PROJET EOLIEN EN MER DE LA BAIE DE SAINT-BRIEUC

ETUDE D'IMPACT HYDRO-DYNAMIQUE ET SEDIMENTAIRE

Rapport Final

Ailes Marines	Rapport n°MOC-1080	V2.0	05/02/2015

ACTIMAR - 36, Quai de la Douane – F-29200 Brest - Tel: +33 298 44 24 51 - Fax: +33 298 46 91 04
e-mail: info@actimar.fr - web: www.actimar.fr

MODIFICATIONS

Version	Date	Notes	Auteurs	Vérifié par
1.0	15/01/2015	Reprise et mise à jour du rapport MOC-0603-FR suivant le nouveau schéma d'implantation	Marc Pavec, Bernard Latteux, Vincent Faure, Solène Le Gac, Françoise Girard, Laurent Leballeur	Marc Pavec
2.0	05/02/2015	Prises en comptes des remarques du client	Françoise Girard	Marc Pavec

DESTINATAIRES

Destinataire	Organisme	Date de validation
Laure Grignon	Ailes Marines	

TABLE DES MATIERES

1 INTRODUCTION 6

2 ÉTAT INITIAL – LES DONNÉES ACTUELLES 8
2.1 BATHYMÉTRIE ET MORPHOLOGIE 8
2.2 NATURE DES FONDS 12
2.2.1 Nature des sédiments superficiels 12
2.2.2 Epaisseur de la couche de sédiments 15
2.2.3 Mobilité du sédiment 16
2.3 PARAMÈTRES MÉTÉO-OCÉANIQUES 17
2.3.1 Niveau d'eau 17
2.3.1.1 Variations du niveau d'eau 17
2.3.1.2 Marée astronomique 18
2.3.1.3 Surcotes de tempêtes 20
2.3.1.4 Extrêmes 21
2.3.2 Courants 22
2.3.2.1 Marée astronomique 23
2.3.2.2 Courants induits par le vent 25
2.3.3 Vagues 25
2.4 HYDROLOGIE 29
2.4.1 Rejets des rivières 29
2.4.2 Apports sédimentaires 29
2.4.3 Turbidité 30
2.4.4 Images satellites de Previmer 31
2.5 EVOLUTION DU FOND DE L'OCÉAN 33
2.5.1 Levés bathymétriques 33
2.5.2 Comparaison des données 35

3 IMPACT HYDRODYNAMIQUE 37
3.1 CARACTÉRISTIQUES DU PARC ÉOLIEN ET DES FONDATIONS 37
3.2 INTERACTION ENTRE L'ÉCOULEMENT DE L'EAU ET LES FONDATIONS : APPROCHE THÉORIQUE 39
3.3 DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE 40
3.3.1 Code TELEMAC 40
3.3.2 Bathymétrie et maillage 40
3.3.3 Maillage autour des fondations 43
3.3.4 Paramètres et conditions aux limites 44
3.4 SIMULATIONS HYDRODYNAMIQUES EN CONDITIONS ACTUELLES 45
3.4.1 Validation par comparaison avec les données du SHOM 45
3.4.2 Courant de marée maximum 48
3.5 SIMULATIONS HYDRODYNAMIQUES POUR LE PROJET DE PARC ÉOLIEN 52
3.5.1 Impact à l'échelle régionale 52
3.5.2 Impact à l'échelle locale 53
3.5.3 Impact à l'échelle de la fondation 55

4 IMPACT SUR LA PROPAGATION DES VAGUES 57
4.1 INTERACTIONS ENTRE LES VAGUES ET LES FONDATIONS : APPROCHE THÉORIQUE 57

4.1.1 Nombre de Keulegan-Carpenter et paramètre de diffraction 57
4.1.2 Application au site du parc éolien 59
4.1.2.1 Impact du parc éolien sur l'état de la mer, à l'échelle régionale 59
4.1.2.2 Impact du parc éolien sur l'état de mer, à l'échelle locale 60
4.2 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE LA PROPAGATION DES VAGUES 61
4.2.1 Présentation du système de modélisation 61
4.2.1.1 Code TOMAWAC 61
4.2.1.2 Bathymétrie et maillage 62
4.2.1.3 Paramètres et conditions aux limites 63
4.2.2 Modélisation des vagues dans les conditions actuelles 65
4.2.3 Modélisation des vagues en présence des structures du parc éolien 65
4.2.3.1 Impacts à l'échelle régionale 65
4.3 SYNTHÈSE 68

5 IMPACTS DE LA PHASE TRAVAUX SUR L'ENVIRONNEMENT 70
5.1 INTRODUCTION 70
5.2 DÉFINITION DES SCÉNARIOS 70
5.3 MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU REJET DE SÉDIMENT 71
5.3.1 Méthode 71
5.3.2 Bathymetrie et maillage 71
5.3.3 Conditions hydrodynamiques 73
5.3.4 Paramètres du modèle 75
5.4 RESULTATS POUR LES SÉDIMENTS GROSSIERS (DIAMÈTRE 1MM) 76
5.4.1 Première phase : suspension 76
5.4.2 Deuxième phase : évolution du dépôt de matériaux grossiers 78
5.5 RÉSULTATS POUR LES SÉDIMENTS FINS (DIAMÈTRE 30 MICRONS) 82
5.6 SYNTHÈSE 85

6 IMPACT SÉDIMENTAIRE 86
6.1 DYNAMIQUES DES SÉDIMENTS ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION 86
6.2 INTERACTIONS ENTRE LE PROJET ET LE FOND DE LA MER 87
6.2.1 Impact local 87
6.2.1.1 Mécanisme d'affouillement 87
6.2.1.2 Caractéristiques de l'affouillement 88
6.2.2 Impact régional 92
6.2.2.1 Effet du courant 92
6.2.2.2 Effet des vagues 94
6.3 RÉSUMÉ 94

7 RÉFÉRENCES 96

8 ANNEXE A – RESULTAT DES SIMULATIONS NUMERIQUES EN ETAT PROJET 99
8.1 ECHELLE RÉGIONALE 99
8.2 ECHELLE LOCALE 101

9 ANNEXE B – PROPAGATION DES VAGUES EN CONDITIONS ACTUELLES 105

10 ANNEXE C – IMPACT DU PROJET SUR LES VAGUES 108

1 INTRODUCTION

Ce rapport présente les résultats de l'étude d'impact hydrodynamique et sédimentaire pour le projet de parc éolien de la Baie de Saint-Brieuc (dénommé « le parc éolien » dans la suite). Le parc éolien est situé à 17 km au large d'Erquy, dans la Baie de Saint-Brieuc (voir Figure 1-1). Les profondeurs d'eau dans le parc varient de -29 m à -42 m par rapport au niveau des plus basses mers. Le site est caractérisé par un important marnage (de l'ordre de 10 m pour les marées d'équinoxe), et par des courants de marée intenses (jusqu'à 2.1 m/s lors des plus grandes marées). Le nord du site est exposé aux houles en provenance de l'Atlantique, qui peuvent se propager vers le sud du site. L'ensemble du site est soumis à un régime de mer du vent générée sur la Manche.

La première partie de ce rapport décrit les conditions initiales sur le site. Cet état initial consiste en une description détaillée des paramètres suivants :

- Bathymétrie et morphologie des fonds
- Sédimentologie
- Niveau d'eau
- Courant
- Vagues

La seconde partie présente les impacts potentiels du parc éolien sur le courant et sur la propagation des vagues. Ces impacts sont estimés par le biais de modélisations numériques à l'aide des modèles dédiés TELEMAC-2D et TOMAWAC. Le premier modélise le courant et la hauteur d'eau, le second modélise la propagation des vagues. Tous les deux permettent une discrétisation du domaine de calcul très raffinée au niveau des éoliennes. Les résultats sont présentés pour diverses conditions météo océaniques à l'échelle du parc éolien. Ils sont complétés par une approche théorique pour valider les impacts autour des fondations.

Ces résultats sont ensuite utilisés pour estimer le comportement hydro sédimentaire du site, ainsi que les impacts possibles du parc éolien sur ce comportement.

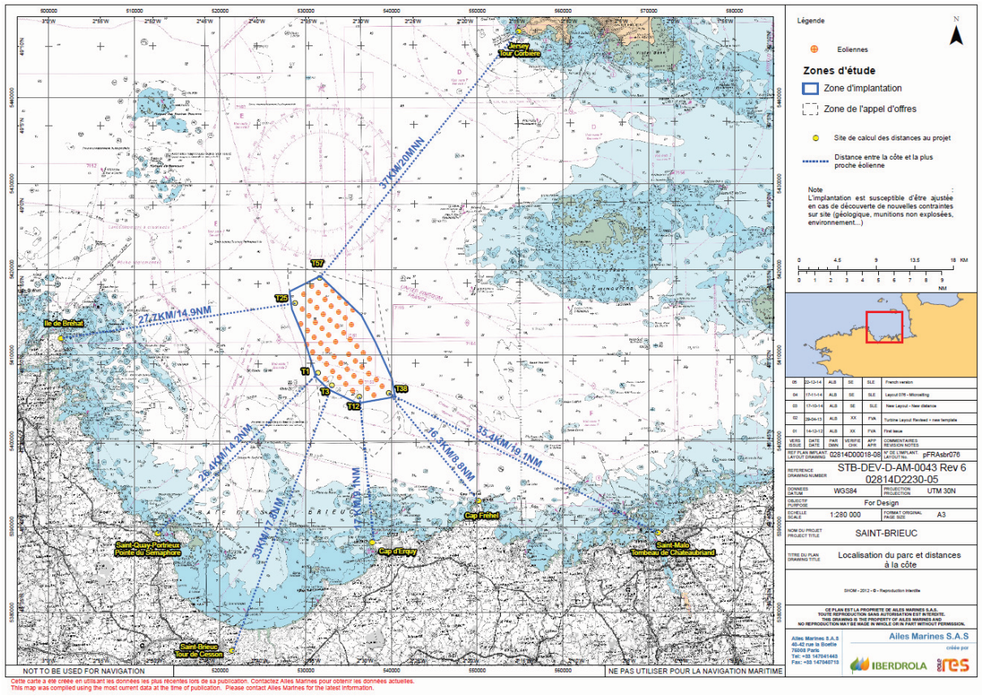


Figure 1-1 Localisation du projet dans la Baie de Saint-Brieuc. Source : Ailes Marines

Unités et conventions.

Dans le document, toutes les profondeurs d'eau sont données par rapport au zéro hydrographique, autrement appelé zéro des **c**artes **m**arines, abrégé en **CM**. Le zéro CM est voisin du niveau des plus basses mers astronomiques, atteint par un coefficient de marée de 120.

L'abbréviation CM fait donc toujours référence à ce niveau.

Hauteur des vagues	exprimée en mètre (m)
Période des vagues	exprimée en seconde (s)
Direction des vagues	exprimée en degré par rapport au nord géographique et décrit la direction de provenance des vagues
Vitesse du courant	exprimé en m/s
Direction du courant	exprimée en degré par rapport au nord géographique et décrit la direction vers où va le courant

2 ÉTAT INITIAL – LES DONNEES ACTUELLES

2.1 BATHYMETRIE ET MORPHOLOGIE

La Baie de Saint-Brieuc est caractérisée par un trait de côte accidenté et de nombreuses îles et îlots rocheux (voir Figure 2-1). Vers le large, la pente du fond est relativement faible : l'isobathe -30 m CM est située approximativement entre 10 et 20 km de la côte. Le parc éolien est situé au-delà de cette isobathe, dans une zone où la pente y est de l'ordre de 1 ‰. On observe des pentes plus marquées près de la côte.

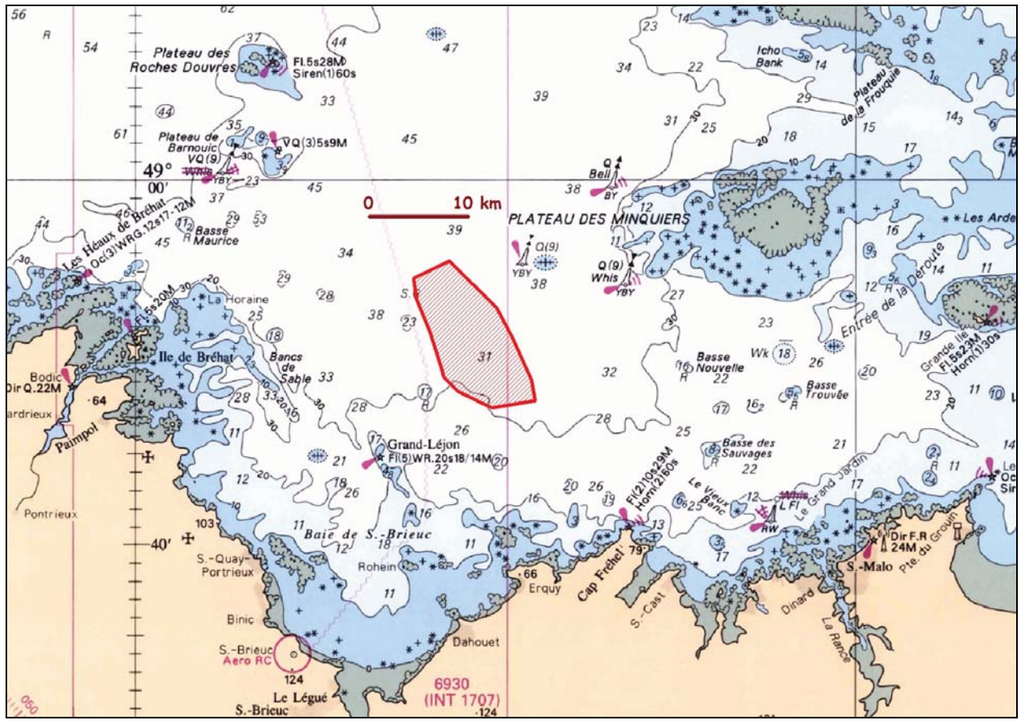


Figure 2-1 : Bathymétrie de la Baie de Saint-Brieuc (source SHOM).
La zone d'implantation du parc éolien est représentée par le polygone rouge.

Les Figure 2-2 et Figure 2-3 montrent respectivement la topographie des fonds et la pente du fond dans la zone du projet, d'après les résultats de la campagne spécifique réalisée par G-TEC en 2012 [Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1]. Les profondeurs d'eau s'échelonnent de -29 m à -42 m par rapport aux plus basses mers sur le site. La Figure 2-4 montre la présence de roches dans la partie centrale du parc éolien, de canaux et de rigoles dans les parties nord et est, alors que la partie sud apparaît beaucoup plus régulière. Cette image en relief ne montre aucune structure sédimentaire régulière (pas de présence d'une structure sédimentaire cohérente) sur le fond. Les levés par sonar latéral de G-TEC ne montrent pas non plus de régularité des fonds.

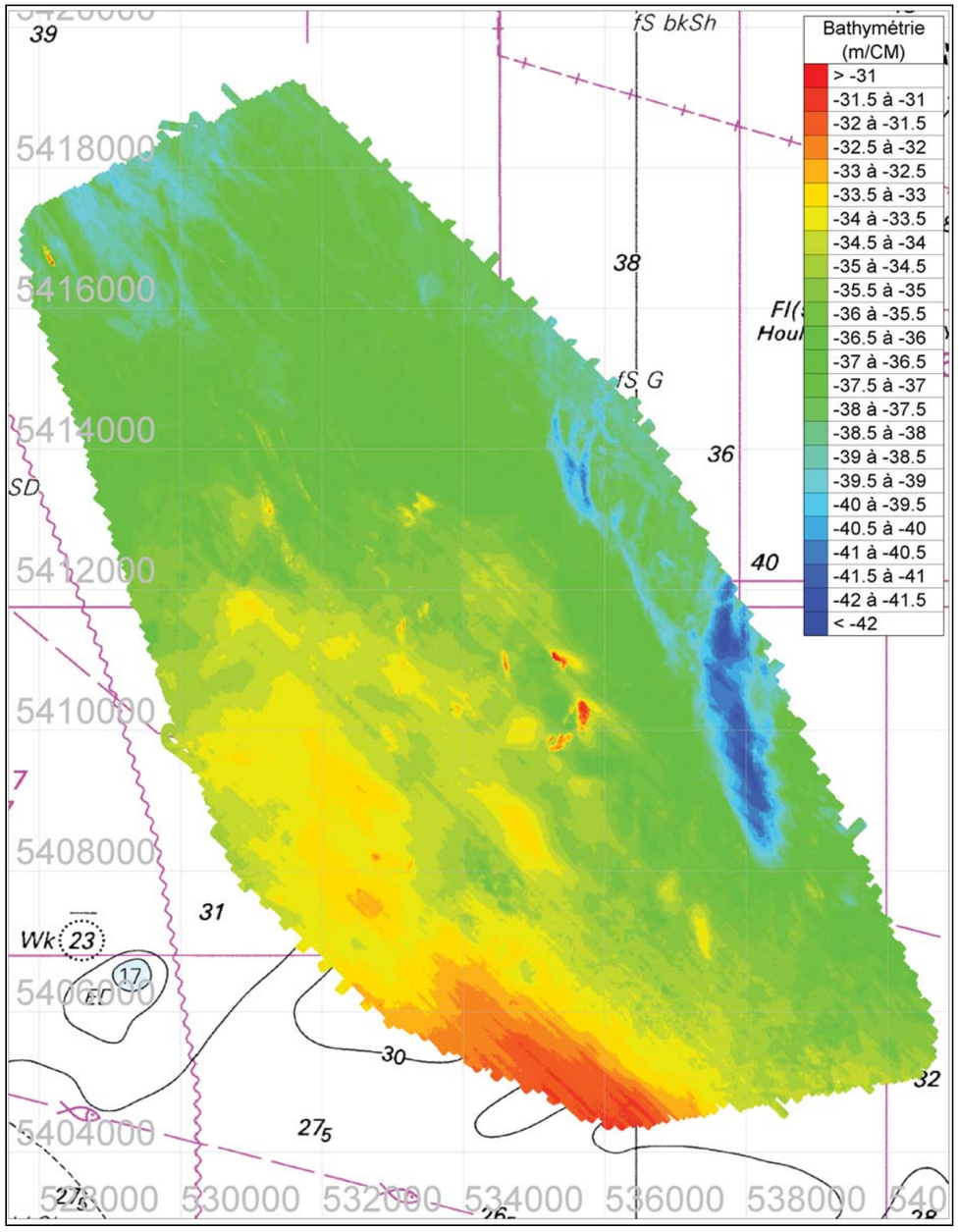


Figure 2-2 : Bathymétrie détaillée dans la zone du projet (d'après G-TEC, 2013) - coordonnées WGS 84 - UTM 30N.

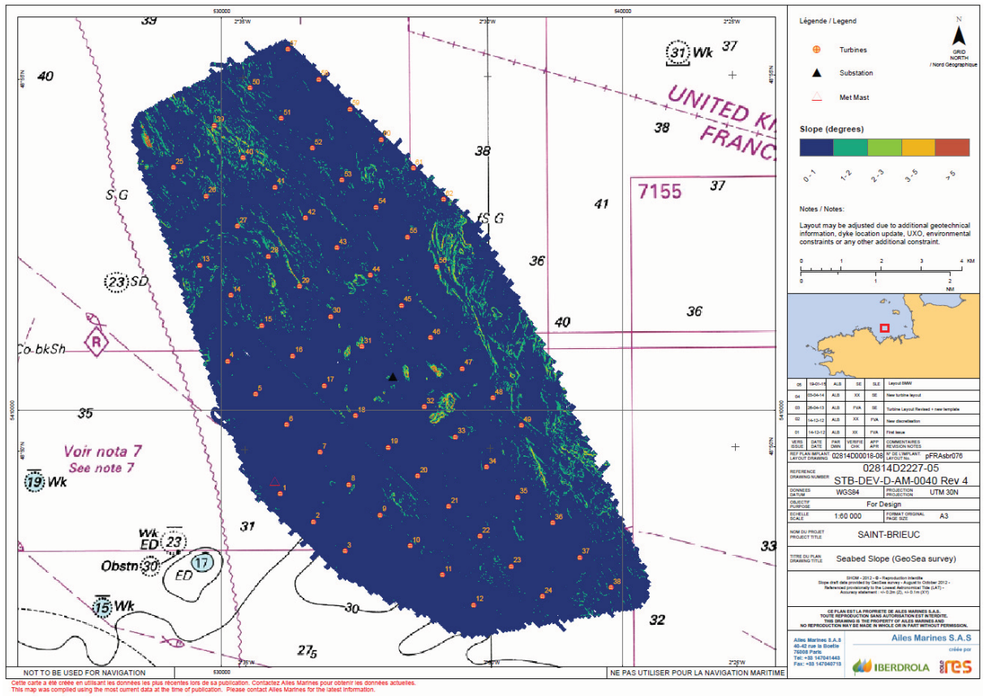


Figure 2-3 : Pente des fonds dans la zone du projet – source : Ailes Marines

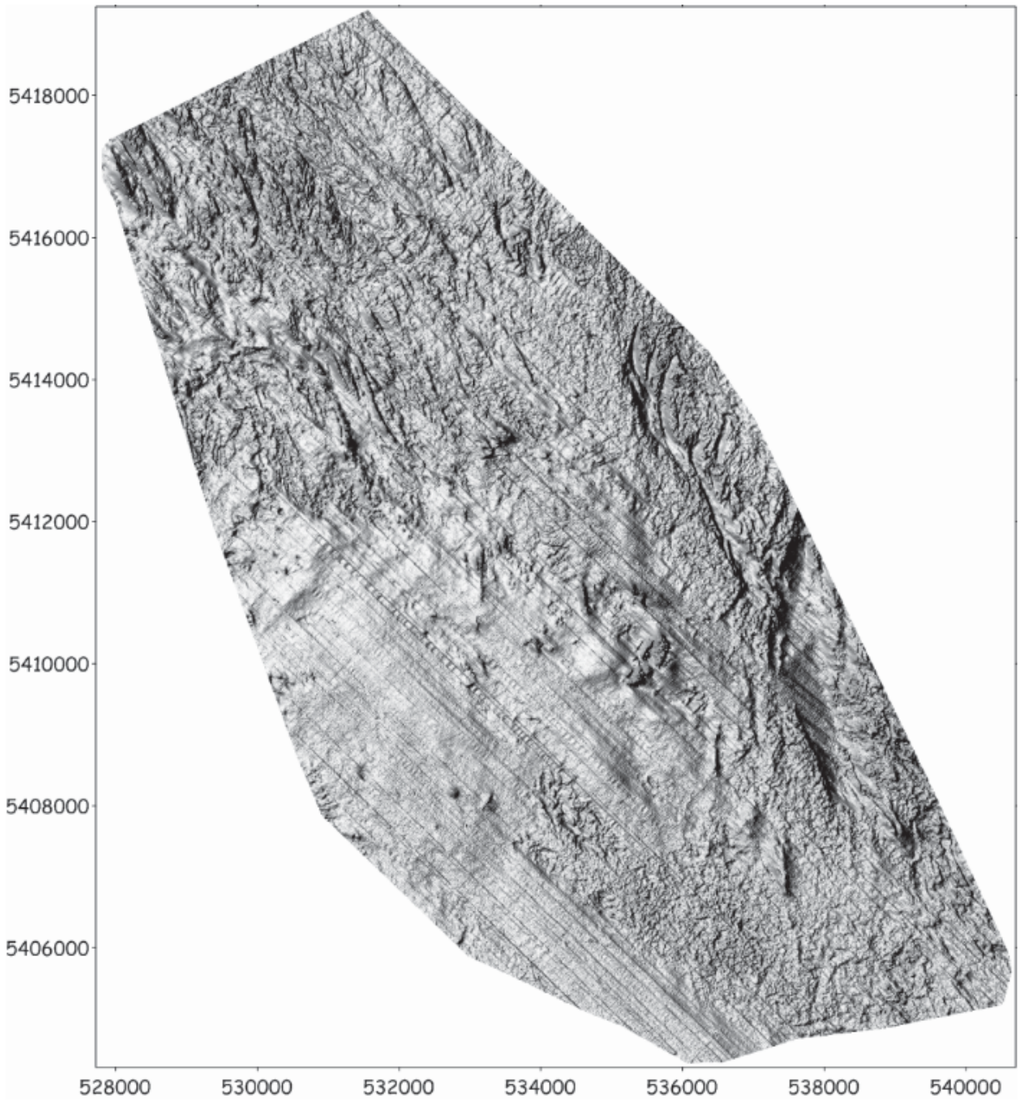


Figure 2-4 : Carte des fonds marins en relief (d'après G-TEC, 2013) - coordonnées WGS 84 - UTM 30N

2.2 NATURE DES FONDS

2.2.1 Nature des sédiments superficiels

La Figure 2-5 montre la nature des fonds sur la côte nord Bretagne. Les sédiments sont plutôt fins dans la partie ouest de la Baie de Saint-Brieuc, à l'exception de quelques affleurements rocheux. Les sédiments deviennent de plus en plus grossiers vers l'est. Sur la zone du parc éolien, les fonds sont couverts de débris rocheux et de graviers, avec des sédiments devenant plus grossiers vers le nord.

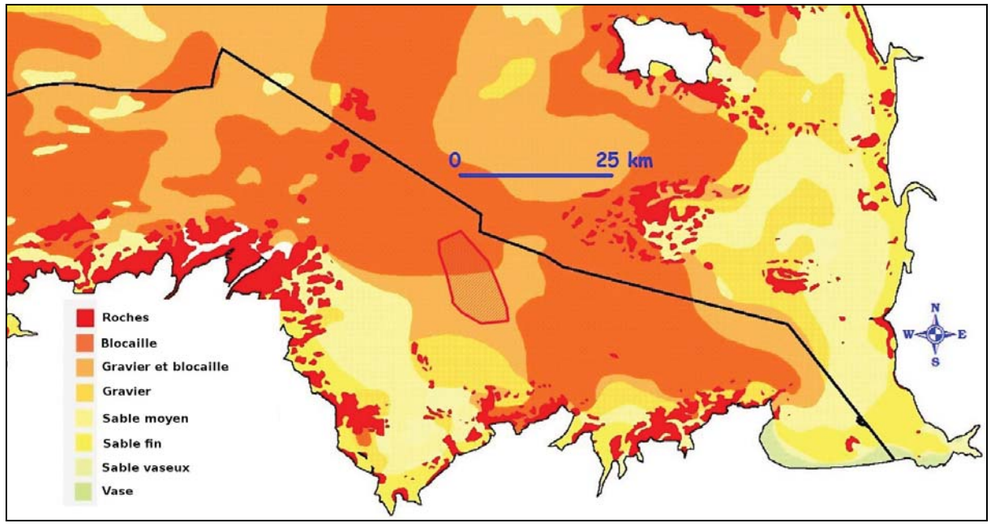


Figure 2-5 : Nature des fonds à l'échelle régionale (source : Bretagne Environnement 2005). La ligne noire représente la limite administrative de la Région Bretagne et le polygone rouge représente l'emprise du parc éolien.

Le levé de G-TEC [Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1] apporte des informations plus précises sur la nature des fonds dans la zone du projet. Figure 2-6 montre que la partie nord est assez rocheuse. Des sables grossiers apparaissent dans la partie sud, alors que les sables fins prédominent dans la partie centrale.

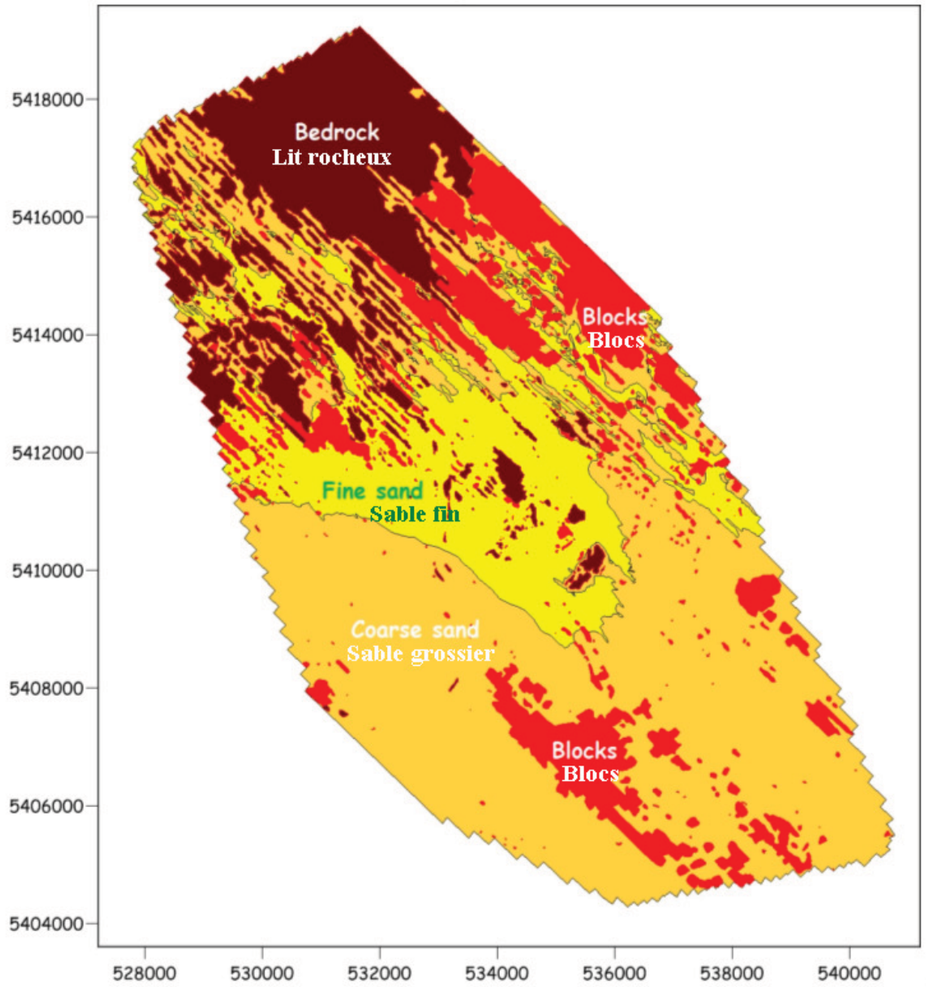


Figure 2-6 : Nature des fonds, d'après l'étude G-TEC - coordonnées WGS 84-UTM 30N

Les sédiments ont été échantillonnés en 25 endroits ; l'analyse granulométrique, effectuée sur 20 échantillons (pas d'analyse granulométrique sur le lit rocheux), montre que « la zone d'étude est largement dominée par des sables graveleux avec une teneur moyenne en gravier, sable et vase de 65.9%, 31.2% et 2.9% respectivement » (G-TEC SA, 2013) [Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1].

