58 %
5 000 µm	2,00 g	198,40 g	0,98 %	96,56 %
6 300 µm	2,00 g	200,40 g	0,98 %	97,54 %
>10 000 µm	3,00 g	203,40 g	1,47 %	98,53 %
				100,00 %



<b>Mode (µm)</b>	500 µm	<b>SABLES GROSSIERS</b>
D <sub>10</sub> (µm)	422 µm	
D <sub>50</sub> (µm)	465 µm	
D <sub>90</sub> (µm)	1 011 µm	<b>SABLES GROSSIERS</b>
<b>Médiane D<sub>50</sub> (µm)</b>	<b>848 µm</b>	
D <sub>100</sub> (µm)	1 240 µm	
D <sub>95</sub> (µm)	1 735 µm	
D <sub>90</sub> (µm)	-0,79 µm	
D <sub>95</sub> (µm)	2 360 µm	

Diamètre moyen en φ : 0,15 Phi  
 Écart type en unité φ (sorting) : 0,97 Phi  
 Indice d'asymétrie (Skewness) : -0,21  
 Indice d'angulosité (Kurtosis) : 1,30

Teneur en fines (diamètre < 63 µm) : 0,00 %

Source : N VIVO Environnement - Janvier 2010

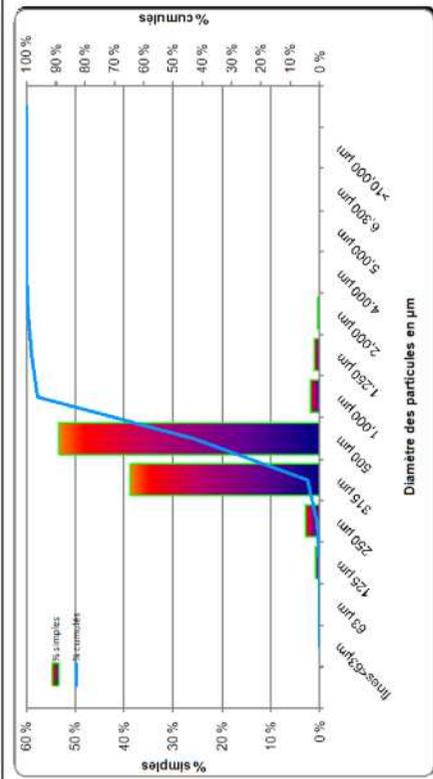
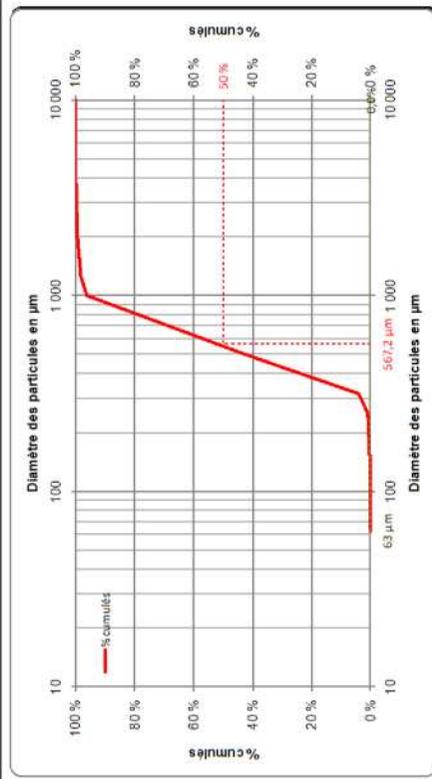


**GUERANDE- PRELEVEMENT DU 30/03/11**

Nom de l'échantillon: 5

Masse totale : 198,59 g

ouverture du tamis (en µm)	Masses simples (en g)	Masses cumulées (en g)	Fréquence simple en %	Fréquence cumulée en %
fines<63µm	0,00 g	0,00 g	0,00 %	0,00 %
63 µm	0,00 g	0,00 g	0,00 %	0,00 %
125 µm	2,00 g	2,00 g	1,01 %	0,00 %
250 µm	6,00 g	8,00 g	3,02 %	1,01 %
315 µm	77,00 g	85,00 g	38,79 %	4,03 %
500 µm	106,00 g	191,00 g	53,40 %	42,82 %
1 000 µm	4,00 g	195,00 g	2,02 %	96,72 %
1 250 µm	2,30 g	197,30 g	1,16 %	98,24 %
2 000 µm	1,00 g	198,30 g	0,50 %	99,40 %
4 000 µm	0,20 g	198,50 g	0,10 %	99,90 %
5 000 µm	0,00 g	198,50 g	0,00 %	100,00 %
6 300 µm	0,00 g	198,50 g	0,00 %	100,00 %
>10 000 µm	0,00 g	198,50 g	0,00 %	100,00 %



SABLES GROSSIERS	
Mode (µm)	500 µm
D <sub>10</sub> (µm)	343 µm
D <sub>50</sub> (µm)	567 µm
D <sub>90</sub> (µm)	942 µm

SABLES GROSSIERS	
Mode (µm)	500 µm
D <sub>10</sub> (µm)	343 µm
D <sub>50</sub> (µm)	567 µm
D <sub>90</sub> (µm)	942 µm

Diamètre moyen en φ  
 Écart type en unité φ (sorting)  
 Indice d'asymétrie (Skewness)  
 Indice d'angulosité (Kurtosis)

Teneur en fines (diamètre < 63 µm) : 0,00 %

SOURCE : IN VIVO ENVIRONNEMENT - Janvier 2010