La Figure 2-7 présente la distribution du diamètre médian du grain des sédiments sur la zone d'étude ; les valeurs montrent que les échantillons de sédiments correspondent à du sable grossier ou du gravier. On observe une légère tendance à l'augmentation de la taille des particles vers le nord du site, de même la proportion de sédiments fins diminue

progressivement vers le sud. Les proportions de vase, de sable et de gravier sont également indiquées sur la figure.

De plus, 10 forages ont été réalisés par GeoSea (2012) ; la taille des grains analysés (diamètre médian) de la couche supérieure de ces échantillons est également affichée sur la Figure 2-7, montrant la même hétérogénéité spatiale.

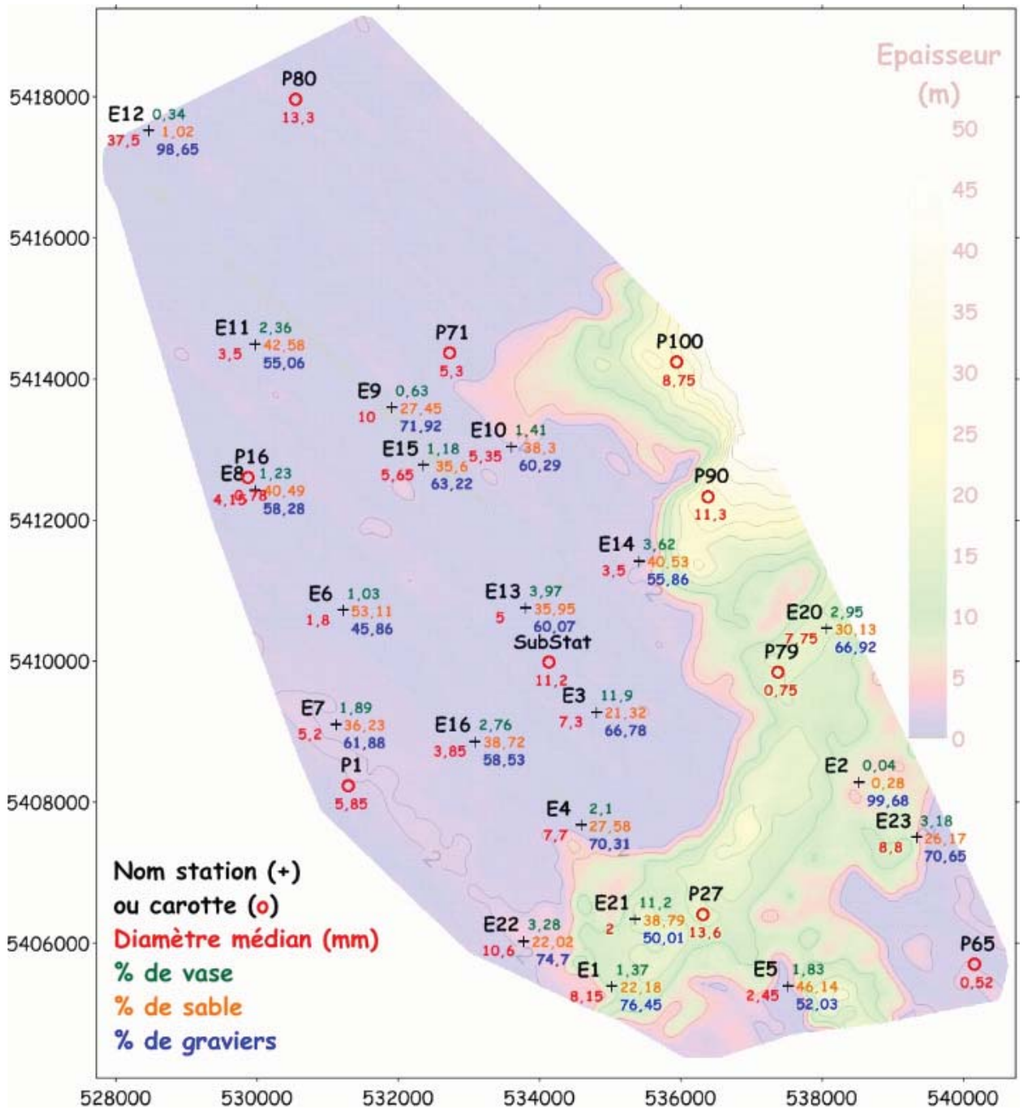


Figure 2-7 : Résultats de l'analyse de la taille des grains de sédiments au fond – coordonnées WGS 84-UTM 30N

2.2.2 Epaisseur de la couche de sédiments

Le levé de G-TEC S.A. (2013) (Figure 2-8) permet d'établir la distribution de l'épaisseur de la couche sédimentaire. Dans la majeure partie de la zone d'étude, l'épaisseur est relativement faible, comprise entre 0.4 m et 2 m. L'épaisseur devient plus importante dans les parties est et sud de la zone, ce qui suggère le remplissage d'une sorte de paléovallée; elle dépasse 15 m sur 8.5 % de la zone; l'épaisseur observée la plus élevée est d'environ 48 m.

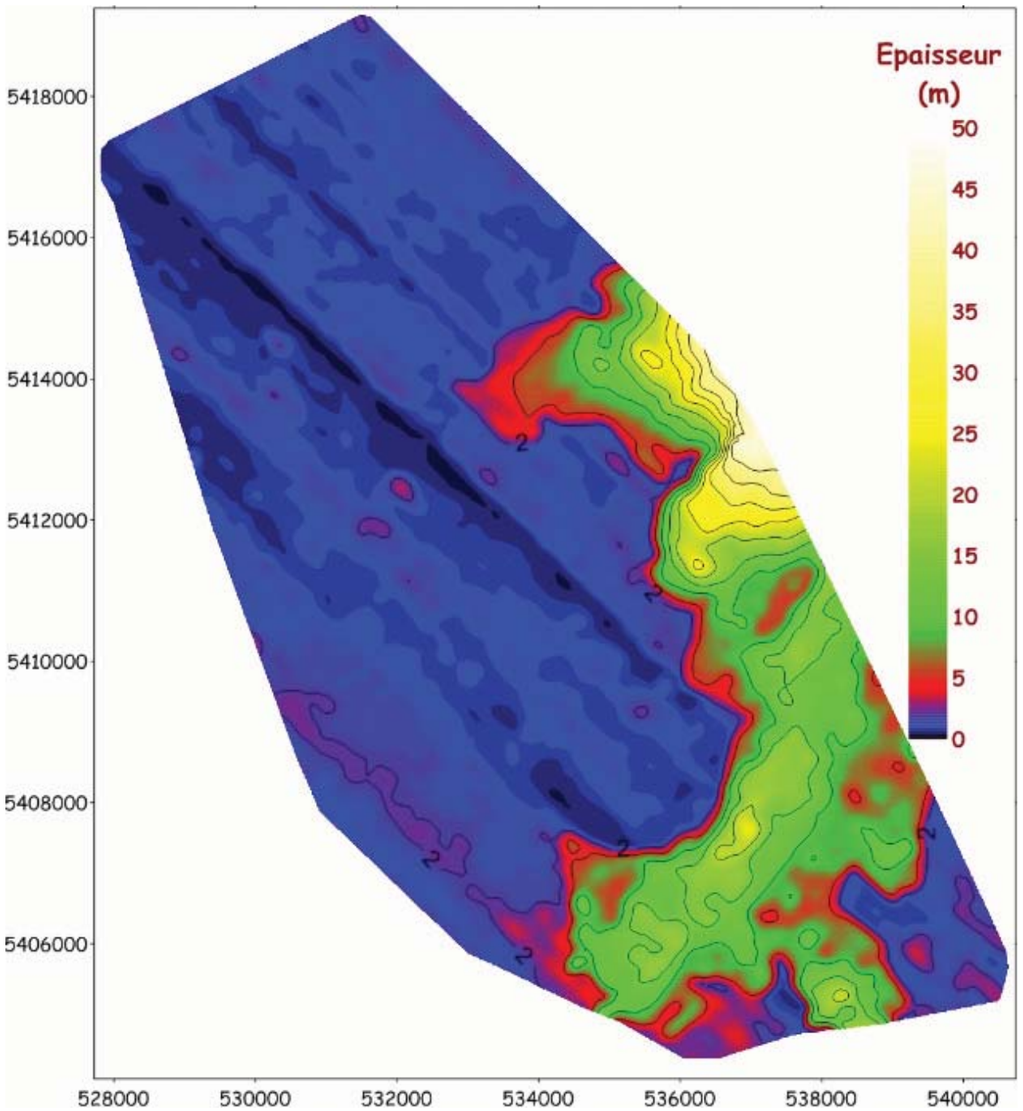


Figure 2-8 : Epaisseur de la couche sédimentaire (obtenue par G-TEC, 2013) – coordonnées WGS 84-UTM 30N

2.2.3 Mobilité du sédiment

L'évolution à long terme et la mobilité des sédiments seront discutées dans la dernière partie de ce rapport à partir des résultats de la modélisation, mais une première indication sur leur capacité à être transportés par les courants est donnée à partir de la bibliographie.

La tension critique d'érosion est définie comme la tension seuil au-dessus de laquelle les sédiments sont remis en suspension. Cette tension critique peut se traduire en termes de vitesse de courant, on parle alors de vitesse ou cisaillement critique. On peut en réalité définir deux cisaillements critiques : le premier pour la mise en mouvement des sédiments, le second pour leur remise en suspension. La Figure 2-9 illustre ces valeurs pour différentes tailles de grains et pour différentes profondeurs.

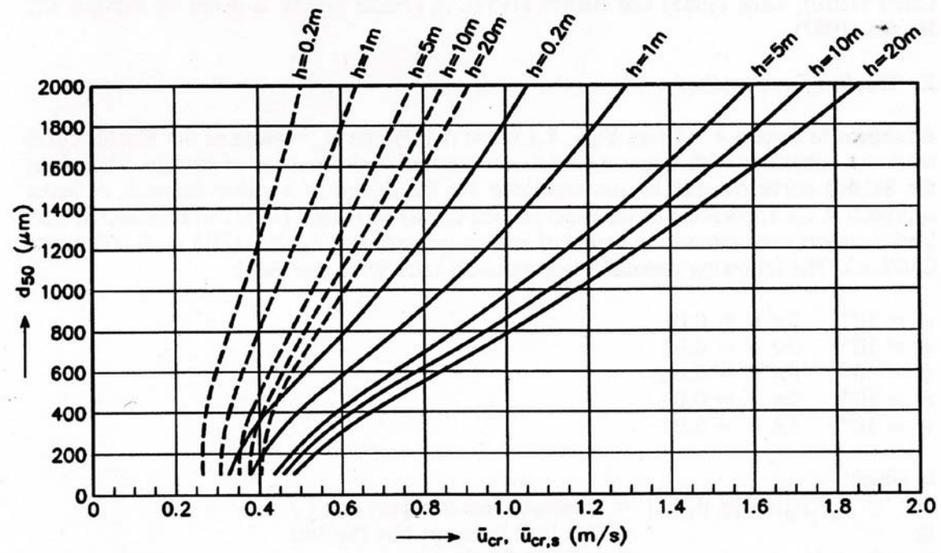


Figure 2-9 : Vitesses moyennes critiques pour la mise en mouvement (en pointillés, « u_{cr} ») et pour la mise en suspension (trait plein (« $u_{r,s}$ »)), pour différents diamètres médians (d50) et différentes profondeurs (h). Source: Van Rijn (1993) [Réf. 3]

Dans la zone du projet éolien, le fond de la mer est essentiellement composé de sables grossiers et de graviers de diamètre supérieur à 2 mm, pour une profondeur d'eau supérieure à 30 m. La Figure 2-9 indique que pour un diamètre de 2 mm (D50) et une profondeur d'eau supérieure à 20 m, le courant doit être supérieur à 0.9 m/s pour initier le processus d'érosion. Si l'on extrapole pour une profondeur de 40 m : on obtient alors une vitesse critique approximative de l'ordre de 1 m/s pour l'érosion (ce qui est cohérent avec le diagramme de Sundborg-Hjulström, Figure 2-10) et de l'ordre de 2 m/s pour la remise en suspension.

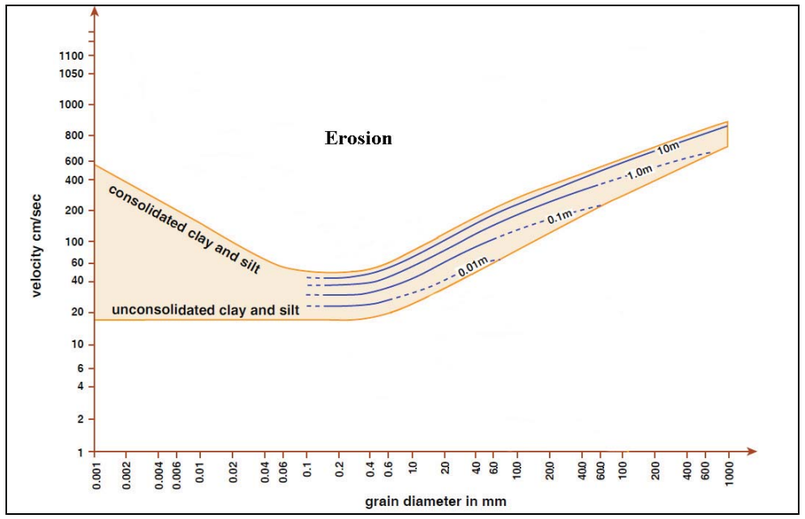


Figure 2-10 : Diagramme de Sundborg-Hjulström modifié (d'après Sundborg, 1956). Diagramme montrant une famille de seuil d'érosion en fonction de la profondeur d'eau.

2.3 PARAMÈTRES MÉTÉO-OCÉANIQUES

2.3.1 Niveau d'eau

2.3.1.1 Variations du niveau d'eau

Dans la zone d'étude, le niveau d'eau varie essentiellement en fonction de la marée astronomique et de la variabilité atmosphérique (vitesse et direction du vent, pression atmosphérique).

Le long des côtes ouest et nord de la France, et en particulier dans la région de Saint-Brieuc, la marée est de type semi diurne. Cela signifie que sa composante majeure est celle associée à la rotation de la Lune autour de la Terre (onde M2). Ce mouvement astronomique se traduit par un cycle de 12.4 heures comprenant une phase de pleine mer et une phase de basse mer, soit environ 2 cycles par jour.

Ce cycle principal est modulé par la position du Soleil par rapport à la Lune, générant une onde S2 de période 14.7 jours, correspondant au cycle morte-eau / vive-eau. La vive-eau se traduit par un marnage plus important qu'une marée moyenne (pleine mer plus haute et basse mer plus basse) et des étales (renverses de courant) plus brèves. La morte-eau montre des tendances opposées (marnage plus faible que la moyenne).

On définit les marées moyennes de vive-eau et de morte-eau par des coefficients de 95 et 45 respectivement. Une marée moyenne correspond à un coefficient de 70. Lorsque la Terre est plus proche du Soleil (équinoxe) et que ces astres sont alignés avec la Lune, la marée de vive-eau est plus importante. Les marées exceptionnelles sont caractérisées par un coefficient de marée proche de 120, le marnage atteint alors son maximum. Les marées exceptionnelles (coefficient supérieur à 115) se produisent généralement durant les périodes d'équinoxe (autour de mars et septembre), mais des coefficients supérieurs à 100 peuvent être rencontrés tout au long de l'année.

Outre ces variations temporelles, le marnage peut être renforcé dans certaines zones de la Manche à proximité des côtes, en raison de la morphologie du trait de côte et de la topologie des fonds marins. Lorsque l'onde de marée se propage d'ouest en est dans la Manche, le marnage s'accroît pour atteindre sa valeur maximale dans la Baie du Mont St Michel. Il peut y atteindre 13 m par forts coefficients.

Les effets atmosphériques sont également source d'accroissement du marnage lorsque les vents poussent les eaux de surface vers la côte de manière persistante ou lorsque la pression atmosphérique décroît (situations dépressionnaires). Ce dernier effet est plus faible que le premier, mais il s'accompagne généralement de conditions de tempêtes. Le niveau d'eau se trouve alors plus élevé que le niveau prédit par la marée astronomique.

Les informations utilisées dans ce document pour caractériser les niveaux proviennent des produits suivants :

- Atlas de marée du SHOM le long des côtes françaises en différents ports de référence
- Etude SHOM-CETMEF 2012 sur les niveaux d'eau extrêmes [Réf. 4]
- Rapports DISCOBOLE [Réf. 5]

Les résultats du modèle TELEMAC 2D, construit pour l'étude d'impact sont également utilisés pour donner des résultats plus précis dans la zone du parc éolien.

La suite de ce chapitre présente les trois analyses suivantes :

- **Marée astronomique** : niveaux d'eau pour différents coefficients de marée. Cette analyse se rapporte aux cycles de montées et de descentes du niveau de la mer. Ces niveaux ne prennent pas en compte les effets atmosphériques.
- **Surcotes de tempêtes** : les surcotes sont des niveaux d'eau supérieurs au niveau prédit par la marée astronomique pour des raisons atmosphériques. Cette analyse décrit le niveau d'eau attendu pendant les épisodes de tempête.
- **Extrêmes** : niveaux d'eau les plus élevés attendus sur de longues périodes, associés à différentes périodes de retour. Cette analyse décrit les niveaux d'eau les plus élevés ressortant d'observations sur de longues durées. Ces niveaux extrêmes sont calculés pour différentes périodes de retour[1], allant de 10 ans à 100 ans.

2.3.1.2 Marée astronomique

Le port de référence le plus proche reporté dans l'atlas de marée du SHOM est Erquy (48°38'N –02°28'W). Les niveaux d'eau par rapport au niveau moyen pour différentes conditions de marée sont indiqués dans le tableau ci-dessous.

[1] La période de retour d'un événement extrême est l'intervalle de temps moyen séparant deux réalisations de cet événement

		Niveau d'eau
Pleine mer	**Marée astronomique (120)**	6.4 m
	Marée moyenne de vive-eau (95)	5.09 m
	Marée moyenne de morte-eau (45)	2.34 m
Basse mer	**Marée moyenne de morte-eau (45)**	-1.31 m
	Marée moyenne de vive-eau (95)	-5.01 m
	Marée astronomique (120)	-6.38 m

Tableau 2-1 : Niveaux d'eau à Erquy par rapport au niveau moyen de la mer (source: SHOM)

Selon les résultats de la modélisation Telemac 2D, l'élévation du niveau d'eau par rapport au niveau moyen de la mer est :

		Niveau d'eau
Pleine mer	**Marée astronomique (120)**	5.55 m
	Marée moyenne de vive-eau (95)	4.55 m
	Marée moyenne de morte-eau (45)	2.22 m
Basse mer	**Marée moyenne de morte-eau (45)**	-2.35 m
	Marée moyenne de vive-eau (95)	-4.72 m
	Marée astronomique (120)	-5.83 m

Tableau 2-2 : Niveaux d'eau au milieu du parc éolien par rapport au niveau moyen de la mer (source: TELEMAC 2D)

Ces valeurs correspondent à un marnage sur le site éolien de **11.4 m** pour un coefficient 120, de **9.27 m** pour un coefficient 95, et de **4.57 m** pour un coefficient 45.

2.3.1.3 Surcotes de tempêtes

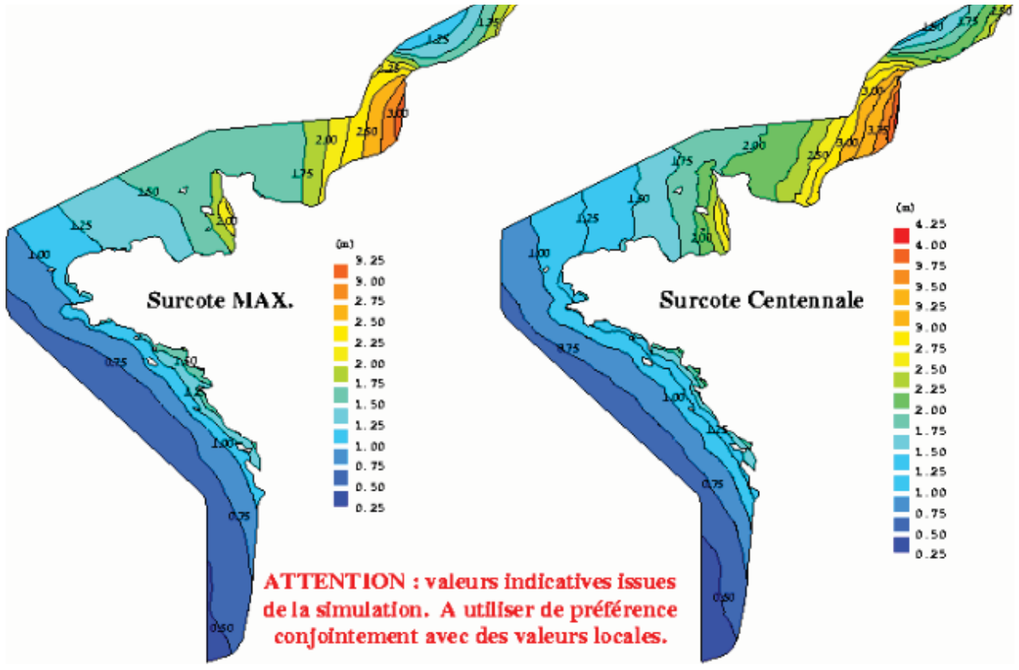
Les conditions atmosphériques (vent, pression) peuvent induire des niveaux d'eau plus élevés que ceux prédits par la marée astronomique. Ces événements sont appelés « surcotes de tempête » car ils sont souvent associés à des tempêtes. Cependant, les facteurs de surcotes sont complexes car ils résultent des interactions entre la marée, les vents qui poussent sur la surface de la mer, la pression plus basse, les états de mer, la configuration du fond marin et les effets d'étranglement liés à la géométrie de la côte.

Dans le cadre du projet DISCOBOLE (EDF-R&D) [Réf. 5], une étude consacrée aux surcotes de tempêtes le long des côtes atlantiques françaises et en Manche a été réalisée. Le calcul est basé sur les résultats d'un modèle bidimensionnel (TELEMAC) mis en place pour l'étude. Les surcotes de tempêtes ont été calculées comme la différence entre les scénarios avec et sans forçage atmosphérique dans le modèle. Le modèle a été validé avec de longues séries temporelles provenant de marégraphes du réseau SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales).

Le modèle a tourné de 1979 à 2003, et une extrapolation des résultats a été faite pour obtenir les niveaux d'eau extrêmes pour une période de retour de 100 ans.

Les résultats pour les forts / faibles niveaux d'eau sont montrés sur la Figure 2-11 :

- Les surcotes maximales positive et négative calculées lors des simulations sont de l'ordre de **1.50 m** et **-0.7 m** respectivement dans la zone du parc éolien.
- Les surcotes pour une période de retour de 100 ans sont de **1.75 m** et de **-0.75 m** respectivement dans la zone du projet.



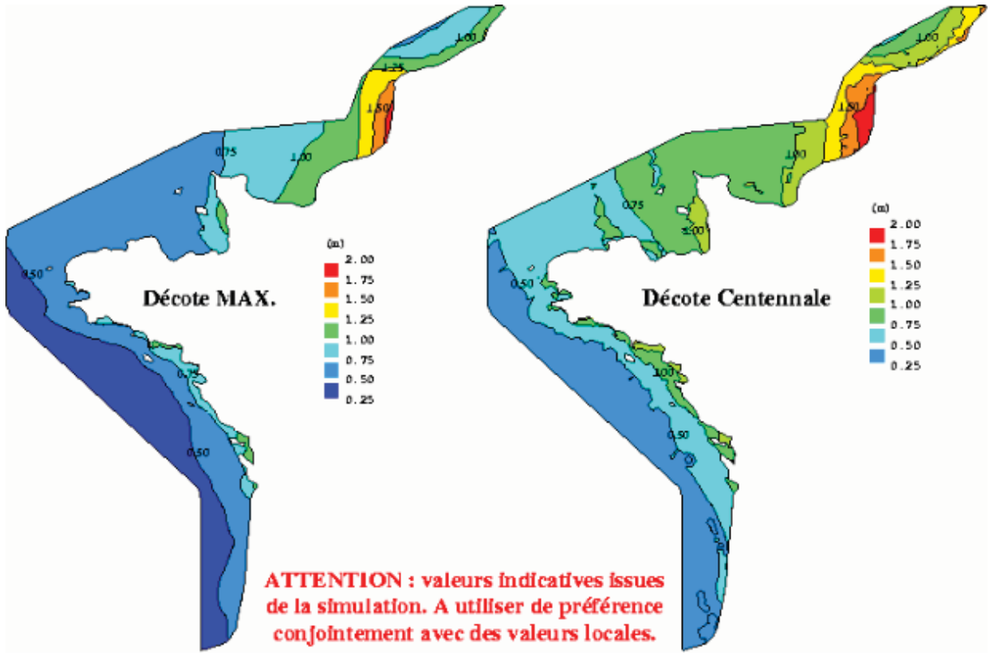


Figure 2-11 : Surcotes positives et négatives issues du projet DISCOBOLE (source: EDF-R&D)

2.3.1.4 Extrêmes

En 2012, le CETMEF et le SHOM ont mené une étude statistique pour évaluer le niveau d'eau extrême le long de la côte française [Réf. 4]. Pour cela, ils ont utilisé les enregistrements de plusieurs marégraphes côtiers. L'analyse porte sur les différences entre l'élévation de la marée astronomique et les observations du niveau de l'eau. Ces données sont extrapolées pour obtenir des valeurs extrêmes sur des périodes de retour plus longues, cette estimation est faite en utilisant la Loi de Gumbell.

Les résultats présentés ici diffèrent des valeurs présentées dans la section 2.3.1.3, car cette analyse repose sur des mesures in situ. Les valeurs présentées ici intègrent toutes sortes de phénomènes tels que les tempêtes et les marées exceptionnelles, tandis que les résultats de la section précédente (Discobole) sont une différence théorique entre les surcotes de tempête et le niveau de marée astronomique.

Les résultats sont présentés sur des cartes de niveaux d'eau extrêmes positifs et négatifs (voir un exemple sur la Figure 2-12). Les extrêmes sont calculés pour des périodes de retour de 10, 20, 50 et 100 ans. L'ensemble des données donne l'élévation de l'eau par rapport à la référence IGN69. Selon le SHOM, dans la zone du projet, il y a une différence d'environ 50 cm entre cette référence et le niveau moyen de la mer.

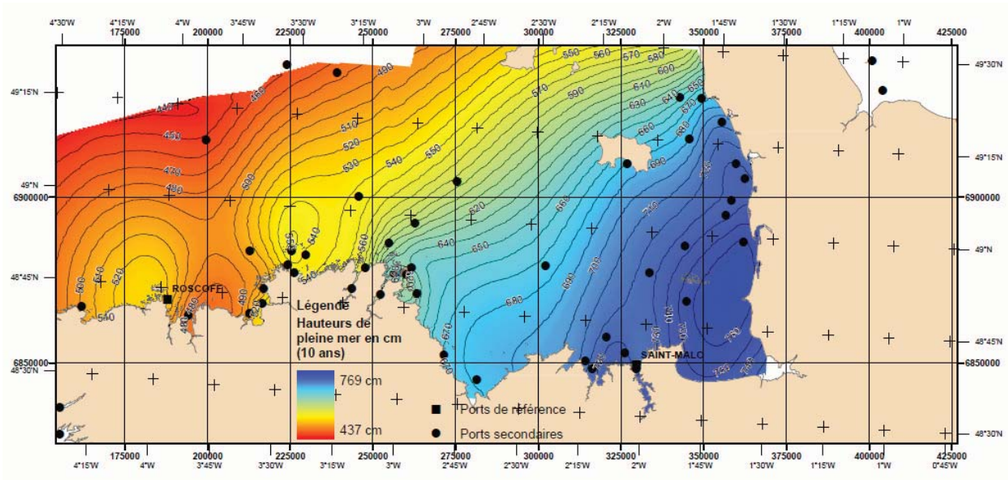


Figure 2-12 : Niveaux d'eau extrêmes pour une période de retour de 10 ans au nord de la Bretagne. Les niveaux d'eau sont donnés par rapport au niveau zéro IGN69. Les « ports de référence » et les « ports secondaires » sont les points où des observations ont été utilisées (Source: SHOM-Cetmef)

Les cartes montrent qu'il y a une différence d'environ 20 cm entre les extrêmes au nord et ceux au sud du parc éolien, avec des valeurs plus élevées dans le sud pour les niveaux maximaux. Pour un point au milieu du parc éolien, nous obtenons les valeurs suivantes (par rapport au niveau moyen) :

Période de retour	10 ans	20 ans	50 ans	100 ans
Niveau maximal	6.20 m	6.30 m	6.38 m	6.42 m
Niveau minimal	-6.05 m	-6.10 m	-6.25 m	-6.30 m

Tableau 2-3 : Niveaux d'eau extrêmes par rapport au niveau moyen au milieu du parc éolien (source: SHOM-Cetmef)

2.3.2 Courants

Dans la Manche et le Golfe de Gascogne, les courants dominants sur l'ensemble de la colonne d'eau sont induits par la marée astronomique. Des courants de surface induits par le vent apparaissent aussi en surface pendant et après de forts coups de vent.

Les courants de marée sont induits par les changements locaux des niveaux de l'eau ; les mêmes périodes apparaissent donc dans les courants et dans les niveaux d'eau : les forts courants alternés (flot et jusant) séparées par des étales (renverses de courant) sont observés environ quatre fois par jour.

Le cycle vive-eau / morte-eau se répète environ 2 fois par mois. La vive-eau se traduit par des courants de marée plus forts que la moyenne et la morte-eau par des courants moins forts.

Outre ces variations temporelles régulières, les courants de marée peuvent être intensifiés dans certaines zones de la Manche à proximité des côtes, en raison de la position des points amphidromiques[2] et de la morphologie du trait de côte. Les courants de marée sont ainsi plus forts dans les zones peu profondes et étroites appelées « raz » (terme signifiant également « courants»), telles que le Raz de Sein et le Raz Blanchard. Les courants de marée sont plus faibles au large (en eau plus profonde) ou dans les zones étendues.

Les bases de données de courants de marée utilisées pour cette étude sont les suivantes :

- Atlas de marée du SHOM le long des côtes françaises en différents ports de référence
- Modélisation TELEMAC-2D implémenté sur la zone d'étude

Ce chapitre présente les deux analyses suivantes :

- Marée astronomique : courants de marée pour différents coefficients de marée. Cette analyse se rapporte aux cycles de flots et de jusants.
- Courants induits par le vent : courants provoqués par un coup de vent, qui peuvent s'ajouter au courant de marée maximum.

2.3.2.1 Marée astronomique

Les courants de marée atteignent leur intensité maximale pendant le flot environ 3 heures avant la pleine mer (PM-3), et pendant le jusant environ 4 heures après la pleine mer (PM+4). Ils sont minimaux pendant les étales de basse mer (vers BM+1) et de pleine mer (entre PM et PM+1).

Le courant de flot est orienté vers le sud-est et le courant de jusant est orienté vers le nord-ouest. Comme fréquemment en eau peu profonde, le courant de flot (courant s'écoulant vers le sud-est) est toujours plus fort que le courant de jusant (courant s'écoulant vers le nord-ouest). Cet écart augmente avec le coefficient de marée.

Le courant de marée maximal théorique sur le site du parc éolien est un courant de sud-est avec une vitesse de 1.6 m/s.

[2] Les points amphidromiques sont des points ou l'amplitude de la marée est nulle. Ils sont provoqués par des phénomènes de résonnance des ondes de marée. L'onde de marée « tourne » autour de ces points.

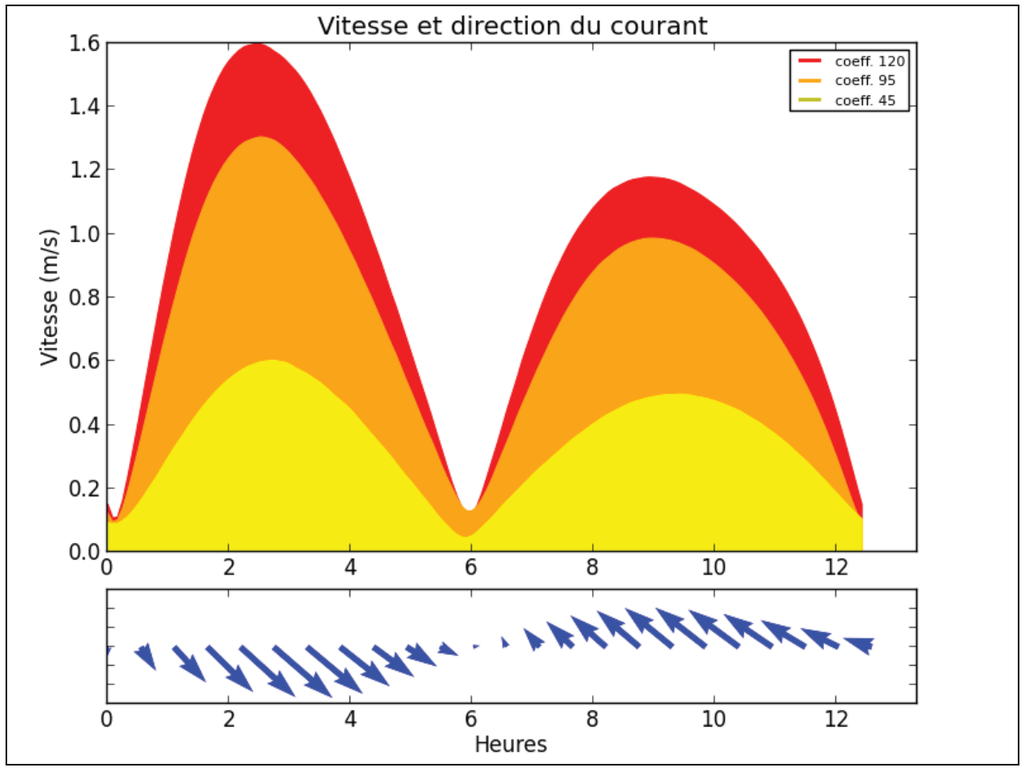


Figure 2-13 : Amplitude et direction du courant de marée pendant un cycle de marée. La figure du bas représente la direction du courant pendant une marée exceptionnelle (coeff. 120). Source: Telemac 2D

		Courant de marée (m/s)											
		PM-6	PM-5	PM-4	PM-3	PM-2	PM-1	PM	PM+1	PM+2	PM+3	PM+4	PM+5
Marée exceptionnelle (120)	Vit (m/s)	0.53	0.31	1..27	1.6	1.42	0.95	0.37	0.34	0.89	1.15	1.16	1.02
	Dir (°)	150	-57	-42	-40	-37	-31	-20	124	138	139	139	141
Vive-eau (95)	Vit (m/s)	0.45	0.19	0.95	1.30	1.17	0.80	0.35	0.23	0.67	0.94	0.97	0.85
	Dir (°)	151	-67	-43	-40	-38	-32	-18	110	135	138	139	142
Morte-eau (45)	Vit (m/s)	0.21	0.11	0.39	0.58	0.55	0.37	0.14	0.11	0.30	0.44	0.49	0.45
	Dir.(°)	165	-86	-47	-42	-39	-35	-22	118	136	139	142	146

Tableau 2-4 : Courants de marée dans la zone du parc éolien référencés à la pleine mer (PM) sur le site, pour différents coefficients de marée. La direction est « la direction vers laquelle s'écoule le courant », en degrés. Par convention, la direction 0° correspond à la direction « est » et la direction 90° à la direction « nord ». Source: Telemac 2D

2.3.2.2 Courants induits par le vent

Si le courant de marée affecte toute la colonne d'eau, les courants induits par le vent ont clairement une composante tridimensionnelle. Leur intensité diminue selon une loi exponentielle de la surface au fond. Sous nos latitudes, au large, le courant de surface induit par le vent est orienté à 45° sur la droite de la direction du vent. En eau profonde, la direction évolue avec la profondeur selon une spirale appelée spirale d'Ekman. Cette théorie peut être fortement modifiée dans les zones côtières, où des études appropriées doivent être effectuées (cf. étude Actimar, Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1).

L'intensité du courant induit par le vent a fait l'objet de beaucoup de discussions dans la littérature, avec des estimations allant généralement de 1% à 3% de la vitesse du vent. Des études récentes tendent à montrer que la valeur correcte est dans la partie inférieure de cet intervalle. Ardhuin et al (2009) [Réf. 6] ont étudié le courant induit par le vent en utilisant des mesures in situ de radar HF sur la côte ouest de la Bretagne. Après avoir filtré le signal de marée, ils ont montré que le courant résiduel est de l'ordre de 1 à 1.8% de la vitesse du vent, dans une direction de 10 à 40° sur la droite de la direction du vent. Compte tenu des similitudes en termes de conditions de courant de marée et de vent entre la Baie de Saint-Brieuc et l'ouest de la Bretagne, nous pouvons considérer que ces valeurs sont applicables à notre domaine d'intérêt.

L'analyse réalisée avec des données NCEP-CFSR (voir 4.2.1.3) donne une vitesse maximale du vent de 28.3 m/s pour une période de retour de 100 ans, avec une direction de provenance d'ouest. Dans cette situation extrême, nous pouvons en déduire un courant induit par le vent de 0.51 m/s provenant d'une direction entre ONO et NO, pour une période de retour de 100 ans.

Selon le Tableau 2-4, le courant de marée maximal dans la zone atteint 1.6 m/s et vient du NO. Selon ces estimations, le courant total avec une période de retour de 100 ans peut atteindre **2.11 m/s** et vient du **NO**.

2.3.3 Vagues

Les vagues atteignant la zone d'étude sont générées essentiellement par les perturbations atmosphériques en provenance de l'Atlantique. Les houles d'ouest générées en Atlantique se propagent en se dissipent vers l'est dans la Manche ; elles se superposent à la mer du vent générée localement dans le golfe de Saint-Malo. Plus élevés en automne et en hiver, les états de mer faiblissent au printemps et en été.

Les états de mer dans la zone du projet ont été reconstitués sur une période de 20 ans et analysés dans le cadre de l'étude météo océanique réalisée pour le dimensionnement des fondations des turbines (Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1). Les principaux résultats de l'étude météo océanique sont des séries temporelles sur 20 ans des principaux paramètres synthétiques des états de mer dans la région du parc

éolien. Un exemple de résultat obtenu lors d'une tempête en mars 2008 est présenté sur la Figure 2-14. Des analyses statistiques ont été réalisées en deux points dans le parc éolien (cf. Figure 2-14).

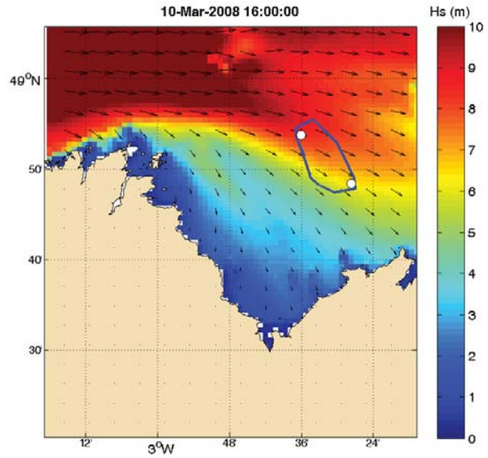


Figure 2-14 : Position des points d'analyse statistique dans le parc éolien (Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1).

		Hs (m)																	
		0.0 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	5.0 - 5.5	5.5 - 6.0	6.5 - 7.0	7.0 - 7.5	7.5 - 8.0	8.0 - 8.5	8.5 - 9.0	Pbb
Tp (s)	1 - 2	0.04																	0.04
	2 - 3	2.46	0.94																3.40
	3 - 4	2.42	24.79	2.24															29.45
	4 - 5	1.33	22.70	27.95	2.60	0.07													54.64
	5 - 6	1.02	7.20	25.65	19.02	1.52	0.09	0.01											54.49
	6 - 7	2.60	8.47	9.41	12.07	10.16	1.60	0.11	0.01										44.42
	7 - 8	8.78	24.79	10.66	6.67	4.45	4.22	1.87	0.45	0.01									61.90
	8 - 9	11.89	46.97	16.26	6.33	3.33	2.28	1.59	0.76	0.29	0.09								89.77
	9 - 10	14.04	70.26	33.77	11.65	4.89	2.50	1.92	1.32	0.39	0.06								140.82
	10 - 11	9.39	55.10	39.50	13.57	5.40	2.54	1.36	0.84	0.66	0.34	0.09	0.01						128.79
	11 - 12	6.16	39.44	34.87	16.42	6.63	3.30	1.50	0.88	0.50	0.40	0.11	0.05	0.02					110.28
	12 - 13	3.91	30.53	37.19	23.23	11.33	5.68	2.45	1.12	0.46	0.28	0.22	0.09	0.03					116.49
	13 - 14	1.64	14.08	22.82	17.36	9.47	5.13	2.57	1.15	0.44	0.23	0.16	0.12	0.03	0.01				75.19
	14 - 15	0.76	7.32	11.74	11.19	8.29	3.95	2.25	1.04	0.44	0.30	0.07	0.06	0.07	0.03	0.01			47.50
	15 - 16	0.35	3.24	3.72	4.02	3.39	2.11	0.97	0.52	0.22	0.11	0.06	0.03	0.03	0.01	0.01			18.78
	16 - 17	0.28	2.66	2.58	2.67	2.62	1.84	0.91	0.52	0.15	0.10	0.06	0.02	0.03	0.01	0.02	0.01		14.47
	17 - 18	0.14	0.73	0.76	0.91	0.88	0.71	0.56	0.37	0.07	0.02	0.02		0.02	0.01			0.02	5.20
	18 - 19	0.09	0.67	0.47	0.37	0.30	0.29	0.18	0.13	0.02	0.02	0.02		0.01	0.01	0.02	0.01	0.01	2.61
	19 - 20	0.05	0.29	0.27	0.23	0.09	0.09	0.10	0.02	0.01	0.02								1.16
	20 - 21	0.03	0.10	0.08	0.05	0.02	0.02	0.01											0.30
	21 - 22	0.02	0.07	0.05	0.02	0.01	0.01												0.18
	22 - 23		0.03	0.04	0.01	0.01	0.01												0.10
	23 - 24				0.01														0.01
Pbb		67.40	360.39	280.02	148.35	72.84	36.34	18.35	9.14	3.64	1.97	0.79	0.37	0.23	0.07	0.06	0.02	0.02	1000

Tableau 2-5 : Diagramme (Hs/Tp) au point nord du parc éolien.
Probabilités (Pbb) exprimées en ‰.

Le Tableau 2-5 et la Figure 2-15 présentent les principales caractéristiques des états de mer au point nord.

- La hauteur significative des vagues (Hs)[3] évolue entre 0.1 m et 8.5 m avec une valeur médiane de 1.1 m et une valeur moyenne de 1.3 m. 70.8% des vagues ne dépassent pas 1.5 m et 85.6% ne dépassent pas 2 m (figure en haut à gauche). La proportion des vagues dépassant 4 m est inférieure à 1%.
- La période pic, Tp[4], évolue entre 1.5 s et 23.3 s avec une valeur moyenne de 10 s. La période moyenne (T_{m02})[5] évolue de 1.3 s à 12.5 s avec une valeur moyenne de 4.7 s.
- Le diagramme de dispersion des vagues (figure en bas à gauche) montre que la houle d'ONO prédomine largement (84% des cas). Le reste des vagues est essentiellement en provenance de NO à NE.
- La rose directionnelle (figure en bas à droite) confirme la prédominance du secteur ONO.
- Les vagues de plus de 2.0 m de haut représentent 14.4%. Elles viennent principalement du secteur ONO.

[3] Hs représente la moyenne des hauteurs (mesurées entre crête et creux) du tiers des plus fortes vagues. La hauteur maximale des vagues individuelles (Hm) peut être significativement plus grande que la hauteur significative (Hs). En eau profonde, le rapport entre les 2 paramètres est de l'ordre de 1.86.

[4] Période pic associée au maximum d'énergie dans le spectre des vagues.

[5] Période moyenne calculée à partir du moment d'ordre 2 du spectre d'énergie des vagues

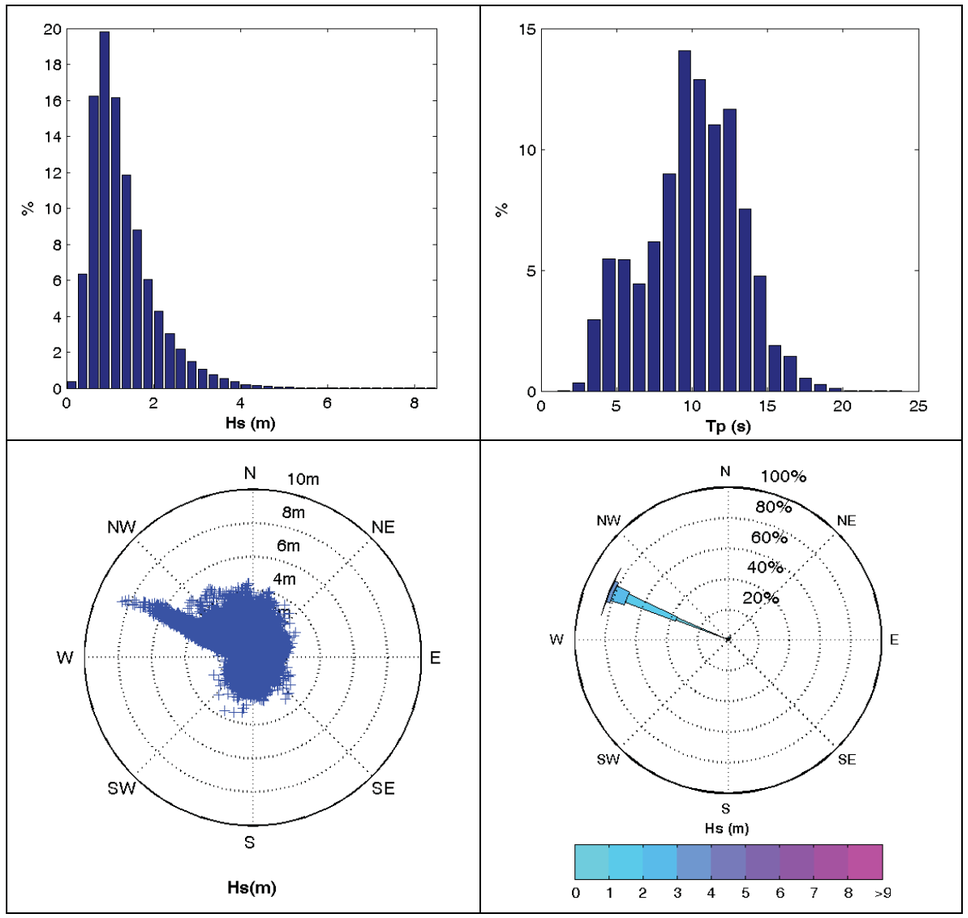


Figure 2-15 : Distributions annuelles de la hauteur et de la direction de provenance des vagues au point nord. En haut : histogrammes de la hauteur (à gauche) et de la direction de provenance (à droite) des vagues. En bas : diagramme de dispersion (à gauche) et rose des vagues pour l'ensemble des données (à droite). Source : Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1.

2.4 HYDROLOGIE

2.4.1 Rejets des rivières

Trois rivières principales sont présentes dans la zone de la Baie de Saint-Brieuc : Rance, Arguenon, et Gouët (voir Figure 2-16). Leurs 3 bassins versants ont une surface cumulée d'environ 3150 km^2.

En utilisant la valeur de transport de 6 à 8 l/s/km^2 sur ces bassins versants (LCHF, 1987) [Réf. 7], le débit total de ces 3 cours d'eau est d'environ 20 à 25 m^3/s. Ces apports sont suffisamment faibles pour ne pas affecter le courant local, ni la structure de densité à proximité du parc éolien.

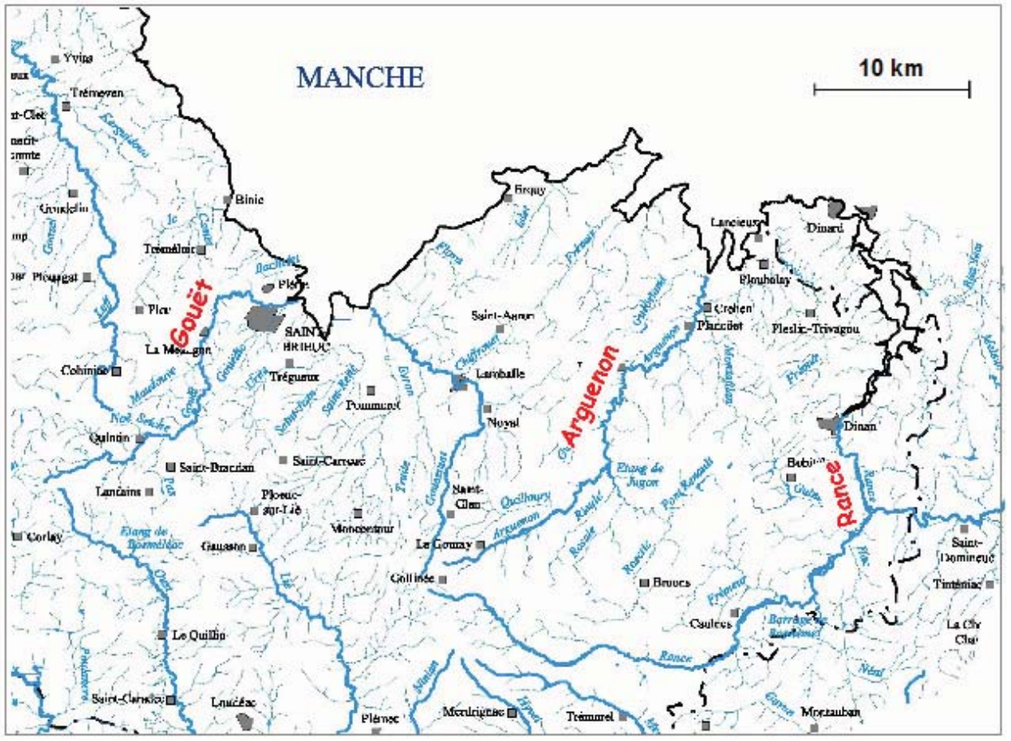


Figure 2-16 : Carte des bassins versants des 3 rivières principales dans la zone du projet

2.4.2 Apports sédimentaires

L'apport de sédiments des rivières peut être estimé en utilisant les valeurs de la rivière «Rance». La quantité de sédiments transportés par ce cours d'eau a été estimée à 1800 m^3/an (Le Normant et al, 1999 [Réf. 8]), pour un bassin versant d'une superficie de 960 km^2. D'après cette même référence, la concentration des sédiments rejetés par ces cours d'eau peut être estimée à 500 mg/l. L'apport sédimentaire correspondant dans la Baie de Saint-Brieuc est donc approximativement de 3600 t/an.

En tenant compte de tous les apports d'eau dans la région, cette estimation conduit à un flux spécifique dans la Baie de Saint-Brieuc d'environ 12 000 t/an. Ces sédiments ont une tendance à se déposer dans des endroits abrités à proximité de la côte, mais aucune information précise n'est connue. Le volume concerné et la distance au parc éolien font que ces sédiments sont très peu susceptibles d'atteindre la zone du parc en quantités significatives.

2.4.3 Turbidité

Ifremer étudie la turbidité des eaux marines dans le cadre du «Réseau de surveillance de phytoplancton et de phytotoxines» (REPHY). Quatre stations d'observation sont implantées autour de la Baie de Saint-Brieuc (les coordonnées de ces stations sont notées en Degré Décimale Minute) :

- La station «Bréhat», entre l'île de Bréhat et le point Arcouest (48°49.87' N ; 2°59.874' W) : 351 observations de 1989 à 2004 ;
- La station «Jospinet», à 4 km au sud-ouest de Dahouët (48°33.10' N ; 2°36.164' W) : 144 observations de 1989 à 1997 ;
- La station «Dahouët» (48°34.83' N ; 2°34.22' W) : 214 observations de 1997 à 2004 ;
- La station «Saint-Cast» (48°38.44' N ; 2°14.59' W) : 357 observations de 1992 à 2004.

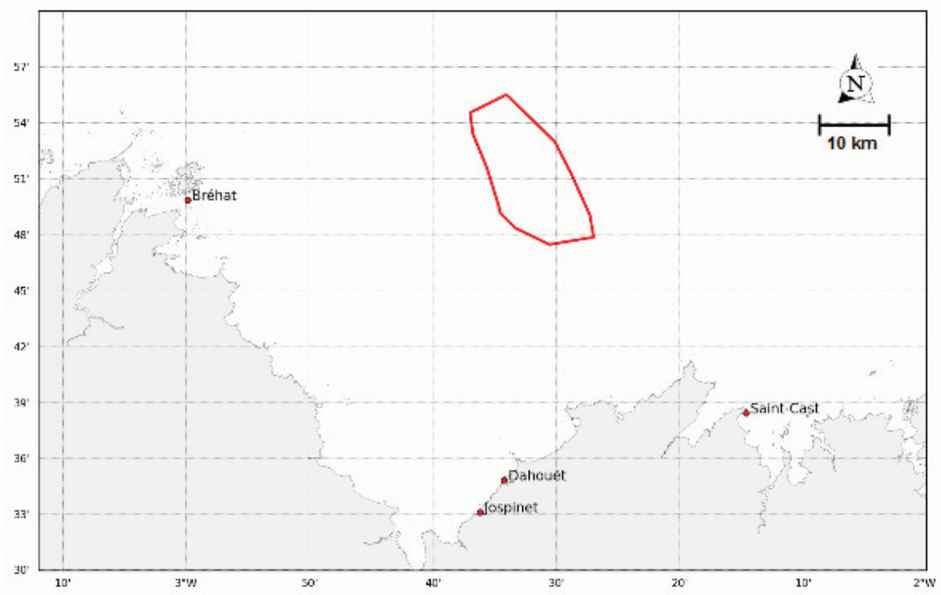


Figure 2-17: Position des stations REPHY – Coordonnées WGS 84.
Le polygone rouge représente le parc éolien.

Les turbidités moyennes sont respectivement de 1.69 NTU[6] pour « Bréhat », 8.30 NTU pour « Jospinet », 5.55 NTU pour « Dahouët », et 2.61 NTU pour « St-Cast ». A partir de précédentes études dans ce domaine (Optimer et al, 2002 [Réf. 12]), on obtient une relation entre la turbidité et la concentration. Elle s'exprime ainsi :

Turbidité (NTU) = 0.608 x (Concentration de matières en suspension) + 1.47

Appliquée aux valeurs précédentes, cette estimation donne les valeurs moyennes suivantes :

1 à 2 mg/l à « Bréhat », station située en eau profonde avec des eaux très claires,

10 à 12 mg/l à « Jospinet »

6 à 7 mg/l à « Dahouët »

2 à 3 mg/l à « St-Cast »

Dans le parc, les mesures du survey océanographique (cf. Ref) réalisées pour le projet de parc éolien de Saint-Brieuc fournissent l'évolution de la turbidité en deux points situés approximativement à 40 km au nord de Saint-Brieuc. Au point nord, le turbidimètre fournit des données sur la période allant du 8 mars 2013 au 23 avril 2013. Les valeurs évoluent avec la marée, entre 0.8 et 3 NTU. Les forts coefficients de marée produisent un brassage plus important des eaux et une augmentation de la turbidité. Au point sud, le turbidimètre fournit des données sur la période allant du 9 mars 2013 au 29 mars 2013. La turbidité évolue avec la marée, généralement entre 0.6 et 3 NTU mais on remarque ponctuellement des augmentations significatives de la turbidité jusque 9.25 NTU.

2.4.4 Images satellites de Previmer

Une autre source de données est fournie par Previmer, le système de prévision côtière opérationnel et d'observation de l'Ifremer. Basé sur 10 années d'observations satellites, leur site internet donne des valeurs moyennes mensuelles de turbidité. Les valeurs les plus élevées sont observées en février, les plus faibles en juillet (voir Figure 2-18 et Figure 2-19).

Dans le parc éolien, les concentrations de matières en suspension sont très faibles. Les valeurs moyennes varient approximativement entre 1 mg/l en juillet et 5 mg/l en février. Ces concentrations sont loin des concentrations élevées observées à proximité du « plateau des Minquiers », à l'est du parc, où les faibles profondeurs sont responsables d'une importante remise en suspension de sédiments. Des concentrations plus élevées sont également rencontrées dans le sud de la Baie de Saint-Brieuc, qui est une zone ensablée.

[6] La mesure NTU est une méthode néphélométrique normalisée couramment utilisée pour mesurer la turbidité de l'eau. Elle consiste à mesurer l'intensité de la lumière dispersée à un angle de 90 degrés par rapport au trajet de la lumière incidente.

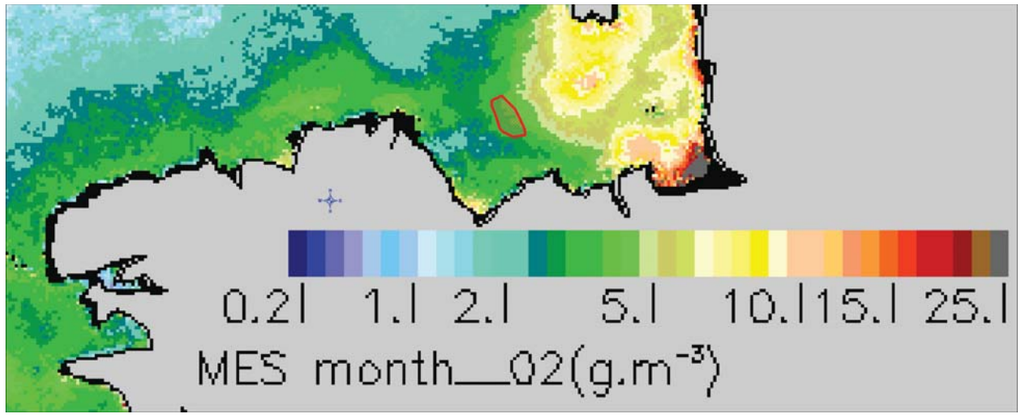


Figure 2-18 : Concentrations moyennes de matières en suspension en février (Source: www.previmer.fr). Le polygone rouge représente le parc éolien.

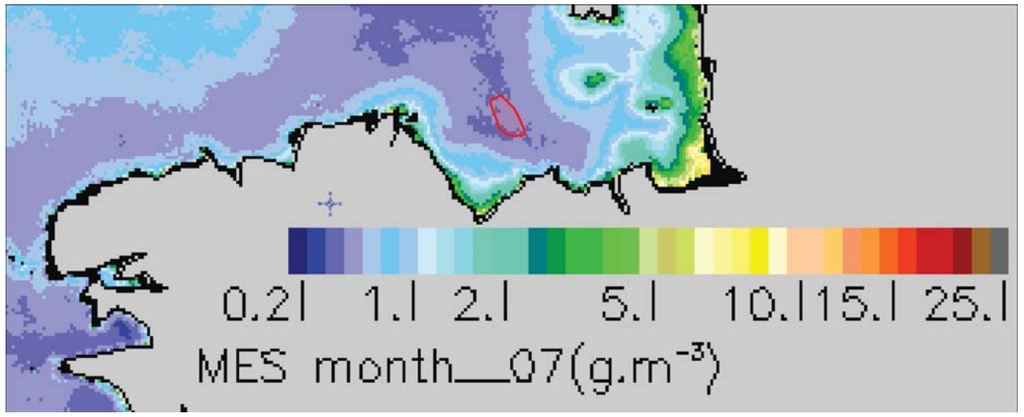


Figure 2-19 : Concentrations moyennes de matières en suspension en juillet (Source: www.previmer.fr). Le polygone rouge représente le parc éolien.

Ces valeurs sont cohérentes avec les éléments donnés par les mesures du reseau REPHY (voir section 2.4.3) : des valeurs relativement élevées pour les stations côtières de la Baie de Saint-Brieuc (Jospinet et Dahouêt), et des valeurs plus faibles pour les stations « St Cast » et « Bréhat ».

2.5 EVOLUTION DU FOND DE L'OCEAN

2.5.1 Levés bathymétriques

Deux séries de levés sont disponibles pour étudier l'évolution à long terme de la bathymétrie sur le site :

- Une compilation de sondages réalisée par le SHOM de 1926 à 1931

Les levés de G-TEC réalisés dans le cadre du projet éolien (G-TEC S.A., 2013 [Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

- Réf. 1])

La Figure 2-20 montre la bathymétrie de la zone d'implantation obtenue à partir des mesures bathymétriques réalisées entre 1926 et 1931. Les motifs rectilignes qui apparaissent sur la carte sont un biais de la technique utilisée pour calculer les profondeurs : le niveau estimé de la marée a dû être retiré de la profondeur mesurée pour chacune des trajectoires du bateau océanographique. L'exactitude de cette estimation n'était pas suffisante pour assurer la cohérence complète des niveaux.

La bathymétrie G-TEC est également tracée sur la Figure 2-21 avec la même échelle de couleur pour faciliter les comparaisons.

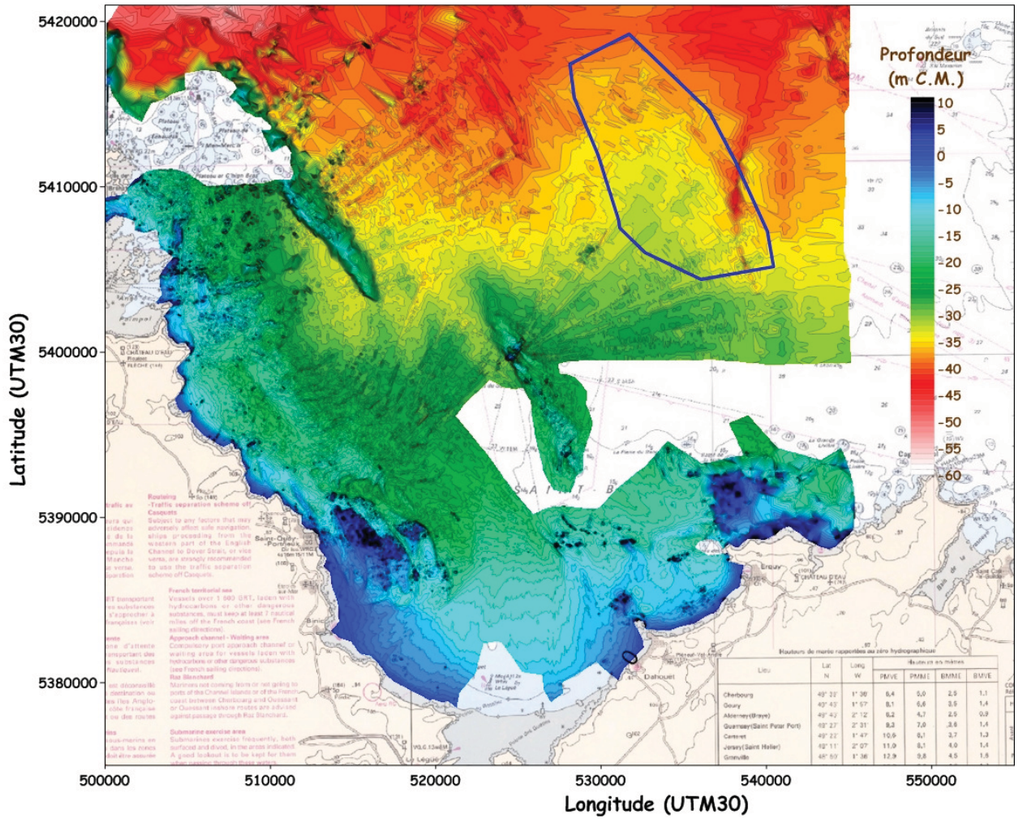


Figure 2-20 : Bathymétrie issue des levés du SHOM de 1926 à 1931, par rapport au niveau CM. Coordonnées [m] WGS 84 - UTM30N (le polygone bleu délimite la zone d'implantation du parc éolien)

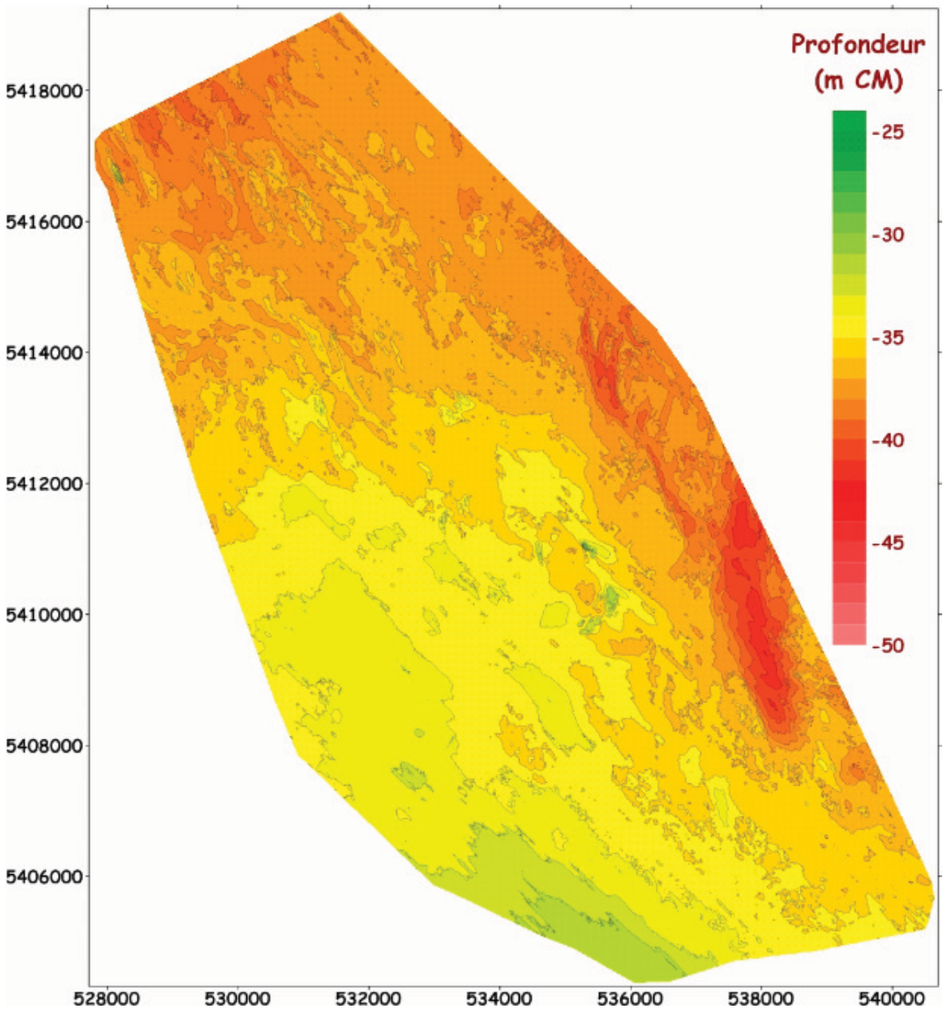


Figure 2-21 : Bathymétrie détaillée du parc éolien (G-TEC - 2012). Coordonnées [m] WGS 84 - UTM30N

2.5.2 Comparaison des données

Les deux jeux de données sont comparés pour estimer l'évolution de la bathymétrie au cours des 80 dernières années. La différence entre les deux jeux de données est présentée sur la Figure 2-22 mais 2 artefacts rendent l'interprétation de cette comparaison très difficile :

- Le manque de précision dans l'estimation de la hauteur d'eau à la position du bateau
- La résolution du levé historique (1926-1931) : Cette résolution est trop grossière pour décrire correctement les hétérogénéités de la bathymétrie. Par conséquent, ces hétérogénéités apparaissent dans la différence entre les deux jeux de données.

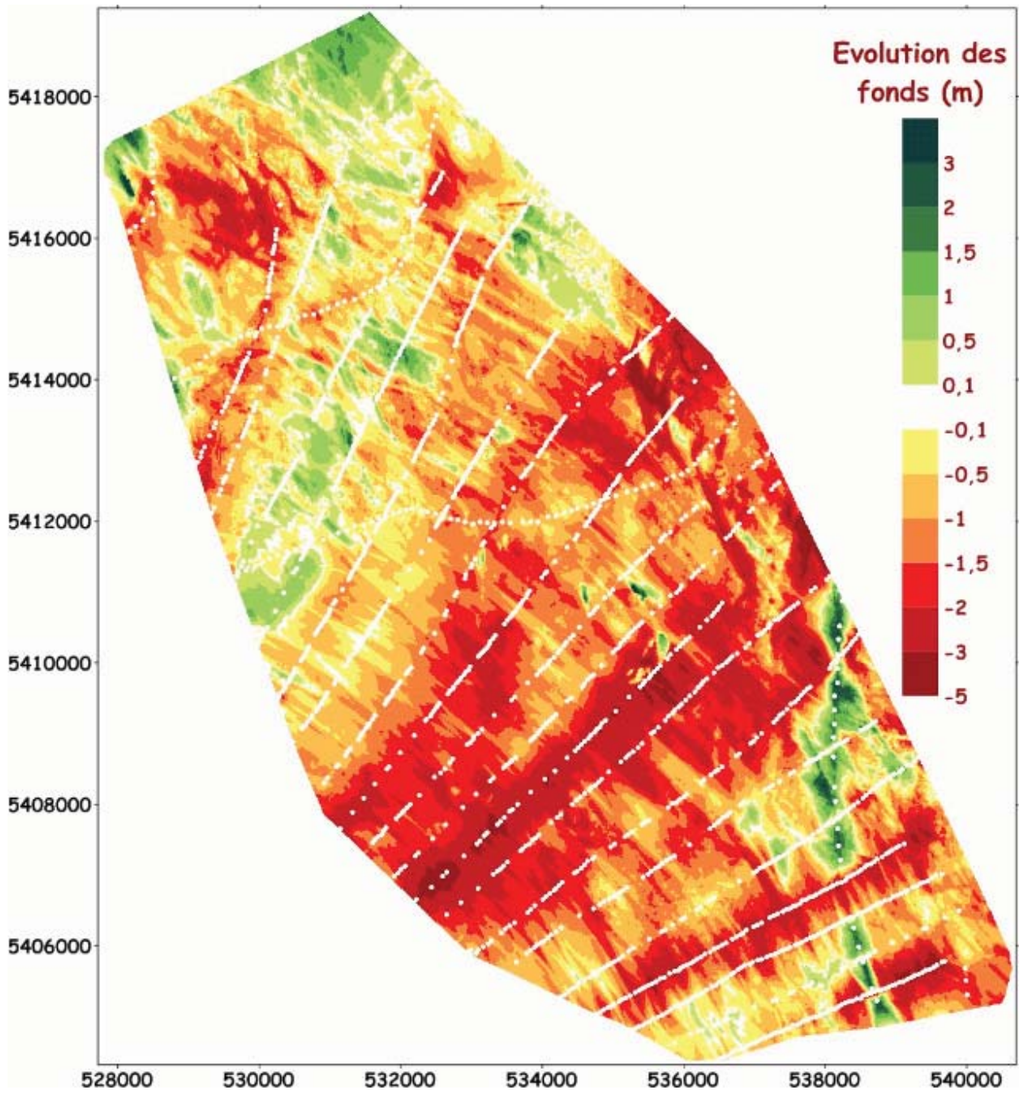


Figure 2-22 : Evolution des fonds entre 1926/1931 et 2012 dans la zone du parc éolien. Coordonnées [m] WGS 84 - UTM30N

Les différences entre les deux séries de données vont de -5 m à 3 m. Les constations faites sur la nature du sédiment et sur son érodabilité par les courants ambiants montrent que de telles évolutions ne sont pas réalistes. Elles sont donc principalement dues aux artefacts décrits précédemment. Cette impression est renforcée par le fait qu'une corrélation semble exister entre les différences et la position du levé historique. La comparaison de ces deux bathymétries n'apporte donc pas d'éléments d'analyse concluants sur le caractère mobile ou non des sédiments sur la zone. Une expertise de l'évolution sédimentaire ne peut s'effectuer que par extrapolation dans le futur des évolutions passées. Aucune donnée disponible sur la zone n'est suffisante pour permettre de réaliser cette expertise.

3 IMPACT HYDRODYNAMIQUE

Ce chapitre vise à caractériser l'influence du projet de parc éolien de la baie de Saint-Brieuc sur les courants. Les caractéristiques du projet sont décrites dans la première section (§ 3.1). Les interactions entre l'écoulement et les fondations sont ensuite présentées par une approche théorique (§ 3.2) puis les effets du projet de parc éolien sur ll'hydrodynamique sont évalués par modélisation numérique (§ 3.3 à § 3.5).

3.1 CARACTERISTIQUES DU PARC EOLIEN ET DES FONDATIONS

Le parc est composé de 62 éoliennes et d'une sous-station électrique répartis sur 7 lignes, avec une orientation NNO - SSE. L'espacement entre deux lignes est d'environ 1 300 m. L'espacement entre deux éoliennes d'une même ligne est d'environ 1 000 m. La profondeur d'eau dans le parc varie de -29 m à -42 m (par rapport à la plus basse mer astronomique).

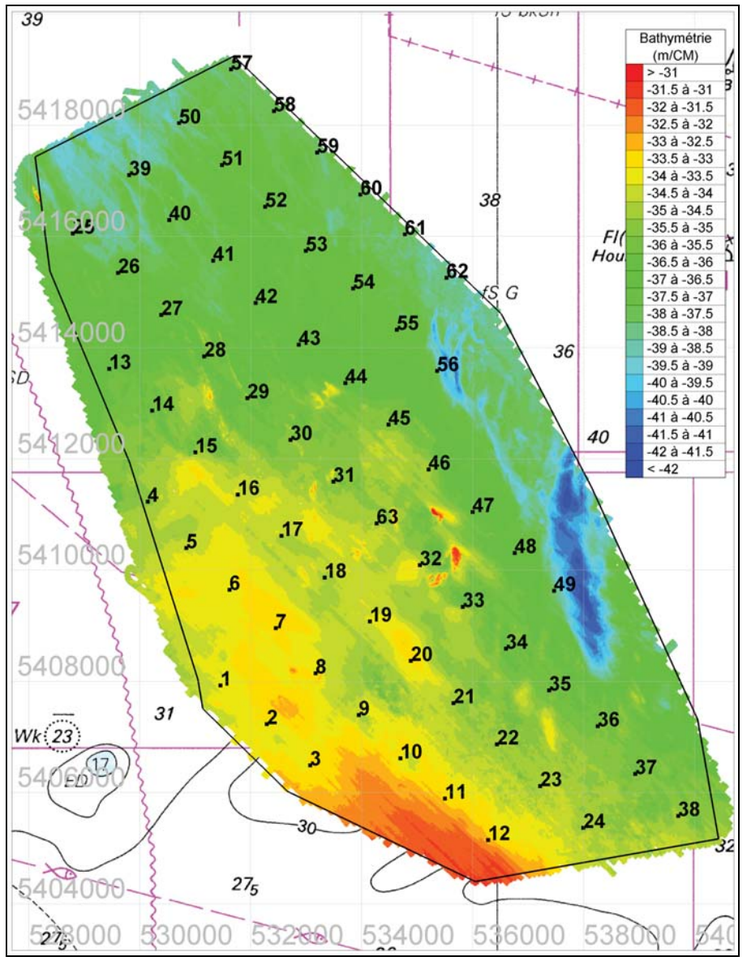


Figure 3-1: Localisation des éoliennes et bathymétrie (par rapport à la plus basse mer astronomique) - coordonnées [m] WGS84 - UTM 30N. La fondation n°63 est celle de la sous-station électrique.

Les fondations prévues pour les turbines sont des structures à 4 jambes de type jacket. Les jambes sont des cylindres de 1.62 m de diamètre extérieur. Les 4 pieds forment un carré d'environ 25 m de côté. Des bras diagonaux sont positionnés entre les jambes de chaque côté de la structure.

Un paramètre clé pour le comportement hydrodynamique d'une structure composée de cylindres est le ratio entre l'espacement des jambes (noté *L*) et leur diamètre (noté *D*). Pour la structure jacket, la littérature montre que les effets de proximité restent limités (voir par exemple Ferrant et al, 1999 [Réf. 21]). En conséquence, **chaque jambe peut être considérée individuellement** dans l'analyse des effets hydrodynamiques locaux.

Les fondations jackets ont des structures trop fines et trop complexes pour être prises en compte de manière réaliste dans des modèles numériques hydrodynamiques développés pour l'étude des écoulements géophysiques (type système Telemac). Pour les modélisations

numériques, le principe de la simulation des fondations jackets est de remplacer chaque jacket par une structure plus simple (un cylindre) dont la résistance à l'écoulement est équivalente. Le diamètre de ce cylindre est appelé « diamètre équivalent ».

Ce diamètre équivalent est calculé en prenant en compte l'ensemble des éléments de la structure (jambes, bracons…). Les dimensions de tous ces éléments étant connues, il est possible de calculer la résistance à l'écoulement de chacun de ces éléments. La résistance totale de la structure est calculée en faisant la somme des résistances de chacun des éléments. Cela signifie qu'aucun effet de masquage n'est pris en compte, il s'agit donc d'une approche majorante

Le diamètre équivalent retenu pour cette étude est de 15.7 m.

3.2 INTERACTION ENTRE L'ECOULEMENT DE L'EAU ET LES FONDATIONS : APPROCHE THEORIQUE

Il existe deux paramètres importants pour caractériser un écoulement autour d'un cylindre : le nombre de Reynolds et le nombre de Keulegan-Carpenter. **Le nombre de Keulegan-Carpenter est associé à l'action des vagues, tandis que le nombre de Reynolds est associé à l'interaction avec le courant.**

Le nombre de Reynolds s'exprime ainsi :

$$\mathrm{Re} = \frac{DU}{\upsilon}$$

Avec D le diamètre du cylindre, U la vitesse d'écoulement et υ la viscosité cinématique (constante de l'ordre de 10^{-6} $m^2.s^{-1}$ pour l'eau de mer).

L'écoulement subit des changements significatifs (liés à la turbulence) lorsque le nombre de Reynolds augmente. Dans l'eau, on considère que la limite au-delà de laquelle un sillage turbulent apparaît à l'arrière du cylindre est un Re de l'ordre de 3000. Pour le cas d'un courant de marée maximal de l'ordre de 1.6 m/s sur le site du parc éolien avec un cylindre de diamètre 1.62 m, on obtient un nombre de Reynolds de l'ordre de 2 600 000.

Le nombre de Keulegan Carpenter est défini dans la partie consacrée à l'approche théorique de l'interaction entre les vagues et la fondation (§ 4.1.1).

3.3 DESCRIPTION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

3.3.1 Code TELEMAC

Le modèle numérique TELEMAC-2D a été développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF. Ce modèle fait partie du système TELEMAC, ensemble de modules dédiés à l'étude des phénomènes dans les écoulements à surface libre. Ce logiciel est un outil de modélisation hydrographique robuste et sophistiqué, utilisé pour de nombreuses applications complexes dans des zones côtières du monde entier. Il peut être considéré par conséquence comme une référence.

Au sein de la chaîne TELEMAC, le module de simulation TELEMAC-2D est dédié au calcul des écoulements horizontaux à surface libre, dans un espace spatial à deux dimensions. En chaque point de la grille, le code calcule l'évolution de la hauteur d'eau et de la vitesse de l'écoulement. Ce modèle résout les équations de Barré de Saint-Venant (1871) à l'aide de la méthode des éléments finis sur une grille de calcul à éléments triangulaires. Il permet d'effectuer des simulations en régime transitoire[7] aussi bien qu'en régime permanent[8].

3.3.2 Bathymétrie et maillage

La bathymétrie et la grille de la configuration de TELEMAC2D sont présentées sur la Figure 3-2, et un zoom de la zone du parc éolien est présenté sur la Figure 3-3 (l'échelle de couleur n'est pas la même sur les deux cartes).

[7] Le régime transitoire est un régime d'écoulement qui n'a pas encore atteint d'équilibre, Un écoulement soumis à un forçage rapidement variable (forçage atmosphérique par exemple) est toujours en régime transitoire.

[8] Le régime permanent est la situation d'équilibre atteinte par un écoulement dont les caractéristiques n'évoluent plus dans le temps.

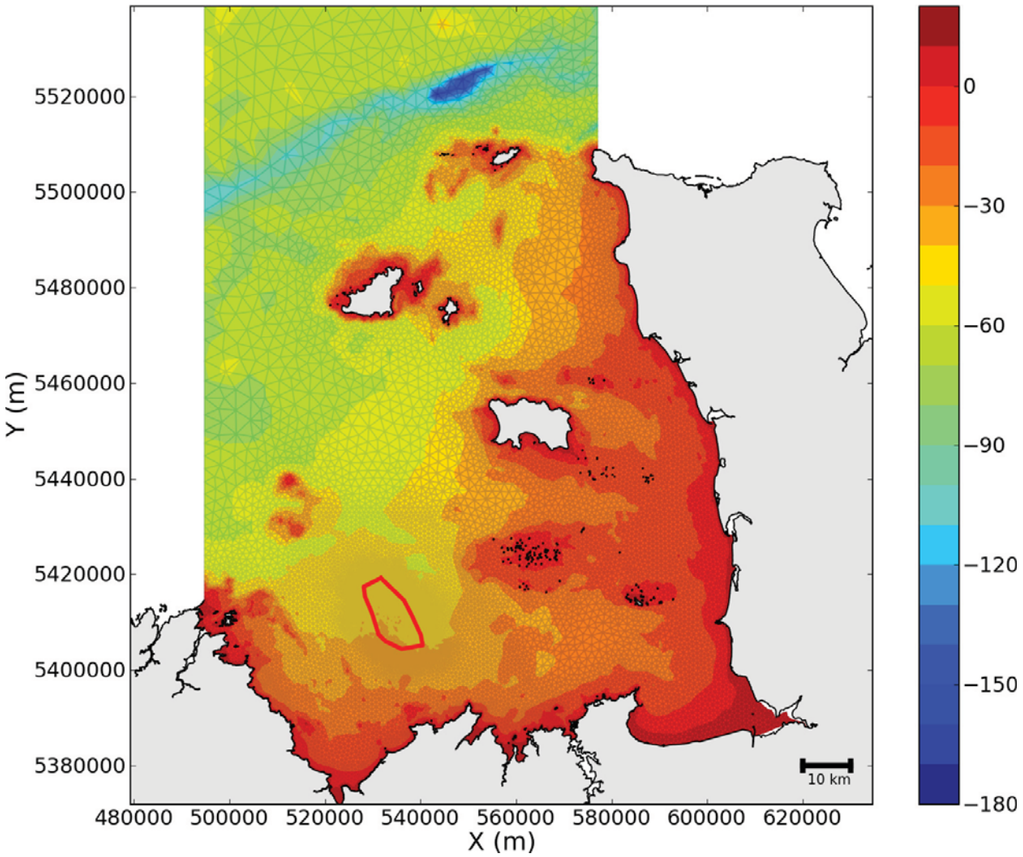


Figure 3-2 : Bathymétrie totale et grille de la configuration TELEMAC2D. Le polygone rouge délimite la zone du parc éolien. Coordonnées WGS 84 - UTM30N

La taille des éléments triangulaires varie de quelques kilomètres loin de la côte à quelques mètres dans la zone du parc éolien. La bathymétrie a été extraite à partir des données du SHOM (dalle bathymétrique n°14582) et de la campagne G-TEC (2013) réalisée sur le parc éolien. Les dalles bathymétriques du SHOM sont constituées de points de sonde dont l'espacement moyen est de l'ordre de 25 m. La bathymétrie réalisée par G-TEC a une résolution de 10 m.

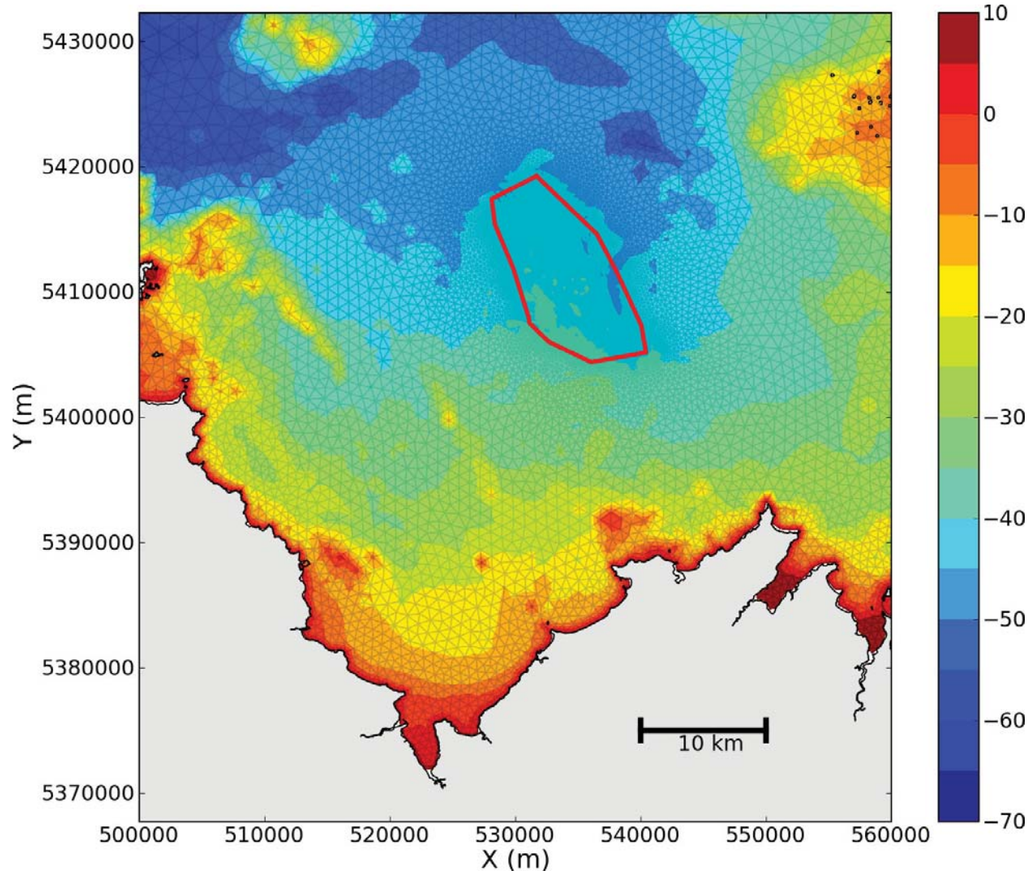


Figure 3-3 : Bathymétrie et grille de la configuration TELEMAC2D zoomées sur la zone du parc éolien. Le polygone rouge délimite la zone du parc éolien. Coordonnées WGS 84 - UTM30N

3.3.3 Maillage autour des fondations

Deux modèles (en conditions actuelles et en conditions du projet) ont été construits. La grille de calcul à proximité du parc éolien et au voisinnage de chaque éolienne est représentée sur les Figure 3-4 et Figure 3-5.

L'état de l'art en modélisation numérique des courants ne permet pas la modélisation d'une fondation de type jacket, étant donnée la complexité de cette forme. Pour résoudre ce problème, la solution est de remplacer chacun des jackets dans le modèle par une structure dont la résistance à l'écoulement est équivalente, par exemple, un monopieu. Cette approche a déjà été mise en œuvre sur d'autres parcs éoliens.

Un calcul de résistance a donc été mené pour déterminer le diamètre d'un « monopieu équivalent ». La résistance à l'écoulement est déterminée par la force de traînée de l'objet, qui est proportionnelle à la surface exposée à l'écoulement. Le principe du calcul était donc de déteminer le diamètre d'un monopieu qui opposerait à l'écoulement une surface équivalente à celle du jacket. Il ressort de cette analyse qu'un monopieu de diamètre 15.7 m offre une résistance à l'écoulement similaire à un jacket (en réalité, les hypothèses conservatives utilisées pour le calcul font que la résistance du monopieu est supérieure, ce qui tend à maximiser les impacts).

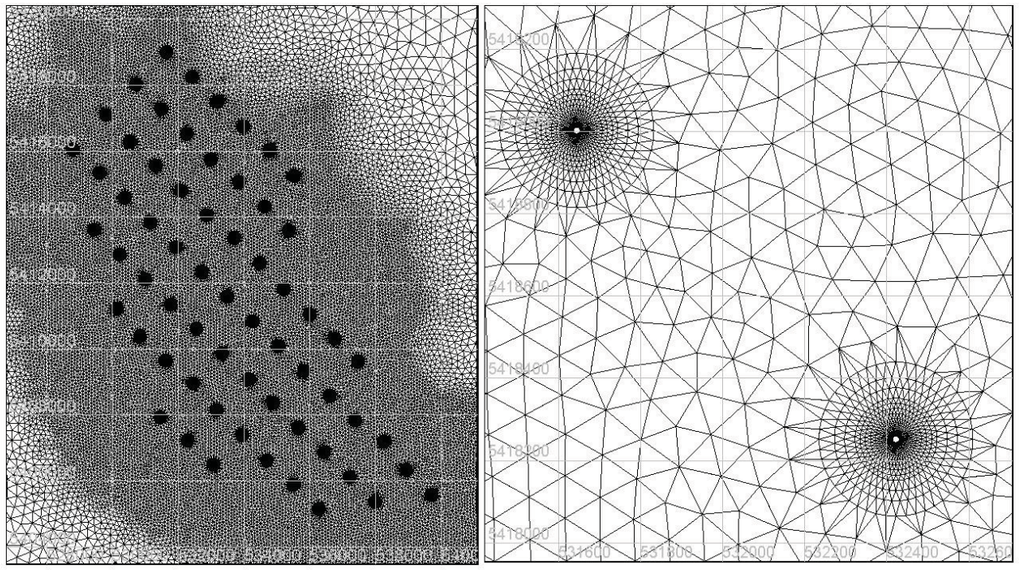


Figure 3-4 : Maillage autour du parc éolien (à gauche) et zoom sur deux piles (à droite, fondations n°57 et 58 au nord du parc). Coordonnées WGS 84 - UTM30N

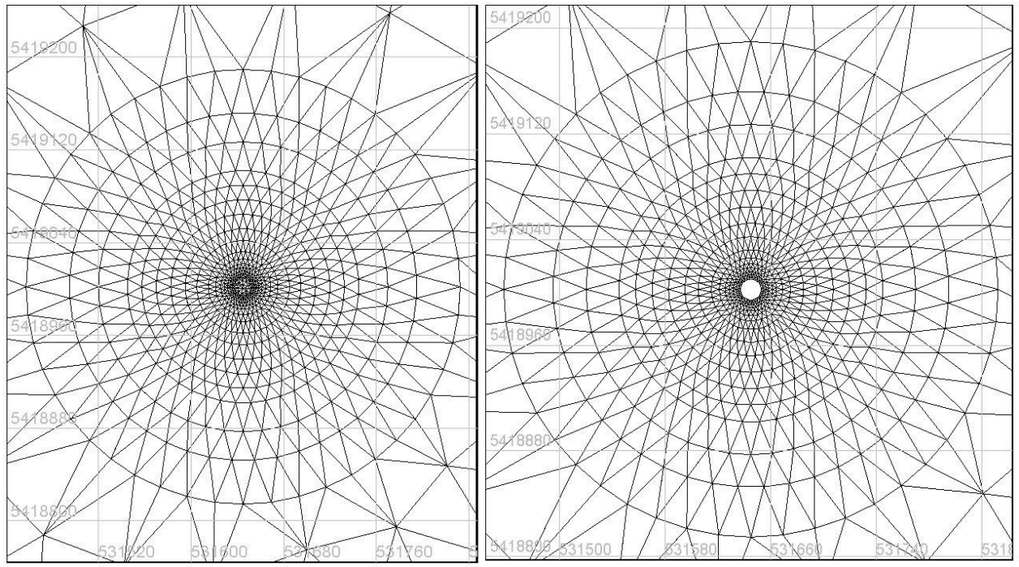


Figure 3-5: Détails du maillage autour de la fondation (conditions actuelles à gauche, avec fondation à droite). Coordonnées WGS 84 - UTM30N

3.3.4 Paramètres et conditions aux limites

Pour cette étude, Telemac a été utilisé avec un forçage du niveau de la mer aux frontières, variant avec la position. Pour construire ces niveaux, les harmoniques de marée (c'est-à-dire les différentes fréquences constituant le signal de marée) ont été extraites de la base de données CST France (Leroy et Simon, 2003 [Réf. 10]). Les forçages atmosphériques n'ont pas été pris en compte dans ces simulations car les courants sur la zone sont essentiellement dominés par la marée ; les courants générés par le vent sont beaucoup plus faibles et moins constants. Il s'agit ici d'estimer l'impact moyen pour les situations les plus occurentes.

Trois coefficients de marée ont été modélisés, pour couvrir le panel des conditions réelles de la marée :

45 : marée moyenne de morte-eau

95 : marée moyenne vive-eau

120 : marée exceptionnelle

3.4 SIMULATIONS HYDRODYNAMIQUES EN CONDITIONS ACTUELLES

3.4.1 Validation par comparaison avec les données du SHOM

Afin de valider le modèle TELEMAC 2D développé pour cette étude, les sorties du modèle du SHOM ont été utilisées ([Réf. 10]) pour la zone n°562 (Golfe anglo-normand). Ce modèle (également construit avec le code TELEMAC) est une configuration 2D avec une résolution d'environ 6.5 km. Ces sorties sont disponibles pour les coefficients 45 et 95. L'implémentation de TELEMAC utilisée pour la présente étude offre une résolution beaucoup plus fine et ses résultats doivent se comporter comme des zooms entre les points du modèle SHOM. Il est donc attendu que les résultats aux points de sortie du modèle SHOM soient relativement similaires, mais aussi que le modèle développé par Actimar soit plus précis étant donné sa résolution plus fine.

Les Figure 3-7 à Figure 3-10 présentent les comparaisons des intensités et des directions des courants en quatre points du parc éolien dont les positions sont présentées dans le Tableau 3-1 et illustrées sur la Figure 3-6. Les figures (Figure 3-7 à Figure 3-10) représentent le courant pendant un cycle de marée complet (coeff. 45 et 95).

	Longitude (°W)	Latitude (°N)
Station 1	2.5680	48.8323
Station 2	2.4847	48.8323
Station 3	2.6097	48.8907
Station 4	2.5264	48.8907

Tableau 3-1 : Coordonnées des 4 stations utilisées pour comparer TELEMAC et le modèle du SHOM

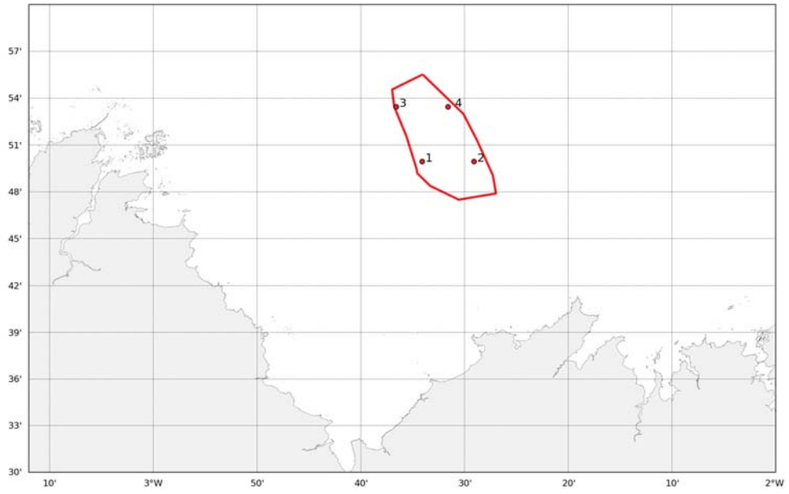


Figure 3-6 : Carte représentant les 4 stations utilisées pour comparer le modèle TELEMAC développé pour cette étude et le modèle du SHOM. Coordonnées WGS 84

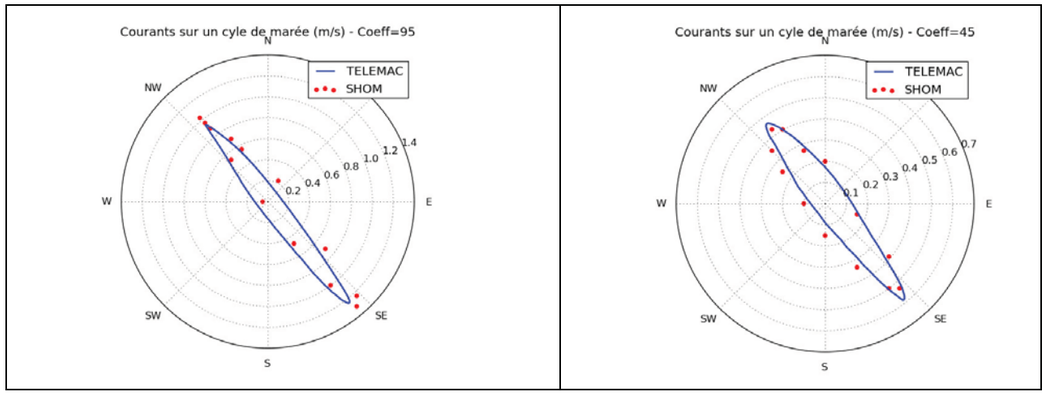


Figure 3-7 : Comparaison entre les courants modélisés par TELEMAC le modèle TELEMAC développé pour cette étude et ceux du SHOM à la station 4, pour des coefficients de marée 95 (à gauche) et 45 (à droite) sur 1 cycle de marée.

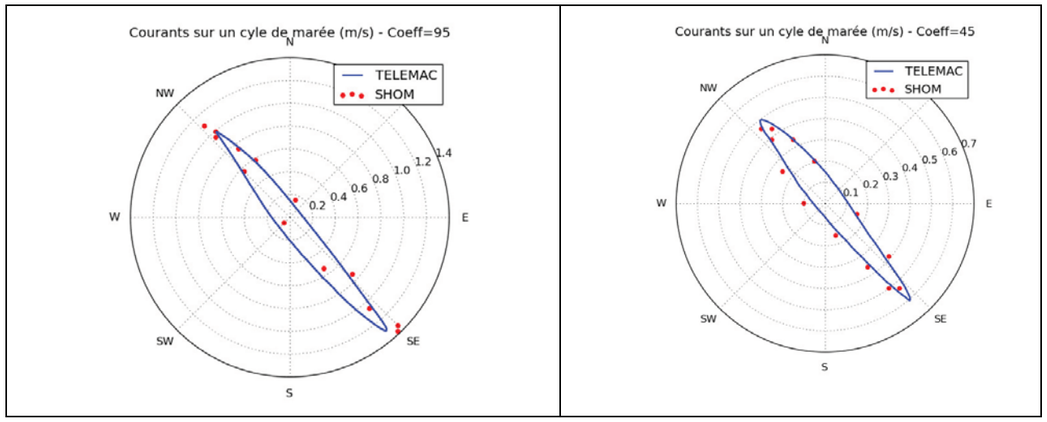


Figure 3-8 : Comparaison entre les courants modélisés par le modèle TELEMAC développé pour cette étude et ceux du SHOM à la station 3, pour des coefficients de marée 95 (à gauche) et 45 (à droite) sur 1 cycle de marée.

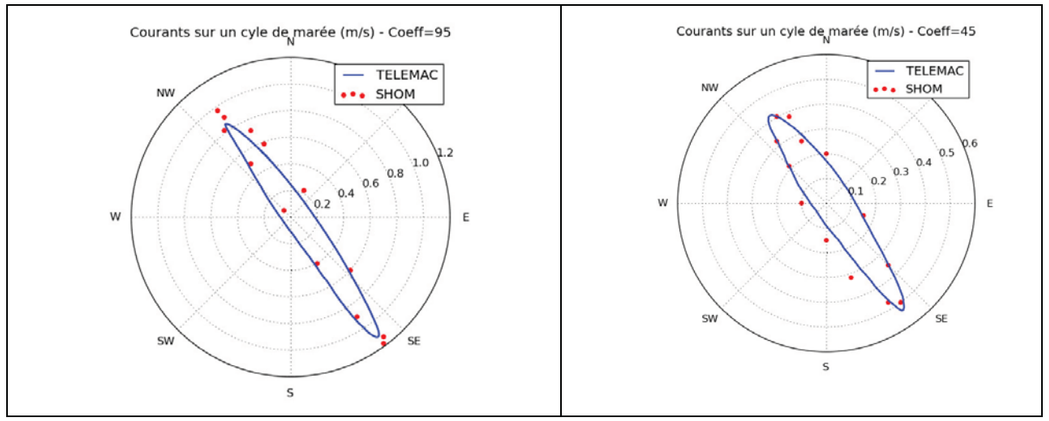


Figure 3-9 : Comparaison entre les courants modélisés par le modèle TELEMAC développé pour cette étude et ceux du SHOM à la station 2, pour des coefficients de marée 95 (à gauche) et 45 (à droite) sur 1 cycle de marée.

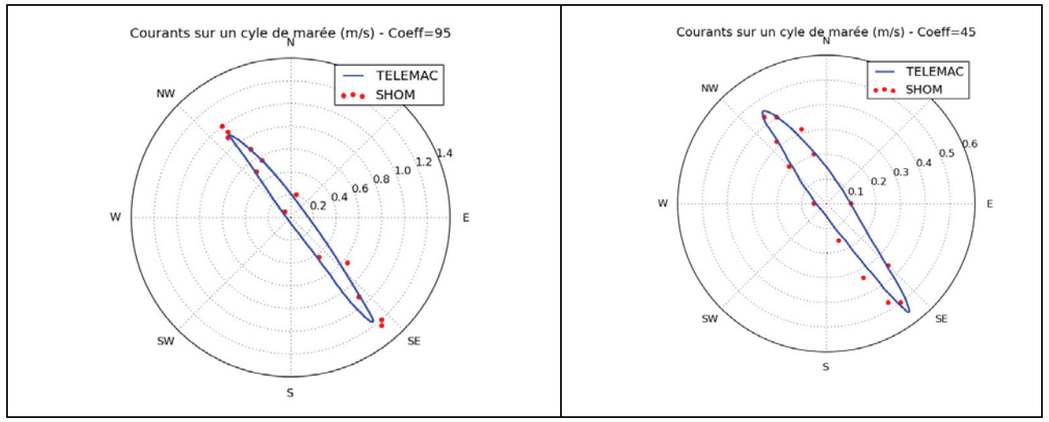


Figure 3-10 : Comparaison entre les courants modélisés par le modèle TELEMAC développé pour cette étude et ceux du SHOM à la station 1, pour des coefficients de marée 95 (à gauche) et 45 (à droite) sur 1 cycle de marée.

Le modèle TELEMAC développé pour cette étude est en bon accord avec les données du SHOM, aussi bien en direction qu'en intensité du courant. Les légers écarts constatés parfois à l'extrémité des ellipses peuvent être liés à la résolution temporelle des sorties qui n'est pas exactement la même dans les deux configurations. Les différences sur les courants maximaux entre les deux modèles sont de l'ordre de 10% à 15% selon les coefficients, ce qui est cohérent avec l'amélioration attendue par le raffinement de la grille et de la bathymétrie.

Par ailleurs, des données de courant in-situ ont été acquises sur le site par la société NortekMed en mars et avril 2013. Le courant mesuré intègre une composante météorologique qui n'est pas représentée dans le modèle TELEMAC présenté ici, mais il est tout de même intéressant de comparer les vitesses obtenues pour un coefficient donné. Par exemple, le 10

avril 2013 présente une marée de coefficient 95. A cette date, les vitesses moyennes mesurées au maximum de flot par NortekMed sont de l'ordre de 1.2 à 1.3 m/s. Au jusant, les vitesses sont de l'ordre de 0.9 m/s. Ces données sont mesurées au nord du parc, en un point proche de la station n°4. La Figure 3-8 indique que le modèle TELEMAC prédit des vitesses de 1.3 m/s et 1 m/s respectivement au flot et au jusant. La comparaison avec ces données est donc également très satisfaisante.

3.4.2 Courant de marée maximum

Les cartes des courants de flot et de jusant sur la zone du parc éolien sont présentées pour une marée exceptionnelle (coefficient 120) sur la Figure 3-11, pour une marée de vive-eau (coefficient 95) sur la Figure 3-12 et pour une marée de morte-eau (coefficient 45) sur la Figure 3-13. Ces figures mettent en évidence les caractéristiques du courant de marée sur toute la Baie de Saint-Brieuc. Les courants sont plus forts dans le nord du champ éolien que dans le sud.

Le flot se produit environ 3 heures avant la pleine mer pour tous les coefficients. Le jusant se produit entre 3 heures après la pleine mer (pour une marée exceptionnelle) et 4 heures après la pleine mer pour une marée de morte-eau.

Les courants de flot sont nettement plus forts que les courants de jusant, de 20 à 30%. Les courants de marée sont plus forts dans le nord du parc éolien que dans le sud (30% en flot de vive-eau astronomique).

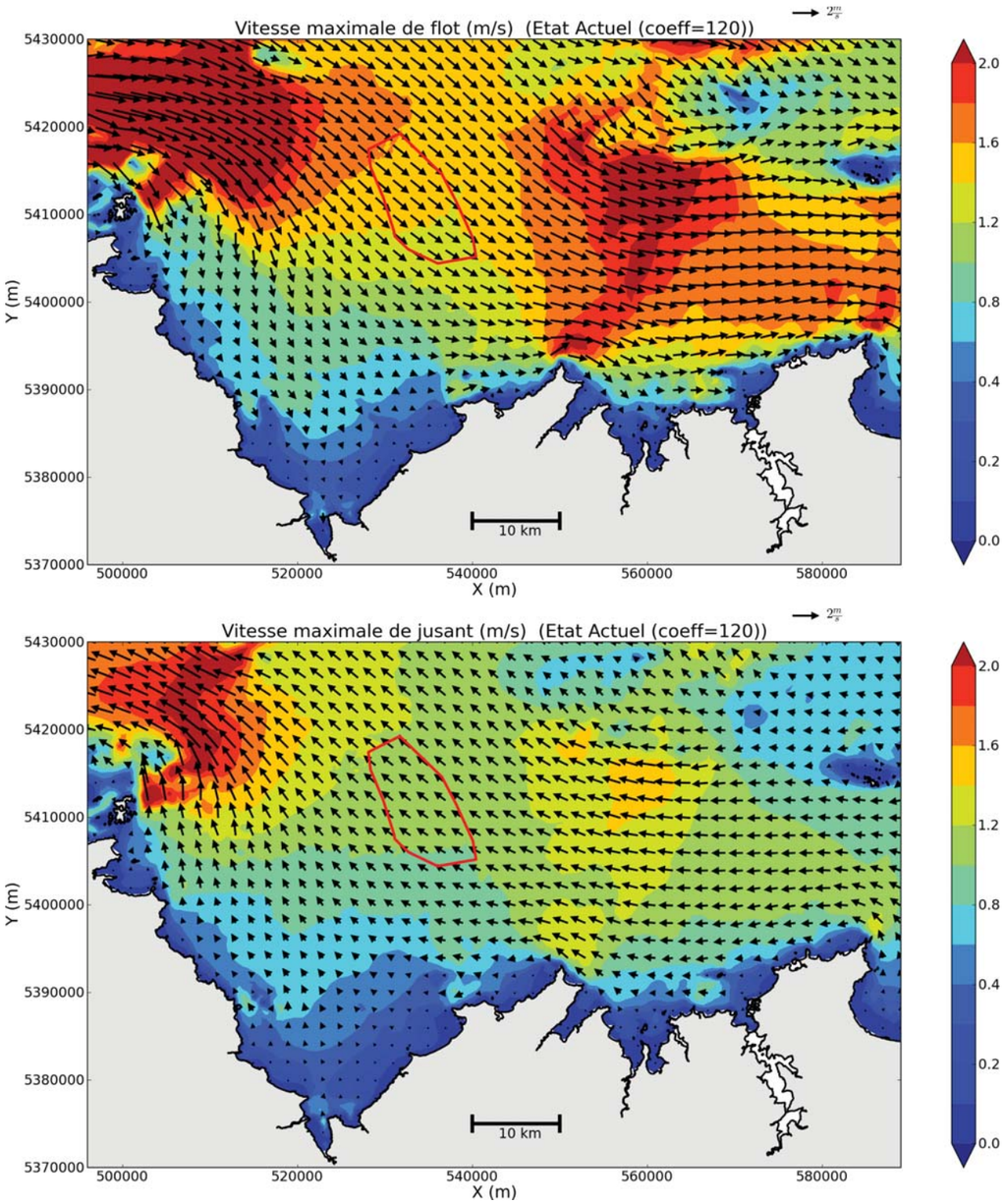


Figure 3-11 : Courant de marée maximum de flot (en haut) et de jusant (en bas) dans la Baie de Saint-Brieuc pendant une marée exceptionnelle. Coordonnées WGS 84 - UTM30N (la zone d'implantation du parc éolien apparaît en rouge)

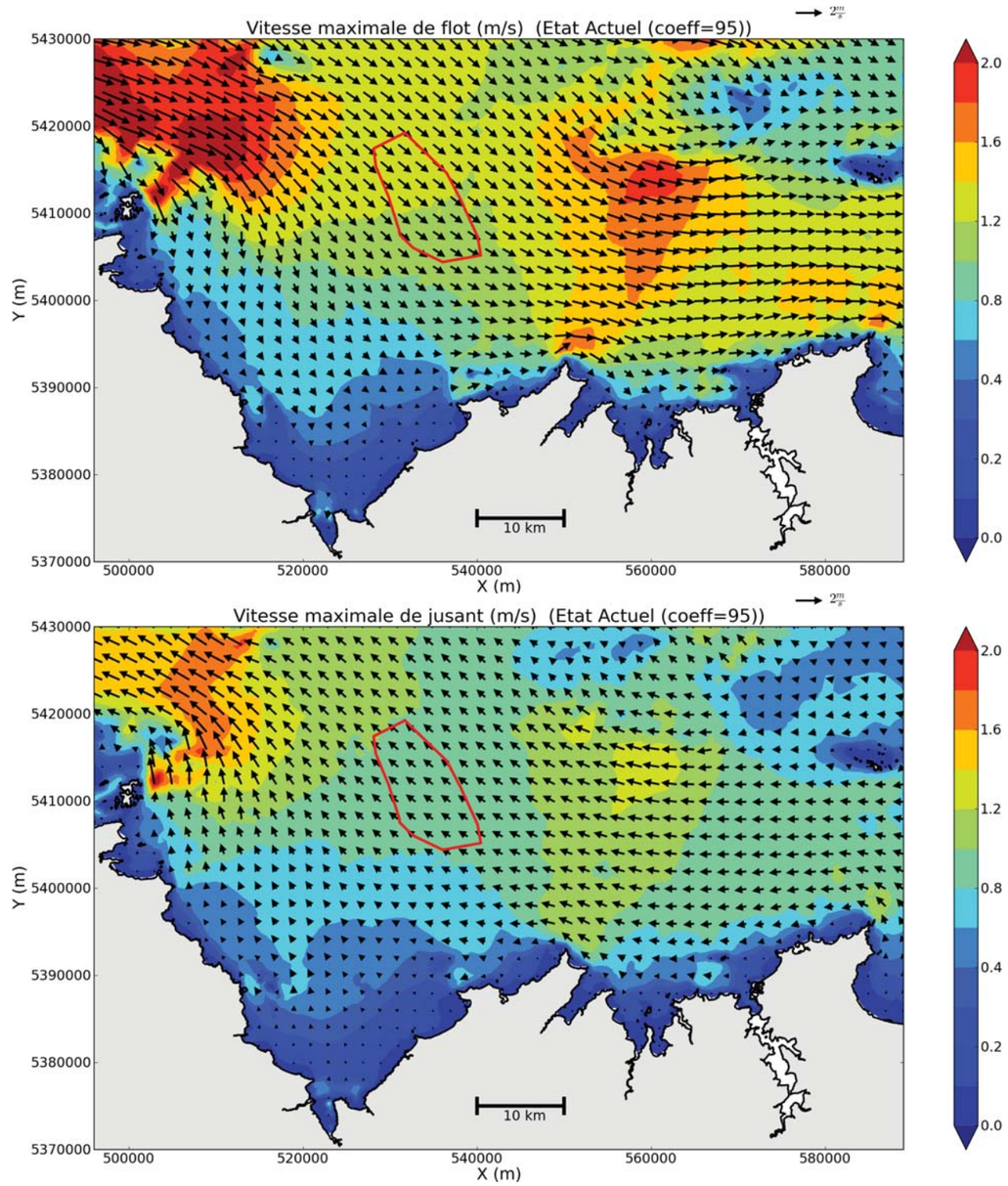


Figure 3-12 : Courant de marée maximum de flot (en haut) et de jusant (en bas) dans la Baie de Saint-Brieuc pendant une marée de vive-eau (95). Coordonnées WGS 84 - UTM30N (la zone d'implantation du parc éolien apparaît en rouge)

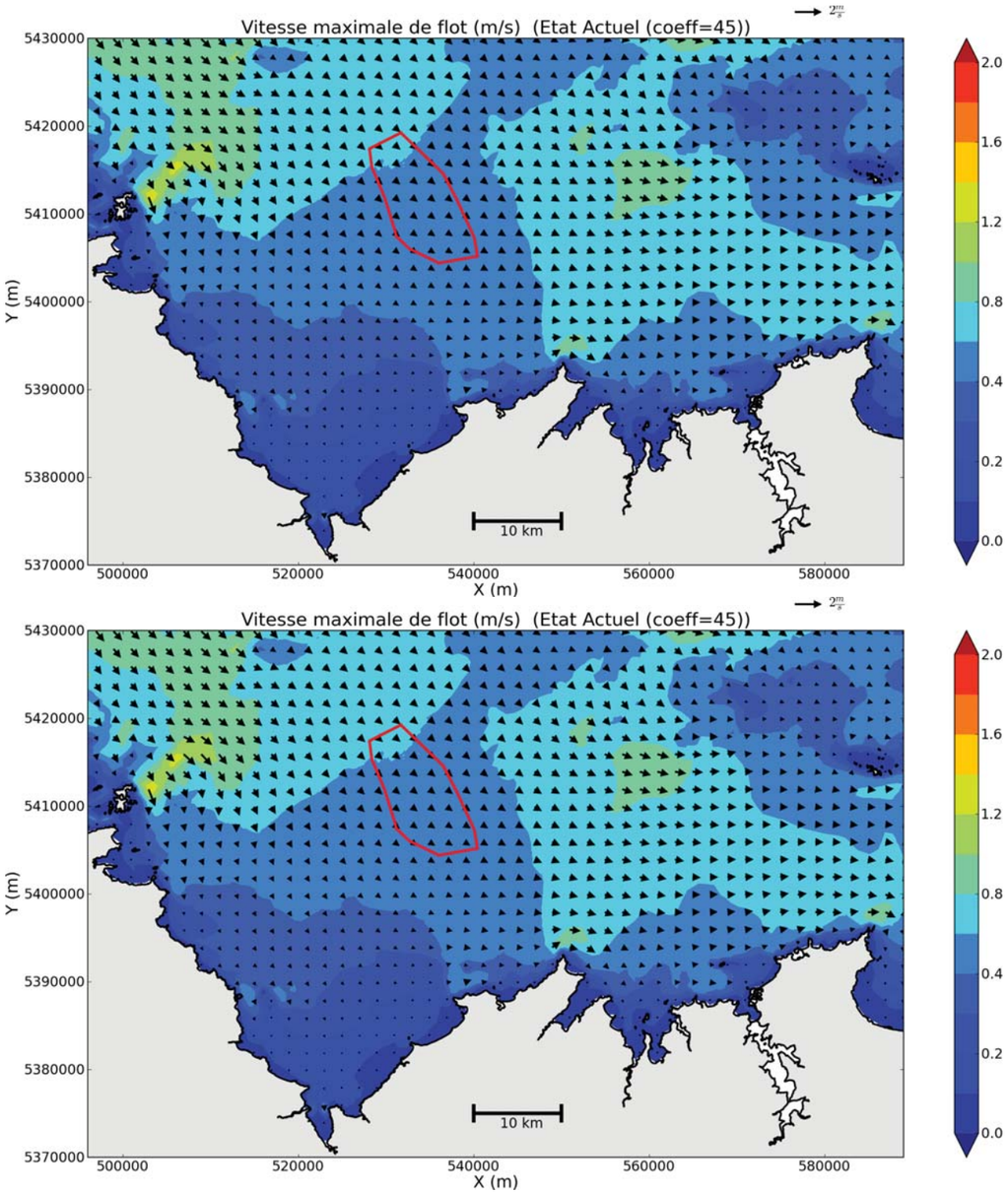


Figure 3-13 : Courant de marée maximum de flot (en haut) et de jusant (en bas) dans la Baie de Saint-Brieuc pendant une marée de morte-eau (45). Coordonnées WGS 84 - UTM30N (la zone d'implantation du parc éolien apparaît en rouge)

3.5 SIMULATIONS HYDRODYNAMIQUES POUR LE PROJET DE PARC EOLIEN

L'impact modélisé du parc éolien sur les courants est décrit ici pour une marée de vive-eau exceptionnelle (coefficient 120) dont le courant de flot maximum est de 1.6 m/s dans le parc (cf. Tableau 2-4). Les figures pour les autres coefficients de marée (45 et 95) sont présentées en Annexe A.

Cet impact est calculé à la fois pour les courants de marée maximum de flot et de jusant : les figures ci-dessous représentent la différence entre les courants calculés avec la prise en compte du parc éolien et les courants dans des "conditions actuelles".

3.5.1 Impact à l'échelle régionale

L'impact du parc éolien sur les courants est présenté sur la Figure 3-14 à une échelle régionale, centrée sur le parc éolien, pour une marée exceptionnelle (coefficient de marée 120). La Figure 3-14 montre les variations de l'intensité du courant au maximum du flot et du jusant. Seules les variations supérieures à 0.05 m/s sont représentées ; ce seuil représente 3.1 % du courant maximum de flot (1.6 m/s) et 4.3 % du courant maximum de jusant (1.2 m/s) pour un coefficient de marée de 120 (cf. Tableau 2-4).

Les perturbations générées par le parc éolien sur les courants sont circonscrites aux abords du parc éolien. Les perturbations les plus importantes sont situées dans la partie nord de cette région, là où les courants sont les plus importants. Le sillage d'une éolienne peut atteindre ses voisines.

Le ralentissement des courants est inférieur à 5 % du courant incident au-delà de 1 200 m. À une distance de 3.5 kilomètres du parc, l'impact sur les courants est pratiquement indétectable et devient plus faible que les incertitudes liées à la modélisation numérique. On peut donc considérer que l'impact est négligeable à plus de 3.5 kilomètres du parc. Ces résultats sont résumés dans le Tableau 3-2.

Coefficient de marée	Ralentissement des courants (distance)			
	< 10 %	< 5 %	< 1 %	A moins de 1 km de la côte
120	600 m	1 200 m	3 500 m	Négligeable
95	500 m	1 100 m	3 200 m	
45	500 m	900 m	2 400 m	

Tableau 3-2 : Caractéristiques approximatives des effets de sillages.
La vitesse du courant en fonction de la marée est synthétisée dans le Tableau 2-4.

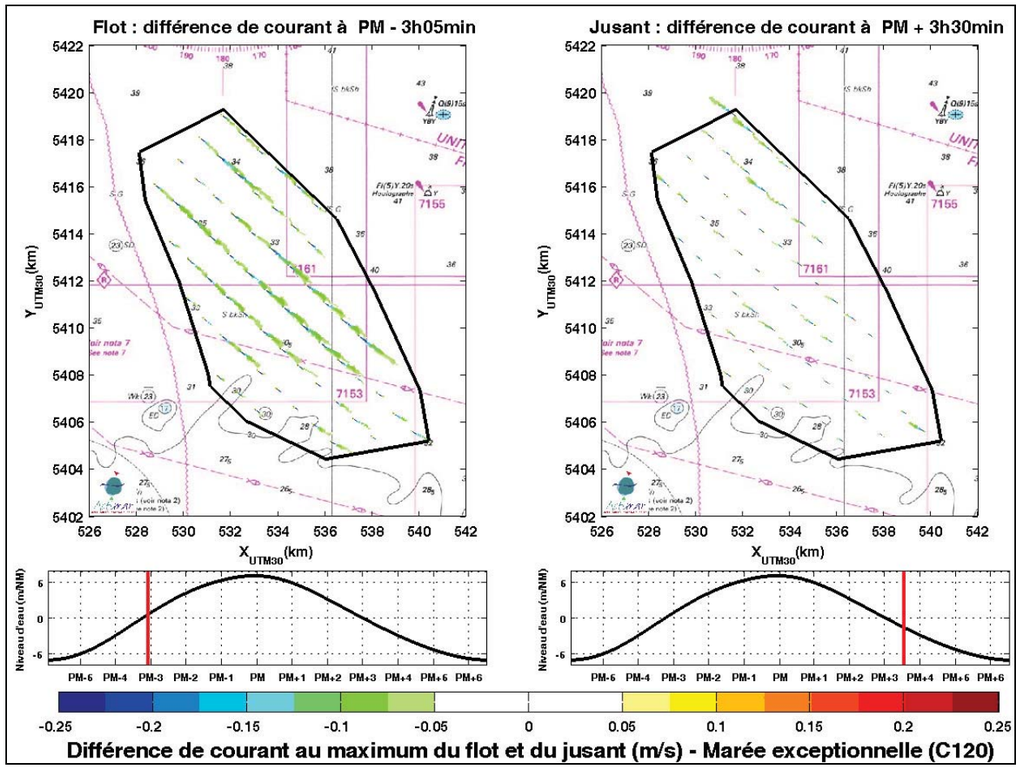


Figure 3-14 : Ecart instantané de vitesse (m/s) de flot (à gauche) et de jusant (à droite), à l'échelle du parc éolien. Coordonnées WGS 84 - UTM30N. Marée exceptionnelle (C120)

3.5.2 Impact à l'échelle locale

L'impact du parc éolien sur les courants est présenté à l'échelle locale, sur un groupe d'éoliennes (Figure 3-15), et sur une fondation (Figure 3-16) (sélectionnée parmi les 63 fondations du parc).

Les perturbations sont principalement situées en aval de l'éolienne. Le sillage induit par la pile atteint l'éolienne suivante. La différence des courants maximaux de flot et de jusant est inférieure à 20% au-delà de 175 m, et inférieure à 10% au-delà de 600 m de l'éolienne.

En amont de l'éolienne, les courants sont également diminués : la différence des courants est inférieure à 20% à 25 m, et inférieure à 10% au-delà de 40 m de l'éolienne.

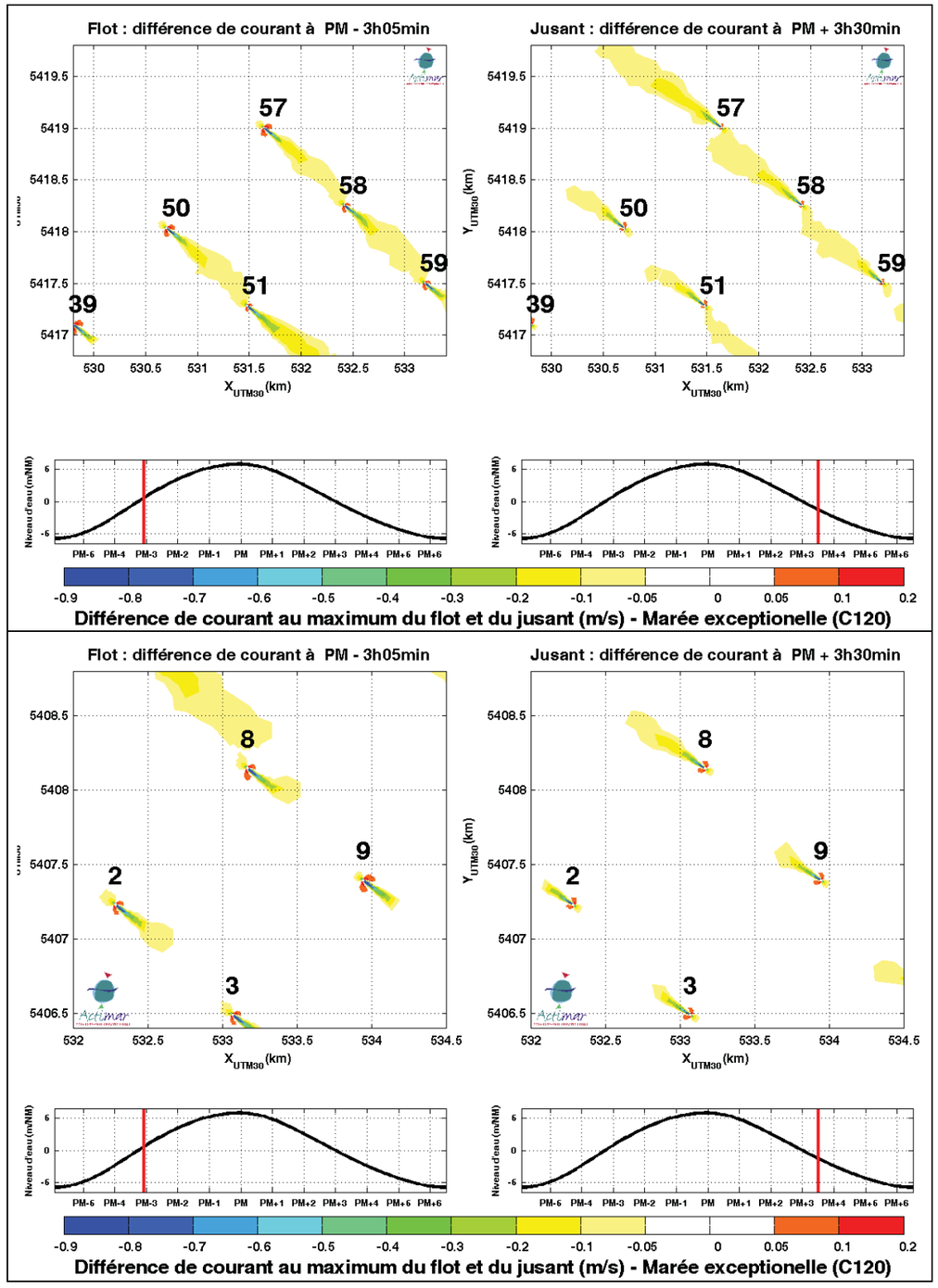


Figure 3-15 : Différence instantanée de la vitesse du courant (m/s) pour le flot (à gauche) et pour le jusant (à droite), pour des fondations situées au nord (en haut) et au sud-ouest (en bas) du parc. Coordonnées WGS 84 - UTM30N. Marée exceptionnelle (C120)

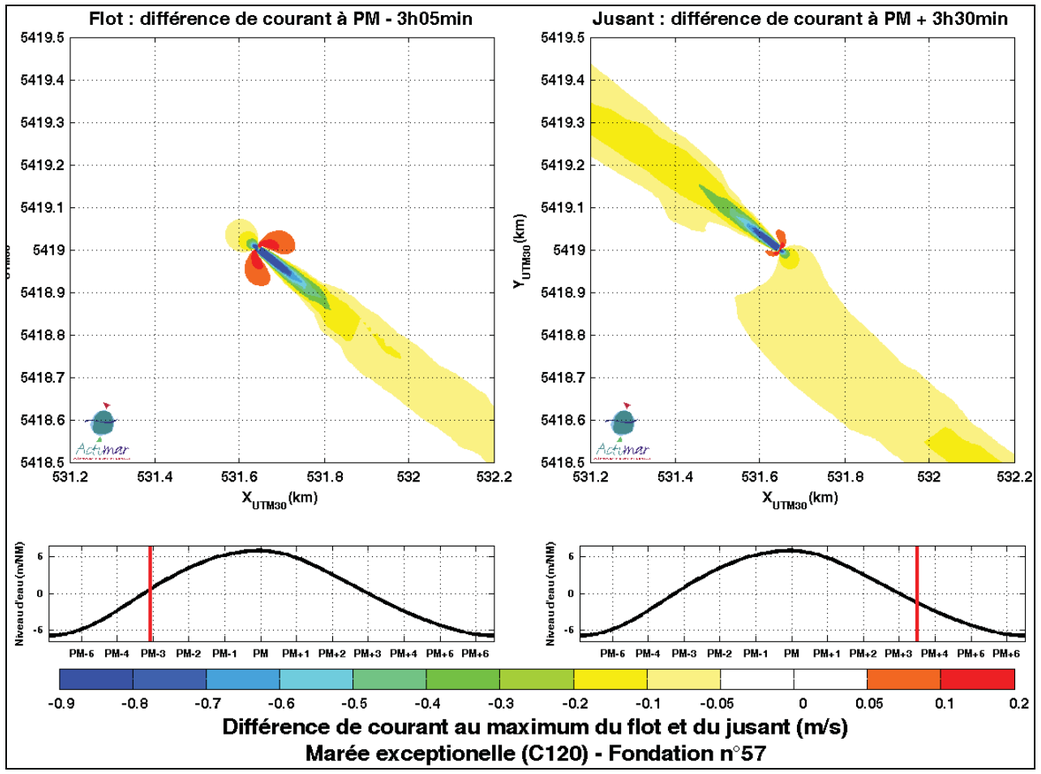


Figure 3-16 : Différence instantanée de la vitesse du courant (m/s) pour le flot (à gauche) et pour le jusant (à droite) pour la fondation n°57 située à l'extrémité nord du parc. Coordonnées WGS 84- -UTM30N – Marée exceptionnelle (C120)

3.5.3 Impact à l'échelle de la fondation

La Figure 3-17 présente les courants à l'échelle d'une fondation : les vecteurs représentent la direction et l'intensité des courants, l'échelle de couleur est fonction de l'intensité.

L'impact de la fondation sur les courants est caractéristique d'une perturbation de l'écoulement générée par un obstacle :

- Diminution localisée des courants en amont et en aval ;
- Accélération des courants immédiatement adjacents à l'éolienne, en raison du resserrement des lignes de courant.

Dans le cas d'une marée exceptionnelle (coefficient de marée 120), le courant entrant est d'environ 1.6 m/s pour la fondation choisie (n°57 parmi les 63 du parc l'éolien). En amont de l'éolienne, les courants diminuent à 1.5 m/s à 50 m de la pile. Les courants dans le sillage aval de la pile sont inférieurs à 0.3 m/s à 40 m de l'éolienne.

L'accélération des courants atteint 2 m/s à proximité de la pile, et 1.7 m/s à 40 m de la pile. Les valeurs quantitatives de l'accélération et de la décélération du courant sont valables pour une valeur donnée du courant incident (ici 1.6 m/s).

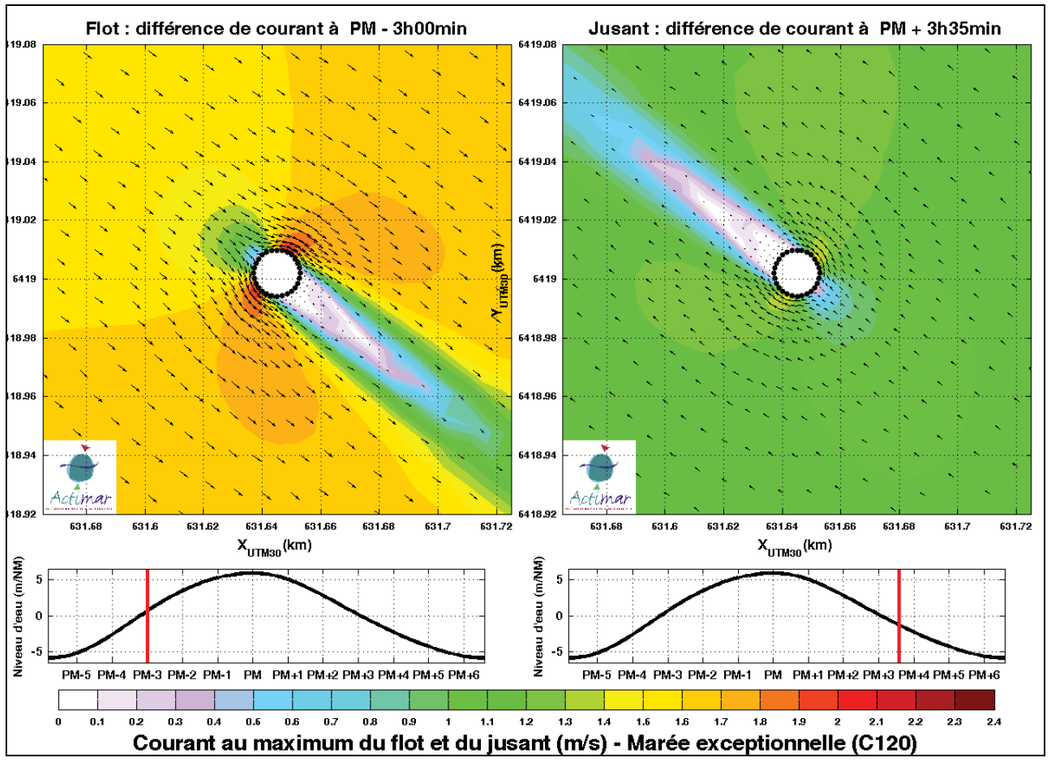


Figure 3-17 : Vitesses instantanées de flot (à gauche) et de jusant (à droite) autour de la fondation n°57, pendant une marée exceptionnelle (coefficient de marée 120). Coordonnées WGS 84 - UTM30N

Ces calculs sont effectués avec l'hypothèse d'une fondation modélisée par un pieu de diamètre 15.7 m. Même si ce pieu présente un masquage du flot équivalent à celui d'un jacket, cette approximation n'est réellement valable qu'à une échelle relativement large. L'approche théorique mentionnée en ouverture de ce chapitre permet de caractériser un peu plus précisément la modification de l'écoulement au voisinnage immédiat de chaque éolienne. Pour le cas d'un courant constant de 1.6 m/s, le calcul du nombre de Reynolds donne :

- pour un diamètre de 15.7m : Re=25 x10^6
- pour un diamètre de 1.62 m (diamètre d'une jambe du jacket) : Re=2.6 x10^6

Ces deux estimations classent l'écoulement dans la catégorie des écoulements turbulents, caractérisés par la formation de tourbillons en aval de la pile. Les phénomènes modélisés sont donc de même nature dans le cas d'un monopieu et d'un jacket.

4 IMPACT SUR LA PROPAGATION DES VAGUES

Ce chapitre vise à caractériser l'influence du projet de parc éolien de la baie de Saint-Brieuc sur le comportement des états de mer à l'échelle locale et régionale. Les interactions entre les vagues et les fondations à l'échelle locale sont abordés par analyse bibliographique (§ 4.1) tandis que les effets du projet de parc éolien sur la génération et la propagation des états de mer à l'échelle régionale sont abordés par modélisation numérique (§ 4.2).

4.1 INTERACTIONS ENTRE LES VAGUES ET LES FONDATIONS : APPROCHE THEORIQUE

L'approche développée ici est la suite de la section 3.2 (interaction entre l'écoulement et un cylindre).

4.1.1 Nombre de Keulegan-Carpenter et paramètre de diffraction

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

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

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

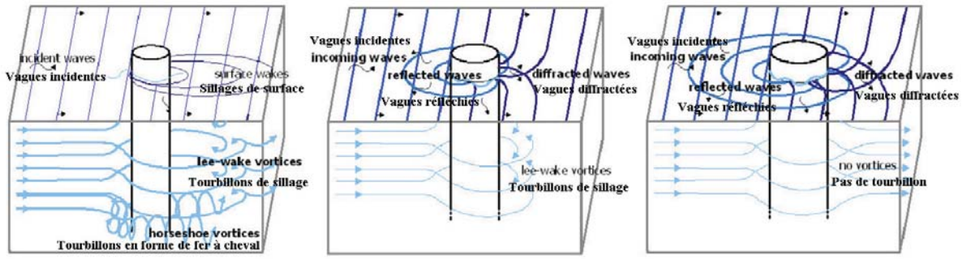


Figure 4-1 : Effet de la largeur des fondations cylindriques sur l'agitation en surface et le régime de l'écoulement ;de gauche à droite : pieu mince, intermédiaire et large (selon Haddorp, 2005).

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

- le paramètre de diffraction, qui est le rapport entre le diamètre du cylindre et la longueur d'onde des vagues. Pour des valeurs supérieures à 0.2 (Isaacson (1979), voire 0.1 (Hoffmans et Verheij (1997), les vagues seront diffractées autour de la fondation,
- le nombre de Keulegan-Carpenter (KC), qui caractérise l'amplitude du mouvement orbital des particules d'eau par rapport à la largeur du cylindre et qui indique si l'écoulement autour du cylindre se séparera et expulsera des tourbillons dans le sillage. Le régime de pile mince est atteint pour les fortes valeurs de KC, typiquement $KC > 6$. Egalement, KC est borné par la limite de stabilité des vagues (cambrure limite).
  Pour des oscillations sinusoïdales, KC s'écrit :

  $$KC = \frac{2\pi a}{D}$$

  Avec *a* l'amplitude des oscillations et D, le diamètre de la fondation.
  Un faible nombre de Keulegan-Carpenter traduit un écoulement où le mouvement orbital des molécules d'eau dû à l'oscillation des vagues est faible par rapport au diamètre du cylindre. Dans ce cas, il n'y a pas de risque d'apparition de tourbillons au niveau des piles. A l'inverse, un nombre de Keulegan-Carpenter élevé signifie qu'à chaque oscillation, les particules d'eau se déplacent d'une distance relativement grande par rapport au diamètre du cylindre. Dans ce cas, on tend à se rapprocher du cas d'un courant continu à chaque demi-période de l'oscillation, il y a alors un risque de voir apparaître des tourbillons.

  Loin de la côte, les vagues et le courant contribuent tous les deux au régime d'écoulement. Le régime d'écoulement piloté par le courant de marée est relativement stable, il sera modulé par les conditions des vagues incidentes (et donc du KC).

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

Les paramètres de Keulegan-Carpenter et de diffraction seront calculés pour le parc éolien de Saint-Brieuc dans la section 4.1.2.2 afin d'établir le régime de l'écoulement.

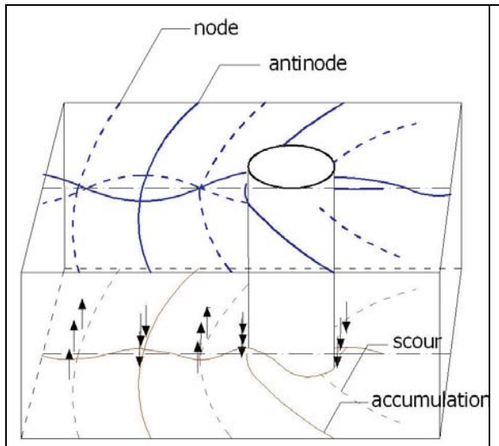


Figure 4-2 : Courants verticaux et champ des vagues diffractées. (Haddorp, 2005)

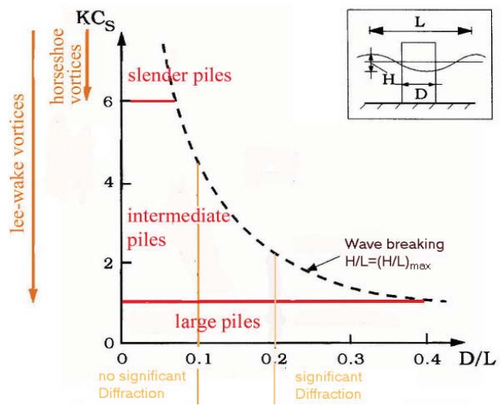


Figure 4-3 : Régimes d'écoulement représentés dans le plan (KC,D/L). (Adapté de Haddorp, 2005 et Sumer et Fredsøe, 2006)

4.1.2 Application au site du parc éolien

4.1.2.1 Impact du parc éolien sur l'état de la mer, à l'échelle régionale

Nous cherchons ici à calculer de manière théorique l'effet total de masquage du parc éolien sur un champ de vagues.

La méthode utilisée ici est la même que celle appliquée pour le parc éolien de Horns Rev (rapport DHI, [Réf. 26]). En supposant que toute l'énergie des vagues atteignant une éolienne se dissipe derrière elle (effet de masquage), on peut montrer que la hauteur des vagues est légèrement réduite après le passage de l'éolienne.

L'énergie transportée par une onde linéaire est proportionnelle à la hauteur de la vague. Le flux d'énergie F intégré sur une distance dy peut s'écrire:

$$F = E\,Cg\ dy \sim H^2\,Cg\ dy$$

Où *Cg* est la vitesse de groupe des vagues, *E* est l'énergie cinétique des vagues et *H* leur hauteur significative.

En supposant que toute l'énergie (hypothèse conservative) atteignant une éolienne de diamètre D est réfléchie, le rapport entre la hauteur de la vague incidente (H_0) et la hauteur de cette vague qui a traversé l'éolienne (H_1) est:

$$\left(\frac{H_1}{H_0}\right)^2 = \frac{E_1\,Cg\,dy}{E_0\,Cg\,dy} = \frac{E_0\,Cg\,dy - E_0\,Cg\,D}{E_0\,Cg\,dy} = \frac{dy - D}{dy}$$

Si l'on considère que la dimension du parc éolien est d'environ 7.5 km x 15 km, et si nous utilisons un diamètre équivalent de 15.7m pour chaque éolienne, nous pouvons calculer l'effet de masque total des 63 fondations (éoliennes et sous-station électrique).

Il s'agit en fait d'interpréter la formule ci-dessus à l'échelle du parc. Dans ce cas, le calcul se fait sur une longueur *dy* qui correspond à la longueur du parc. *D* est la longueur totale des obstacles rencontrés (donc 63x15.7 m si on considère que les effets de chaque éolienne sont indépendants). Ces valeurs permettent de calculer le ratio de hauteur entre les vagues sortantes (H_1 dans la formule) et les vagues incidentes (H_0 dans la formule). L'application de la formule conduit donc aux valeurs de masquage suivantes :

- **6.8 %** pour les vagues arrivant du ouest-nord-ouest
- **3.4 %** pour les vagues arrivant du nord-est

Il est important de garder à l'esprit que le choix d'un diamètre équivalent de 15.7 m maximise l'effet des fondations des éoliennes. Pour être plus proche de la réalité, nous pouvons faire le même calcul en considérant les 4 jambes des fondations jackets, chacune d'un diamètre de 1.62 m. Les valeurs obtenues dans ce cas sont de **2.8%** pour les vagues d'ONO et **1.4%** pour les vagues de NE.

4.1.2.2 Impact du parc éolien sur l'état de mer, à l'échelle locale

Le comportement hydrodynamique autour des fondations se caractérise à partir du paramètre de diffraction et du nombre de Keulegan-Carpenter (§ 4.1.1). Comme ces deux paramètres nécessitent de connaître l'amplitude et la longueur d'onde des vagues, une analyse du tableau des corrélations statistiques (Hs/Tp) (*cf.* Tableau 2-5) a été réalisée.

Comme indiqué dans la section précédente, chaque jambe des fondations jackets peut être considérée individuellement. Le diamètre de chaque jambe est de 1.62 m. Les nombres de Keulegan-Carpenter (KC) et de diffraction (D/L) représentatifs de l'écoulement autour de chaque jambe de diamètre 1.62 m sont calculés dans le Tableau 4-1, pour l'ensemble des états de mer. Le paramètre de diffraction est présenté dans la colonne (D/L) et le nombre de Keulegan-Carpenter est calculé pour chaque état de mer caractérisé par sa hauteur (Hs) et sa période principale (Tp). Dans les marges sont reportées les probabilités d'occurence de chaque état de mer en ‰.

Dans le Tableau 4-1, les valeurs de KC évoluent de 0.5 à 24.4. La séparation de l'écoulement s'intensifie avec l'augmentation de KC et donc, avec Hs et Tp. Le Tableau 4-1 et la Figure 4-3 indiquent que des tourbillons de sillage sont susceptibles de se former en aval des fondations pour des états de mer agités (Hs > 1.5 m). Les situations pour lesquelles KC est supérieur à 6 représentent dans 5.8% des occurrences.

Les vagues pour lesquelles la diffraction devient significative (D/L>0.1) représentent moins de 0.3% des états de mer (Tp<3 s). Par ailleurs, ces états de mer sont peu énergétiques. Egalement, les occurences pour lesquelles KC<1 sont de 6.7% et elles correspondent à des états de mer pour lesquels Hs<0.5 m.

Pour ce type de fondation, le régime d'écoulement est caractéristique d'un «régime de cylindre mince», sans diffraction des vagues, et marqué par la formation de tourbillons et de vortex en fer à cheval au bas de la fondation. Cela signifie qu'il y a des risques d'affouillement au pied des fondations. Cette problématique sera abordée dans la section 6.

			Hs (m)																	
		D/L	0.0 - 0.5	0.5 - 1.0	1.0 - 1.5	1.5 - 2.0	2.0 - 2.5	2.5 - 3.0	3.0 - 3.5	3.5 - 4.0	4.0 - 4.5	4.5 - 5.0	5.0 - 5.5	5.5 - 6.0	6.5 - 7.0	7.0 - 7.5	7.5 - 8.0	8.0 - 8.5	8.5 - 9.0	Pbb
Tp (s)	1 - 2	0.46	0.5																	0.04
	2 - 3	0.17	0.5	1.5																3.40
	3 - 4	0.08	0.5	1.5	2.4															29.45
	4 - 5	0.05	0.5	1.5	2.4	3.4	4.4													54.64
	5 - 6	0.03	0.5	1.5	2.4	3.4	4.4	5.3	6.3											54.49
	6 - 7	0.02	0.5	1.5	2.4	3.4	4.4	5.3	6.3	7.3										44.42
	7 - 8	0.02	0.5	1.5	2.4	3.4	4.4	5.4	6.3	7.3	8.3									61.90
	8 - 9	0.01	0.5	1.5	2.5	3.4	4.4	5.4	6.4	7.4	8.4	9.3								89.77
	9 - 10	0.01	0.5	1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5								140.82
	10 - 11	0.01	0.5	1.6	2.6	3.6	4.7	5.7	6.7	7.8	8.8	9.8	10.9	11.9						128.79
	11 - 12	0.01	0.5	1.6	2.7	3.8	4.8	5.9	7.0	8.1	9.1	10.2	11.3	12.4	13.5					110.28
	12 - 13	0.01	0.6	1.7	2.8	3.9	5.1	6.2	7.3	8.4	9.6	10.7	11.8	12.9	14.0					116.49
	13 - 14	0.01	0.6	1.8	2.9	4.1	5.3	6.5	7.6	8.8	10.0	11.2	12.3	13.5	14.7	15.9				75.19
	14 - 15	0.01	0.6	1.8	3.1	4.3	5.5	6.8	8.0	9.2	10.5	11.7	12.9	14.2	15.4	16.6	17.9			47.50
	15 - 16	0.01	0.6	1.9	3.2	4.5	5.8	7.1	8.4	9.7	11.0	12.3	13.6	14.9	16.1	17.4	18.7			18.78
	16 - 17	0.01	0.7	2.0	3.4	4.7	6.1	7.4	8.8	10.1	11.5	12.9	14.2	15.6	16.9	18.3	19.6	21.0		14.47
	17 - 18	0.00	0.7	2.1	3.5	5.0	6.4	7.8	9.2	10.6	12.0	13.4	14.9		17.7	19.1			23.4	5.20
	18 - 19	0.00	0.7	2.2	3.7	5.2	6.7	8.1	9.6	11.1	12.6	14.1	15.5		18.5	20.0	21.5	22.9	24.4	2.61
	19 - 20	0.00	0.8	2.3	3.9	5.4	7.0	8.5	10.0	11.6	13.1	14.7								1.16
	20 - 21	0.00	0.8	2.4	4.0	5.6	7.3	8.9	10.5											0.30
	21 - 22	0.00	0.8	2.5	4.2	5.9	7.6	9.2												0.18
	22 - 23	0.00		2.6	4.4	6.1	7.9	9.6												0.10
	23 - 24	0.00				6.4														0.01
Pbb			67.40	360.39	280.02	148.35	72.84	36.34	18.35	9.14	3.64	1.97	0.79	0.37	0.23	0.07	0.06	0.02	0.02	1000

Tableau 4-1 : KC et D/L associés au diagramme (Hs/Tp) au point nord, pour une fondation cylindrique de 1.62 m de diamètre.

4.2 MODELISATION NUMERIQUE DE LA PROPAGATION DES VAGUES

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

4.2.1 Présentation du système de modélisation

4.2.1.1 Code TOMAWAC

Le modèle numérique TOMAWAC (***T****ELEMAC-based* ***O****perational* ***M****odel* ***A****ddressing* ***W****ave* ***A****ction* ***C****omputation*) a été développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) d'EDF. Ce modèle fait partie du système TELEMAC, ensemble de modules dédiés à l'étude des phénomènes dans les écoulements à surface libre. Ces modules

utilisent la technique des éléments finis[9] afin de mieux représenter les processus dans les zones à géométrie complexe. Les modules 2D comme TOMAWAC permettent une discrétisation du domaine sur une grille de calcul non structurée, constituée d'éléments triangulaires.

Au sein de la chaîne TELEMAC, le module de simulation TOMAWAC est dédié à la propagation spectrale des états de mer. TOMAWAC est un modèle de "troisième génération", c'est-à-dire qu'il résout la répartition spectrale ou directionnelle des vagues au lieu de la paramétriser.

TOMAWAC permet de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- **Interaction houle – fond**. Le profil bathymétrique est donné en entrée dans TOMAWAC. TOMAWAC modélise la transformation des ondes de surface sous les effets combinés de la réfraction, du shoaling[10] et des processus de dissipation d'énergie tels que le frottement sur le fond et le déferlement bathymétrique. Les interactions non-linéaires entre vagues peuvent être prises en compte dans le mode « troisième génération » de TOMAWAC.
- **Interaction houle – atmosphère**. Des relations très étroites existent entre la couche limite de l'atmosphère et le champ des vagues. L'interaction entre la surface de l'eau et l'atmosphère est responsable du transfert d'énergie du vent vers les vagues, mais participe également aux processus dissipatifs tels que le moutonnement et aux transferts non-linéaires d'énergie entre les composantes. L'interaction houle - atmosphère est modélisée dans TOMAWAC grâce à trois termes sources prenant respectivement en compte les effets de l'apport dû au vent, du moutonnement et des interactions non-linéaires entre les vagues.
- **Interaction houle – marée.** La variation temporelle des courants et de la profondeur d'eau affecte sensiblement l'évolution des vagues en domaine littoral. Ces processus peuvent être pris en compte dans le mode « troisième génération » de TOMAWAC.

4.2.1.2 Bathymétrie et maillage

Deux modèles (en conditions actuelles et en conditions du projet) ont été construits dans la Baie de Saint-Brieuc. Les données bathymétriques utilisées sont les mêmes que celles utilisées pour le modèle hydrodynamique. La Figure 4-4 présente la bathymétrie et le maillage utilisés dans les simulations TOMAWAC.

Le maillage autour des éoliennes est également le même que celui utilisé pour les calculs avec TELEMAC.

[9] La technique des éléments finis permet de résoudre les équations du mouvement sur une grille irrégulière, et permet donc de raffiner la précision du modèle dans certaines zones.
[10] Le shoaling correspond à la modification de la hauteur des vagues due à une remontée des fonds.

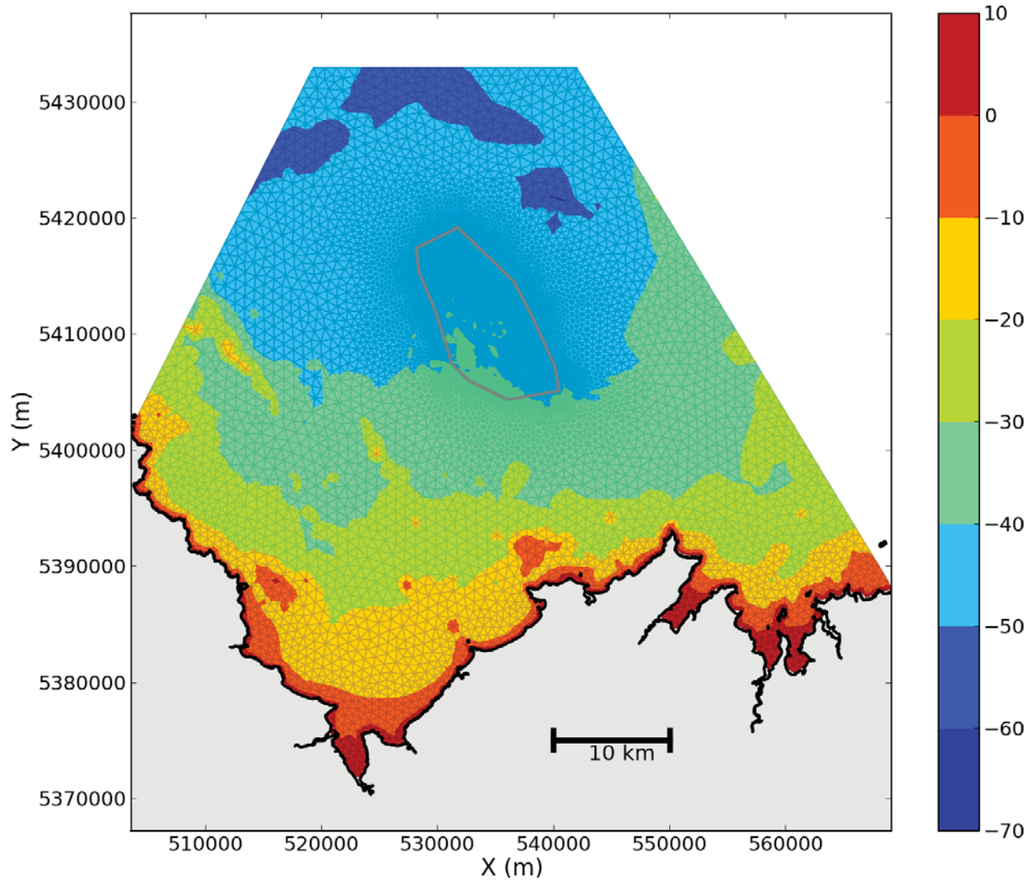


Figure 4-4: **Bathymétrie (référencée par rapport au niveau moyen de la mer) et maillage (la zone d'implantation du parc éolien apparaît en polygone rouge) Coordonnées WGS 84 – UTM30N**

4.2.1.3 Paramètres et conditions aux limites

Les simulations ont été choisies pour reproduire à la fois les conditions extrêmes de vagues et de vent sur le site et les conditions caractéristiques moyennes. Les conditions sont extraites de l'étude météo océanique réalisée pour le dimensionnement des fondations des turbines (Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1).

Six conditions types ont été retenues pour les simulations numériques :

- La condition extrême annuelle en incidence d'ouest-nord-ouest, (Hs=5.6 m/Tp=15.0 s) ;
- La condition extrême décennale en incidence d'ouest-nord-ouest, (Hs=7.8 m/Tp=17.7 s) ;

- La condition extrême centennale en incidence d'ouest-nord-ouest, (Hs=10.0 m / Tp=20.1 s) ;
- La condition moyenne annuelle des états de mer en incidence d'ouest-nord-ouest (Hs=1.3 m/ Tp=12.5 s) ; l'incidence d'ouest-nord-ouest est la plus fréquente (84% des vagues).
- La condition moyenne annuelle des états de mer en incidence de nord-nord-ouest (Hs=1.5 m/ Tp=5.5 s) ; c'est approximatvement dans la direction nord-nord-ouest que le parc est le plus long.
- La condition moyenne annuelle des états de mer en incidence de nord-est (Hs=1.2 m/ Tp=4.5 s) ; c'est approximatvement dans la direction nord-est que le parc est le plus court.

Toutes les simulations sont réalisées avec le niveau moyen car l'analyse d'impact réalisée en 2013 sur une première configuration du parc qui comprenait la mise en place de 100 éoliennes sur des fondations jackets (cf. Réf. 1) avait démontré que la variation du niveau d'eau sous l'effet de la marée avait une influence négligeable sur l'impact physique du parc.

Tous les conditions de forçage des modélisations numériques sont résumées dans le Tableau 4-2.

N°	Condition	Conditions aux limites Direction / Hs / Tp	Conditions de vent Direstion / Vitesse	Niveau d'eau par rapport au niveau moyen
1	Moyenne annuelle d'ONO	ONO (292.5°) 1.3 m 12.5 s	ONO (292.5) 7.4 m/s	0 m
2	Moyenne annuelle de NNO	NNO (337.5°) 1.5 m 5.5 s	NNO (337.5°) 6.1 m/s	0 m
3	Moyenne annuelle de NE	NE (45.0°) 1.2 m 4.5 s	NE (45.0°) 6.9 m/s	0 m
4	Extrême 1 an	ONO (292.5°) 5.6 m 15.0 s	ONO (292.5) 19 m/s	0 m
5	Extrême 10 ans	ONO (292.5°) 7.8 m 17.7 s	ONO (292.5) 24 m/s	0 m
6	Extrême 100 ans	ONO (292.5°) 10.0 m 20.1 s	ONO (292.5) 28 m/s	0 m

Tableau 4-2 Conditions de modélisation des vagues

Chaque simulation est réalisée avec les conditions actuelles et avec les conditions du projet. Les écarts sont analysés pour mettre en évidence les impacts du projet du parc éolien.

TOMAWAC est utilisé avec une discrétisation spectrale de 23 fréquences et 48 directions.

4.2.2 Modélisation des vagues dans les conditions actuelles

La propagation des vagues sur la zone du parc éolien sont présentées sur la Figure 4-5 pour la situation la plus énergétique (période de retour de 100 ans, vagues venant de ONO, la simulation n°6). Les figures pour les autres conditions sont présentées en Annexe B.

Vers la côte de la Baie de Saint-Brieuc, les fonds remontent progressivement et ont un impact non négligeable sur la propagation des houles, qui vont perdre de l'énergie par frottement sur le fond. Combiné au phénomène de réfraction, ce phénomène explique la diminution des hauteurs de vagues vers la côte (divergence des rayons de propagation).

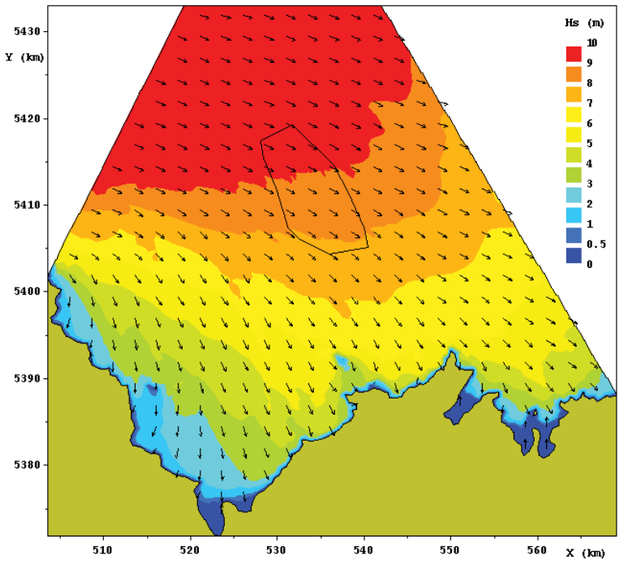


Figure 4-5 : Evolution spatiale des états de mer en conditions actuelles.
(la zone d'implantation du parc éolien apparaît en polygone noir).
Condition extrême 100 ans en incidence ouest-nord-ouest : Hs = 10.0 m / Tp = 20.1 s.
Coordonnées WGS 84 - UTM 30 N.

4.2.3 Modélisation des vagues en présence des structures du parc éolien

4.2.3.1 Impacts à l'échelle régionale

A l'échelle régionale, les principales perturbations des états de mer sont dues aux effets de masquage des fondations qui dissipent une partie de l'énergie des vagues. En aval du parc, le paramètre principalement affecté par ces effets de masquage est la hauteur des vagues.

L'impact du parc éolien sur les états de mer à l'échelle régionale est présenté sur la **Figure 4-6**, pour le scénario le plus énergétique (période de retour de 100 ans, vagues venant du secteur ONO). Les cartes présentent le pourcentage de modification de la hauteur des vagues entre l'état actuel et l'état projet. Ce pourcentage est calculé selon la formule suivante :

Équation 4-1 :

$$\frac{Hs_{projet} - Hs_{actuel}}{Hs_{incident}} \times 100$$

où Hs_{projet} est la hauteur significative des vagues en présence du parc, Hs_{actuel} leur hauteur sinificative en état actuel, et $Hs_{incident}$ la hauteur des vagues à la frontière du modèle.

Les figures pour les autres conditions de vagues et de vent sont présentées en Annexe C. Toutes ces conditions sont plus calmes que celle présentée ici.

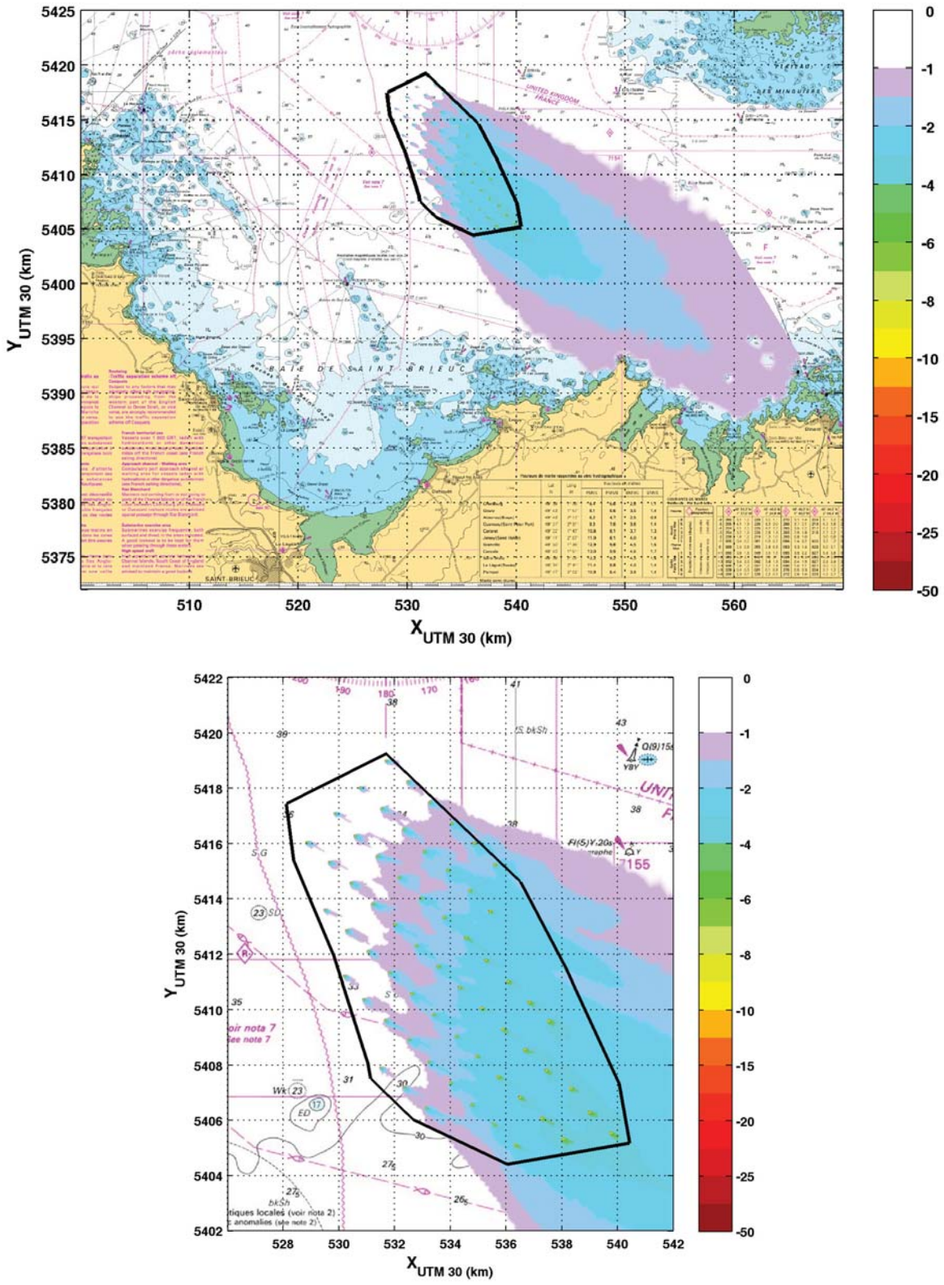


Figure 4-6: Différence de hauteur des vagues (en %), à l'échelle régionale (haut) et à l'échelle du parc éolien (bas) pour la condition extrême 100 ans en incidence ONO. Coordonnées WGS84 - UTM 30 N

Les perturbations générées par le parc éolien sur les vagues sont accentuées par un effet de groupe. Par conséquent, pour les vagues venant de l'ouest-nord-ouest, les perturbations les plus importantes sont situées dans la partie sud-est du parc éolien.

La perturbation diminue rapidement avec la distance et la modification de l'agitation à la côte est négligeable (moins de 1.5% dans une bande côtière de 2 km).

Le Tableau 4-3 présente les perturbations maximales obtenues à l'extérieur du parc et à la côte pour chaque condition de vagues modélisée. Les résultats des simulations montrent que l'impact du parc éolien sur la hauteur des vagues est inférieur à 6% en dehors du périmètre du parc éolien et inférieur à 3.1% à 2 km du périmètre du parc éolien. A la côte, les modifications du champ de vagues n'excèdent pas 1.5%. A noter que le scénario 3 donne un pourcentage plus élevé à l'extérieur du parc que les autres scénarios car la fondation 4 est proche de la limite du parc et qu'en condition de nord-est le sillage de la fondation 4 sort de cette limite.

Scénario	A l'extérieur du parc		A plus de 1km du parc		A plus de 2km du parc		A moins de 2 km de la côte	
	m	%	m	%	m	%	m	%
1	-0.04	-3.3	-0.04	-3.0	-0.04	-2.8	-0.01	-1.0
2	-0.05	-3.1	-0.04	-2.6	-0.04	-2.3	-0.01	-0.8
3	-0.07	-5.8	-0.04	-3.1	-0.03	-2.8	0.00	-0.4
4	-0.19	-3.4	-0.18	-3.1	-0.16	-2.9	-0.06	-1.0
5	-0.28	-3.5	-0.26	-3.3	-0.24	-3.0	-0.09	-1.2
6	-0.36	-3.6	-0.33	-3.3	-0.31	-3.1	-0.14	-1.4

Tableau 4-3 Perturbation maximale des vagues à l'extérieur du parc pour les différents scénarios. Cf Tableau 4-2 pour la définition des scénarios et l'Équation 4-1.

4.3 SYNTHESE

Un modèle de propagation des états de mer a été implémenté dans la zone du parc éolien pour la situation actuelle et pour la situation projet, forcé par des conditions moyennes et extrêmes des vagues et du vent représentatives de la zone d'étude.

Le parc éolien a été représenté par 63 fondations cylindriques d'un diamètre de 15.7 m, qui peut être considéré comme le diamètre équivalent pour les fondations des éoliennes. Cette hypothèse conservative tend à maximiser les effets du parc éolien.

Les résultats des simulations montrent que l'impact du parc éolien sur la hauteur des vagues est inférieur à 6% en dehors du périmètre du parc éolien et inférieur à 3.1% à 2 km du périmètre du parc éolien. A la côte, les modifications du champ des vagues n'excèdent pas 1.5%.

Les effets de masquage sont comparés à la variabilité naturelle des états de mer : les conditions atmosphériques varient d'une année à l'autre faisant succéder aléatoirement des années plus ou moins tempétueuses. Pour évaluer la variabilité naturelle des états de mer, nous disposons d'une base de données des principaux paramètres océaniques modélisés à l'échelle de la Baie de Saint-Brieuc sur une période de 20 ans (Actimar.

(2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1).

Sur les 20 ans d'états de mer modélisés, la dispersion de la moyenne annuelle de la hauteur significative est de 5.9%. Cela signifie que la moyenne annuelle de la hauteur significative varie de 5.9% (en moyenne) d'une année sur l'autre.

On note donc que la perturbation des vagues liée aux effets de masquage des fondations reste inférieure (à l'extérieur du parc) à la variabilité naturelle interannuelle des états de mer.

5 IMPACTS DE LA PHASE TRAVAUX SUR L'ENVIRONNEMENT

5.1 INTRODUCTION

Pendant la phase des travaux, des sédiments issus du fond seront remis en suspension dans la zone de construction du parc, ainsi que des débris de matériaux issus du forage dans la roche. En fonction des conditions hydrodynamiques et des caractéristiques des sédiments (volumes mis en jeu, diamètre…), l'impact de ces sédiments sur l'environnement varie et doit être estimé.

Nous estimons ici les impacts induits par le forage des fondations des éoliennes. Les impacts induits par l'installation des cables entre les turbines seront moindres, car le déplacement de sédiment se fait au niveau du fond et les volumes en jeu sont relativement faibles.

Le calcul sera fait ici pour le forage simultané de deux éoliennes sur les 62 que compte le parc.

5.2 DEFINITION DES SCENARIOS

Le déroulement des travaux prévoit le forage simultané de deux pieux de chaque jacket (qui en compte quatre). Les volumes de sédiment rejetés dans le milieu ont donc été estimés à partir de ce plan de travaux pour des pieux de diamètre 2.5 m. Ces 2.5 m correspondent en fait au diamètre maximal des pieux, ce qui est donc une hypothèse conservative. Deux classes de sédiments ont été retenues : des sédiments grossiers de diamètre 1 mm et des sédiments fins de diamètre 30 microns. La taille de 1 mm de diamètre correspond aux sédiments grossiers présents sur le fond et à la taille des débris rocheux issus du forage. La taille de 30 microns est représentative des vases fines présentes sur le sud du site.

Le volume de sédiment grossier rejeté a été estimé pour des pieux dont la profondeur d'enfoncement dans le substrat est de 52 m. Il s'agit d'une hypothèse conservative, sachant que cette longueur de pieux est la longueur maximale envisagée sur le site et concernera uniquement 15% des pieux.

Le volume de sédiment fin a lui été estimé pour des pieux de profondeur 27 m, ce qui correspond à l'épaisseur maximale de la couche sédimentaire au niveau de l'un des pieux. Le volume rejeté dans le milieu correspond exactement au volume des sédiments extraits. Il s'agit là encore d'une hypothèse conservative, sachant que d'après les levés de G-TEC, le substrat est constitué au maximum de 11.2% de vase.

Le dernier paramètre à définir concerne la durée du rejet. La vitesse de forage des fondations dépend de la nature du substrat et varie de 0.5 m/h pour de la roche à 2 m/h pour des sédiments fins. Une situation moyenne sur les pieux les plus profonds sera : un forage de 27 m à 2 m/h et 25 m à 0.5 m/h : cela conduit à une durée de 63 heures.

Par souci de simplification et pour garder une approche générique et conservative, nous avons choisi de considérer cette durée pour l'ensemble de nos simulations, même si elle n'est pas systématiquement représentative de la durée réelle du forage. Le paramètre essentiel pour l'interprétation des impacts est la quantité de matériau rejeté dans la colonne d'eau. Le fait d'allonger ou de raccourcir la durée du forage va modifier la concentration maximale de sédiments dans l'eau mais n'aura pas d'impact significatif sur les dépôts induits. Si la durée du rejet est plus courte (ce qui sera le cas pour les sédiments fins), la concentration dans la

colonne d'eau sera plus importante, selon une relation linéaire. Un facteur correctif pourra donc être appliqué aux résultats de concentration pour tenir compte de ces éléments.

Les hypothèses de modélisation sont résumées ci-dessous :

- Rejets du forage : diamètre 1 mm
  - Densité : 2650 kg/ m^3
  - Volume rejeté pour chaque éolienne : 510 m^3 de sédiment sec
  - Durée du rejet : 63h
- Sédiments fins : diamètre 30 microns
  - Densité : 2650 kg/m^3
  - Volume rejeté pour chaque éolienne : 270 m^3 de sédiment sec
  - Durée du rejet : 63h

Note: Si tous les sédiments grossiers se déposaient uniformément sur une zone carrée de 1km de côté autour de l'éolienne avec une porosité de 0.4, le dépôt serait de : 510/(1000*1000*(1-0.4)) =0.85 mm.

Le chapitre suivant expose la méthode utilisée pour étudier l'impact de la phase travaux à partir de ces hypothèses.

5.3 MODELISATION NUMERIQUE DU REJET DE SEDIMENT

5.3.1 Méthode

Le module SISYPHE de la suite TELEMAC est utilisé pour modéliser les mouvements sédimentaires. Deux méthodes peuvent être employées : la formule d'érosion/dépôt de Krone et Parthéniades et les formules de transport (Bijker, Soulsby-Van Rijn).

Compte tenu de leur diamètre et donc de leur masse, les sédiments grossiers auront une vitesse de chute très élevée et ne resteront pas en suspension dans la colonne d'eau au-delà de quelques minutes. Nous ne pouvons donc pas étudier leur dispersion uniquement par la formule d'érosion/dépôt de Krone/Parthéniades puisqu'ils ne sont pas transportés par suspension. Néanmoins, la formule de transport a besoin d'information sur la localisation du dépôt initial. Nous avons donc choisi de séparer une première phase pendant le rejet où la dispersion des sédiments est modélisée par une formule érosion/dépôt et une seconde phase où le déplacement du dépôt obtenu est modélisé par une formule de transport. Cette méthode nous permet d'avoir une représentation du dépôt initial (juste après le rejet) et du mouvement de ce dépôt à l'échelle de plusieurs jours après le rejet.

Pour les sédiments fins, la formule d'érosion/dépôt de Krone/Parthéniades est utilisée tout au long du calcul.

5.3.2 Bathymetrie et maillage

La **Figure 5-1** montre la bathymétrie et le maillage utilise par SISYPHE.

Note: La bathymétrie a été interpolée à partir de celle du modèle hydrodynamique utilisé ici (voir le paragraphe suivant).

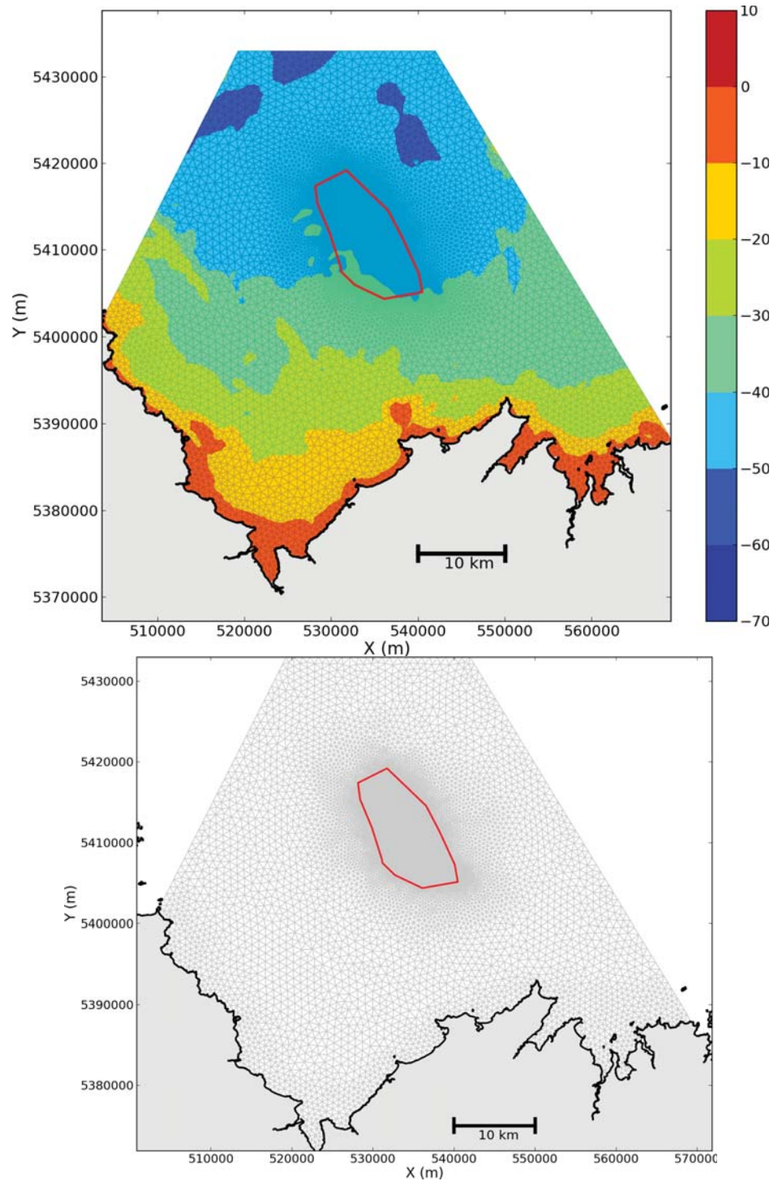


Figure 5-1: Bathymetrie par rapport au niveau moyen et maillage.
Projection WGS 84 - UTM30N. Le parc est représenté par le polygone rouge.

5.3.3 Conditions hydrodynamiques

Les conditions hydrodynamiques ont été extraites et interpolées à partir des modèles :

- MARS pour la hauteur d'eau et le courant
- WW3 pour les caractéristiques des vagues (Hs, Tp, Dir)

Compte tenu des temps de calcul associés aux modèles TELEMAC et TOMAWAC utilisés pour les impacts hydrodynamiques et les impacts des vagues, il n'était pas possible d'utiliser ces modèles pour simuler une période suffisamment longue pour représenter correctement les impacts de la dispersion sédimentaire. Nous avons donc choisi d'exploiter ces deux modèles, plus légers mais parfaitement adaptés à la problématique. Ils ont été validés par rapport aux mesures disponibles sur la hauteur d'eau, sur les courants, ainsi que sur la hauteur et la direction des vagues.

La période de simulation retenue correspond au mois de mars 1988. Ce mois a été choisi en raison des conditions hydrodynamiques favorables en début de période, puis plus fortes par la suite : les opérations de forage sont possibles en début de mois, puis les vagues et les courants plus intenses vont maximiser le déplacement des sédiments issus du forage. Nous nous plaçons ainsi dans un cas susceptible de maximiser les impacts. Les conditions de vagues et de courant sont présentées sur la **Figure 5-2**.

Le coefficient de marée atteint 115 le 19 mars 1988. Les courants maximaux, renforcés par le vent atteignent jusqu'à 1.7 m/s. Les hauteurs de vagues dépassent 4 m au moment le plus intense de la période.

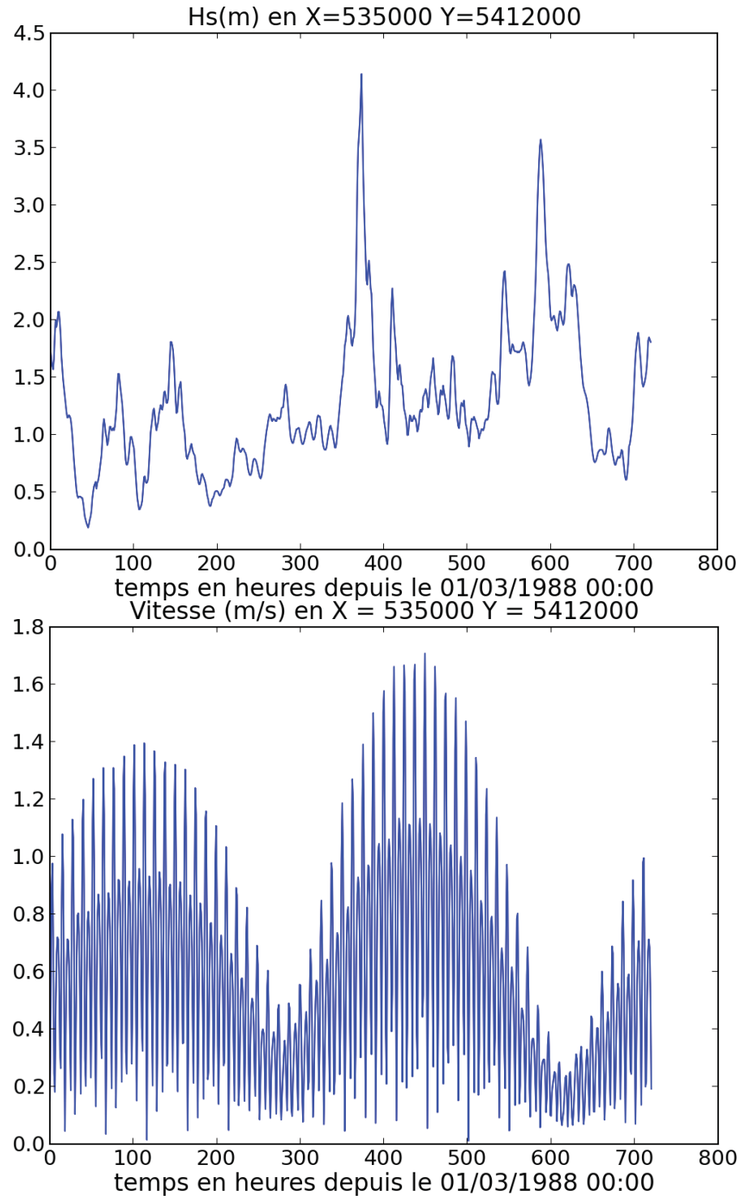


Figure 5-2: Conditions hydrodynamiques au centre du parc éolien (X=535000m, Y=5412000m en UTM30N) en Mars 1988 (axe horizontal: heures depuis le 01/03/1988 00:00). En haut : hauteur des vagues, en bas : vitesse du courant

5.3.4 Paramètres du modèle

Pour représenter la phase de construction, deux éoliennes situées aux extrémités du parc (SE et NO) ont été choisies. Une interprétation des résultats sera ensuite effectuée pour analyser l'impact au niveau du parc entier (100 éoliennes)

Pour les sédiments grossiers, la première phase (suspension) est modélisée avec les paramètres suivants :

- Période de simulation : 01/03/1988 00:00 au 03/03/1988 23:00
- Sédiment de 1mm de diamètre
- Rejet pendant 63h pour chaque éolienne (Note : 01/03/1988 07:00 to 03/03/1988 22:00) : 510/63 = 8.1 m^3/h
- Vitesse de chute pour un diamètre de 1mm : 10 cm/s
- Concentration du dépôt : 1600 kg/m^3 (ce qui correspond à une porosité de 0.4)
- Pas d'érosion, le dépôt ne bouge pas

La seconde phase pour les sédiments grossiers est modélisée avec les paramètres suivants :

- Période de simulation : 03/03/1988 23:00 au 30/03/1988 23:00
- Sédiment de 1mm de diamètre
- Dépôt initial issu de la simulation précédente
- 2 formules de transport : BIJKER et SOULSBY - VAN RIJN (pour analyser la sensibilité des résultats au choix de la formule)

Pour les sédiments fins, la dispersion des sédiments est modélisée avec les paramètres suivants :

- Période de simulation : 01/03/1988 00:00 au 30/03/1988 23:00
- Sédiment de 30 microns de diamètre
- Rejet pendant 63h pour chaque éolienne (Note : 01/03/1988 07:00 to 03/03/1988 22:00) : 270/63 = 4.3 m^3/h
- Vitesse de chute pour un diameter de 30 microns : 0.6 mm/s
- Concentration du dépôt : 500 kg/m^3 (ce qui correspond à une porosité de 0.8)
- Pas d'érosion, le dépôt ne bouge pas (hypothèse valide car le dépôt est non-significatif)

5.4 RESULTATS POUR LES SEDIMENTS GROSSIERS (DIAMETRE 1MM)

5.4.1 Première phase : suspension

Pendant la première phase, une grande partie des sédiments grossiers se dépose à proximité de la localisation du rejet (voir Figure 5-4). Ceci s'explique par la vitesse de chute très élevée pour ces sédiments, qui gouverne leur mouvement pendant le rejet.

Avant de se déposer, les sédiments sont plus ou moins brièvement advectés vers le NO ou le SE. L'expansion de ce mouvement dépend principalement de la phase de la marée. La Figure 5-3 montre que, dans les hypothèses retenues, l'empreinte des concentrations supérieures à 1mg/l est très localisée (quelques centaines de mètres) autour du forage en cours.

Le maximum de concentration peut atteindre quelque dizaine de mg/l localement pendant la phase de rejet. Lorsque le rejet s'arrête, la concentration est non-significative après 1 heure (voir Figure 5-5 haut). Pour rappel, les concentrations naturelles en MES (Matières En Suspension) dans la zone du parc éolien de Saint-Brieuc évoluent entre 1 et 5 mg/l au cours de l'année.

Le dépôt augmente quasi proportionnellement avec le temps près du rejet avec des variations en raison des courants de marée (plus de dépôt lors des phases de faibles courants). Le dépôt peut atteindre quelques centimètres au niveau du rejet (voir Figure 5-5) mais ne dépasse pas 1mm à quelques centaines de mètres du rejet.

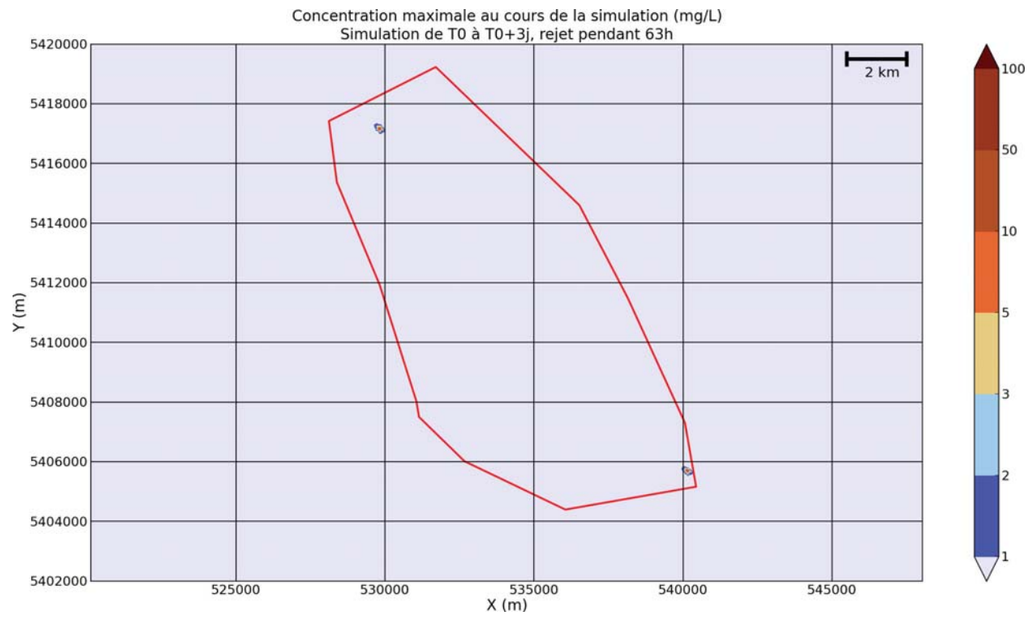


Figure 5-3: Concentration maximale modélisée en chaque point de la grille (mg/l) pendant la première phase de simulation pour les sédiments grossiers. Ce maximum n'est pas atteint au même moment en chaque point de la grille - Projection WGS 84 - UTM30N. Le parc est représenté par le polygone rouge.

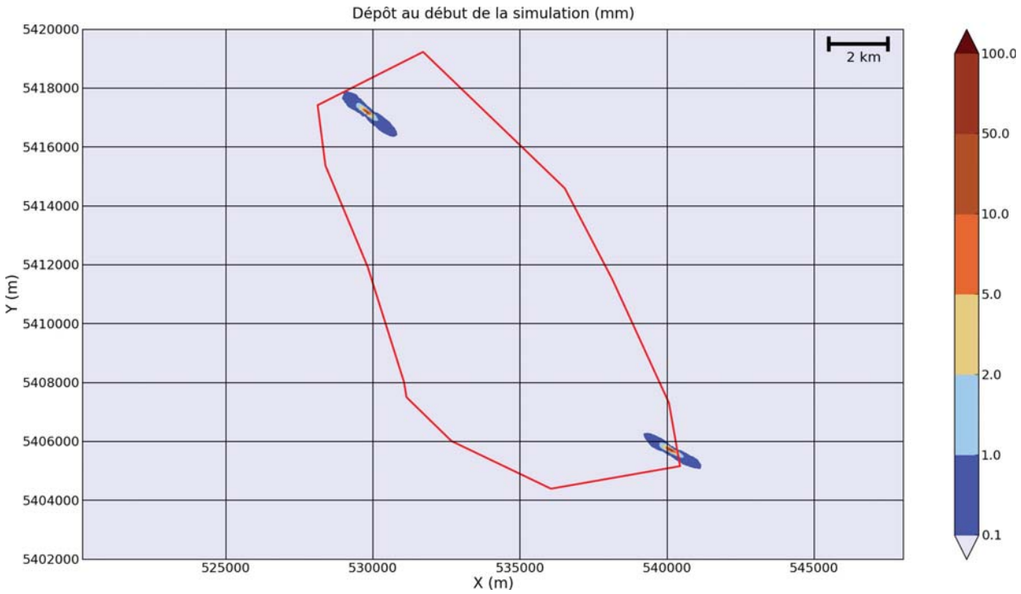


Figure 5-4: Dépôt (mm) à l'issue de la première phase de simulation pour les sédiments grossiers - Projection WGS 84 - UTM30N. Le parc est représenté par le polygone rouge.

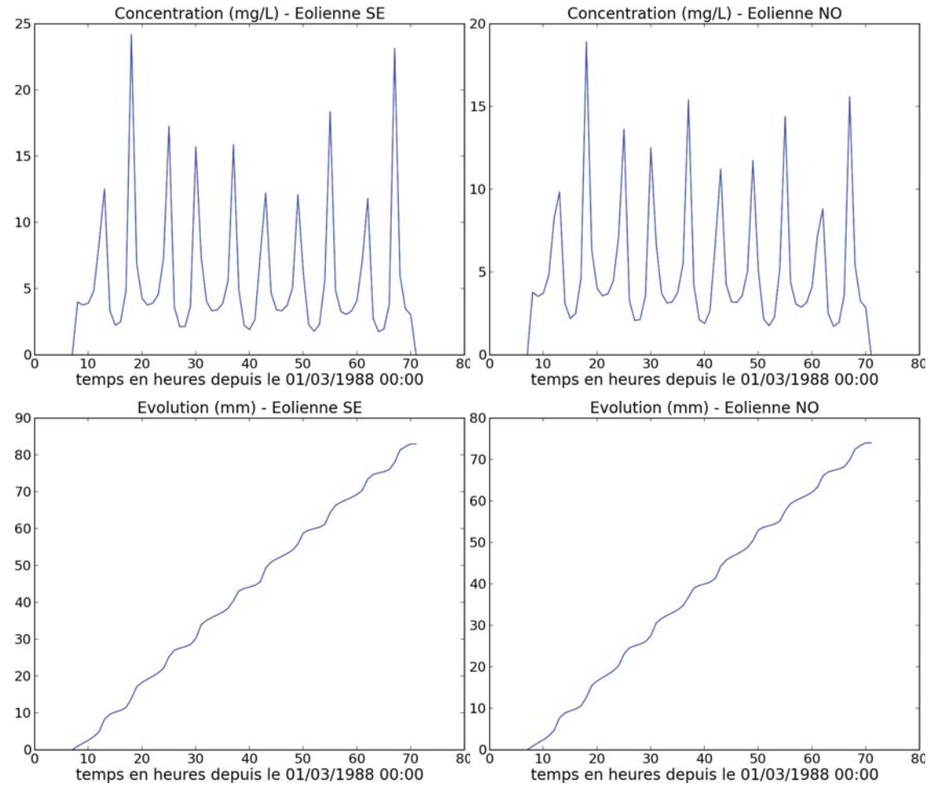


Figure 5-5: Evolution de la concentration et du dépôt au niveau de chaque rejet pendant la première phase de simulation pour les sédiments grossiers. Le rejet à lieu entre les heures 7 et 70.

5.4.2 Deuxième phase : évolution du dépôt de matériaux grossiers

Pendant la seconde phase, le déplacement du dépôt est gouverné principalement par les courants et secondairement par les vagues étant donné les profondeurs des zones de dépôt.

Les Figure 5-6 à Figure 5-8 montrent l'évolution du dépôt au cours de la simulation.

L'asymétrie des courants entre les phases de flot et jusant est plus prononcée en vive-eau (Voir §2.3.2.1). Ceci explique le transport résiduel significatif vers le sud-est au début de la simulation (coefficients supérieurs à 80 les premiers jours). Les variations des coefficients de marée et les fortes vagues en seconde moitié de simulation dispersent davantage les sédiments dans toutes les directions.

A l'issue de la simulation, le dépôt s'étale avec des valeurs inférieures à 1 mm dans un rayon de 2km autour du rejet (voir Figure 5-8), les deux formules utilisées convergent sur ce point.

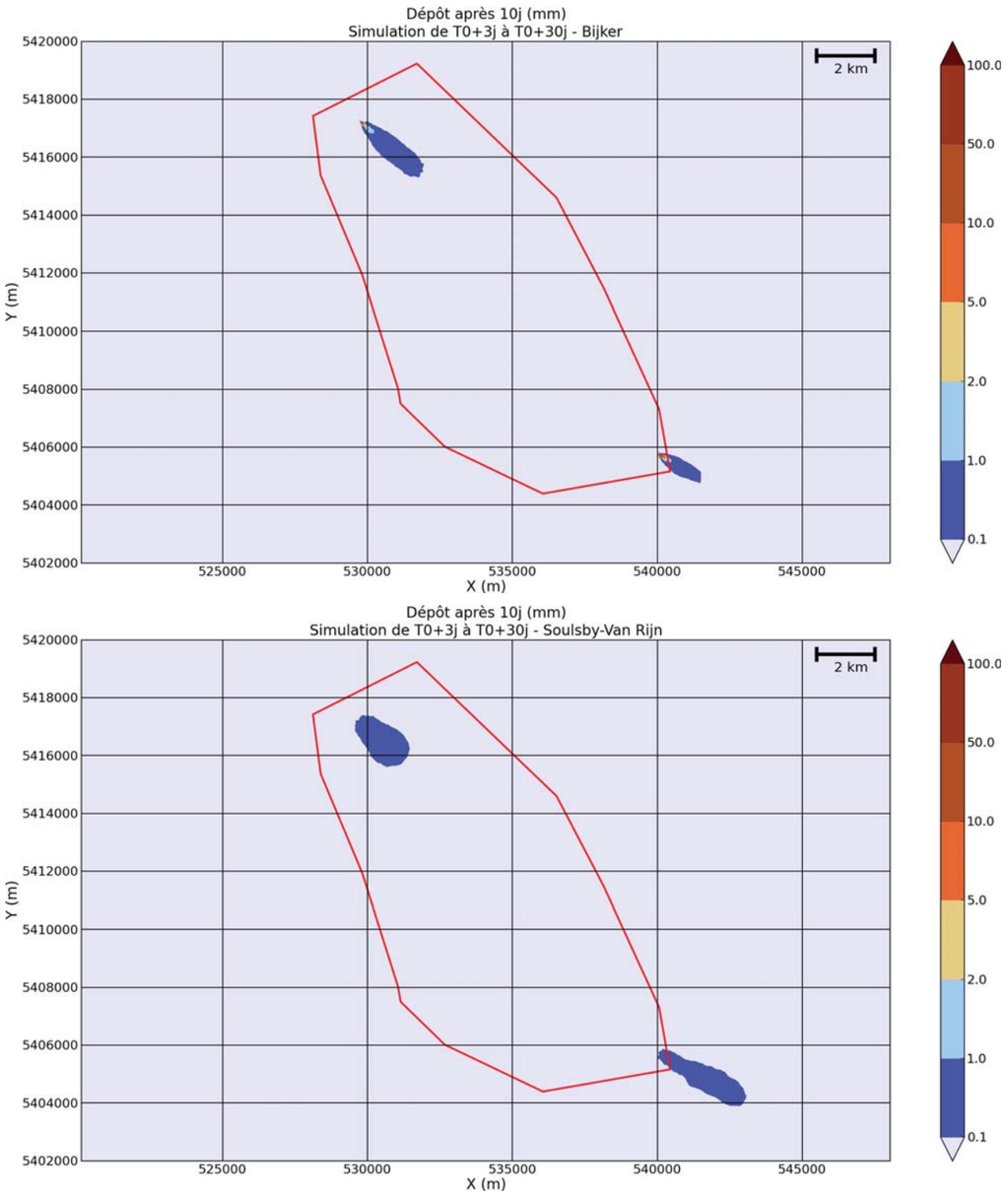


Figure 5-6: Dépôt (mm) après 10j. Formule de Bijker (haut) et formule de Soulsby-Van Rijn (bas) - Projection WGS 84 - UTM30N. Le parc est représenté par le polygone rouge.

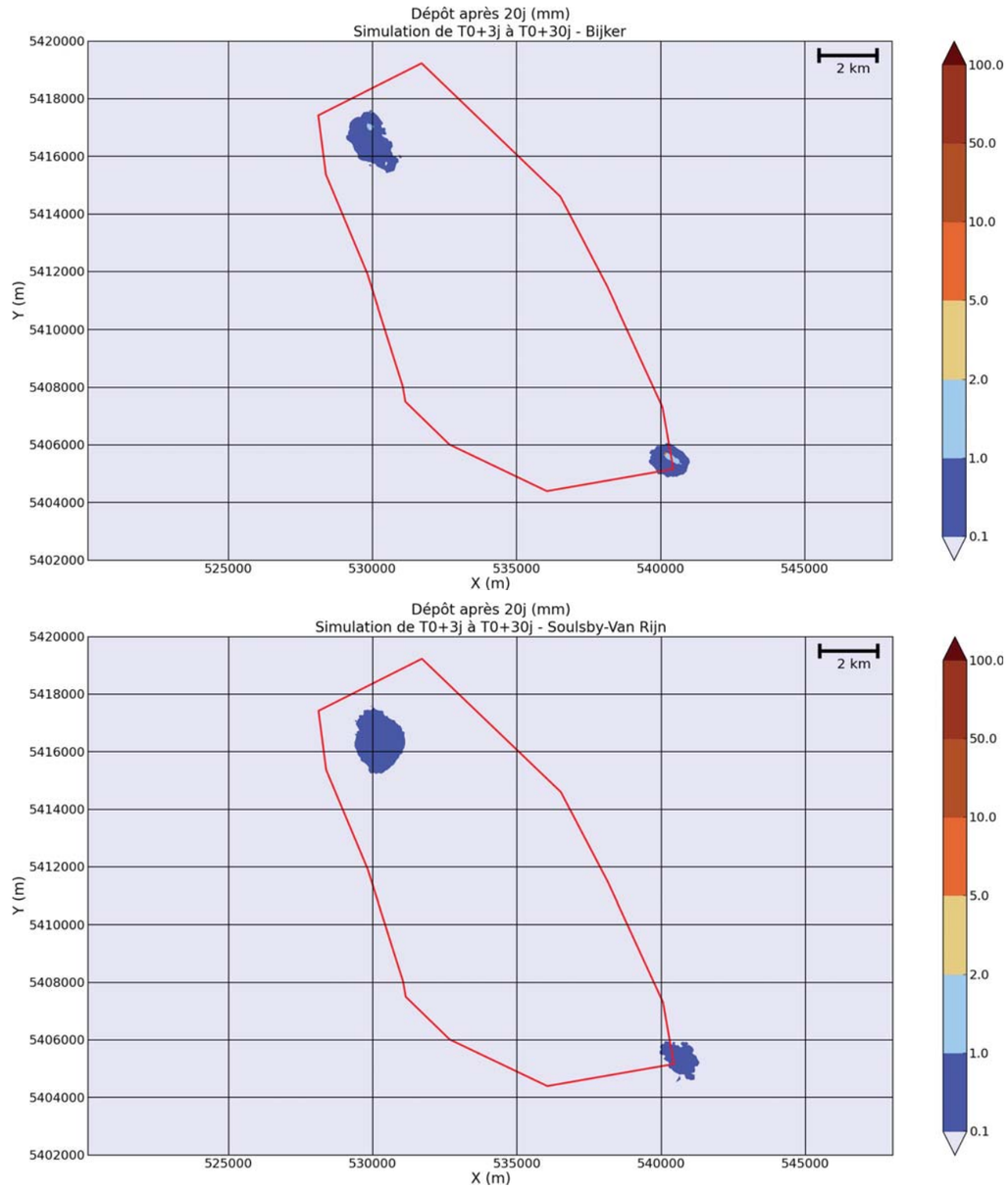


Figure 5-7: Dépôt (mm) après 20j. Formule de Bijker (haut) et formule de Soulsby-Van Rijn (bas) - Projection WGS 84 - UTM30N. Le parc est représenté par le polygone rouge.

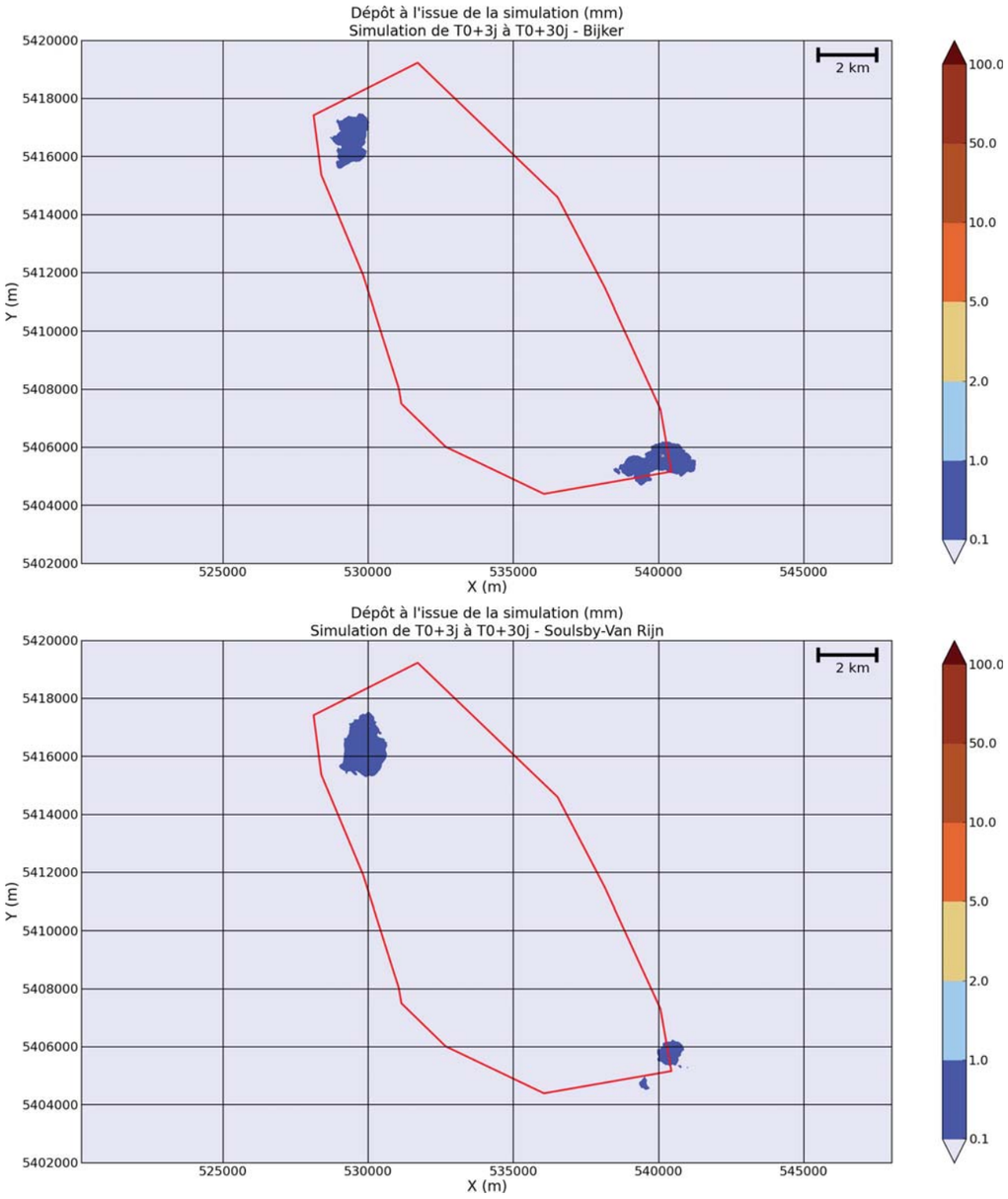


Figure 5-8: Dépôt (mm) à l'issue de la simulation (30j). Formule de Bijker (haut) et formule de Soulsby-Van Rijn (bas) - Projection WGS 84 - UTM30N. Le parc est représenté par le polygone rouge.

5.5 RESULTATS POUR LES SEDIMENTS FINS (DIAMETRE 30 MICRONS)

Les sédiments fins ont une vitesse de chute beaucoup plus faible que les sédiments grossiers, ils sont donc susceptibles d'être advectés beaucoup plus loin que ces derniers, tout en étant plus dilués. Les teneurs maximales modélisées près du rejet pendant le forage sont de l'ordre de 15 à 20 mg/l au maximum. Après l'arrêt du forage, elles retombent très rapidement à moins de 1mg/l.

Il est possible d'extrapoler ces résultats pour des rejets de la même quantité de sédiment sur une durée plus courte. Si on considère que le rejet se fait sur une durée de 14h seulement (donc sur une durée environ 4 fois plus courte), il faut multiplier les valeurs de concentration par 4. On arrive donc à des concentrations de l'ordre de 60 à 80mg/l au maximum pendant le forage.

Pour rappel, les concentrations naturelles en MES sur la zone sont de l'ordre de 1 à 5 mg/l (voir chapitre 1)

L'empreinte du panache du rejet visible sur la **Figure 5-9** montre que les concentrations ne dépassent pas 1mg/l pour une distance de l'ordre de 1km du rejet. Par ailleurs, la Figure 5-11 montre que les concentrations redeviennent non significatives après la fin du rejet

Concernant les dépôts, la **Figure 5-10** montre que ceux-ci sont très localisés et très faibles. Ceci s'explique par les faibles quantités remises en suspension (Note : 270 m^3 correspond à un dépôt uniforme de 1.35 mm sur 1km² pour une porosité de 0.8).

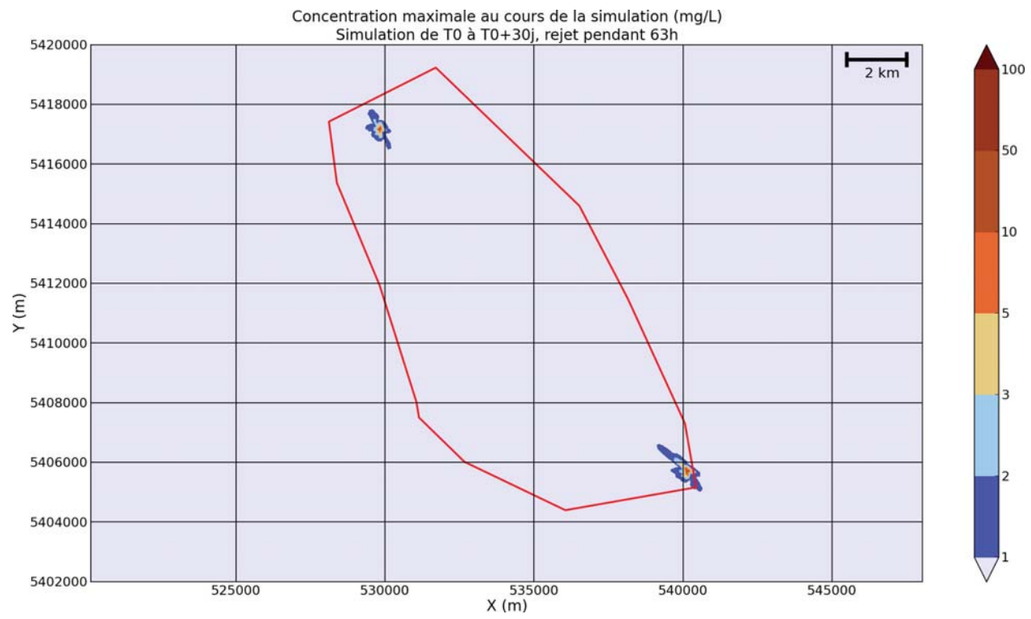


Figure 5-9: Concentration maximale (mg/l) en chaque point de grille pour les sédiments fins au cours de la simulation. Ce maximum n'est pas atteint au même moment en chaque point de la grille. Projection WGS 84 - UTM30N. Le parc est représenté par le polygone rouge.

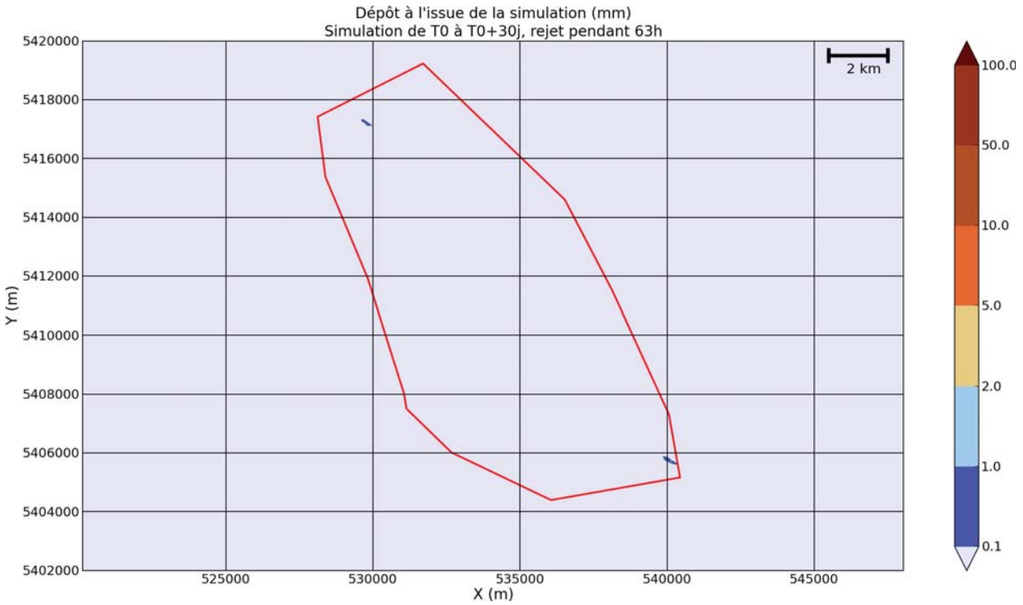


Figure 5-10: Dépôt (mm) à l'issue de la simulation pour les sédiments fins
Projection WGS 84 - UTM30N. Le parc est représenté par le polygone rouge.

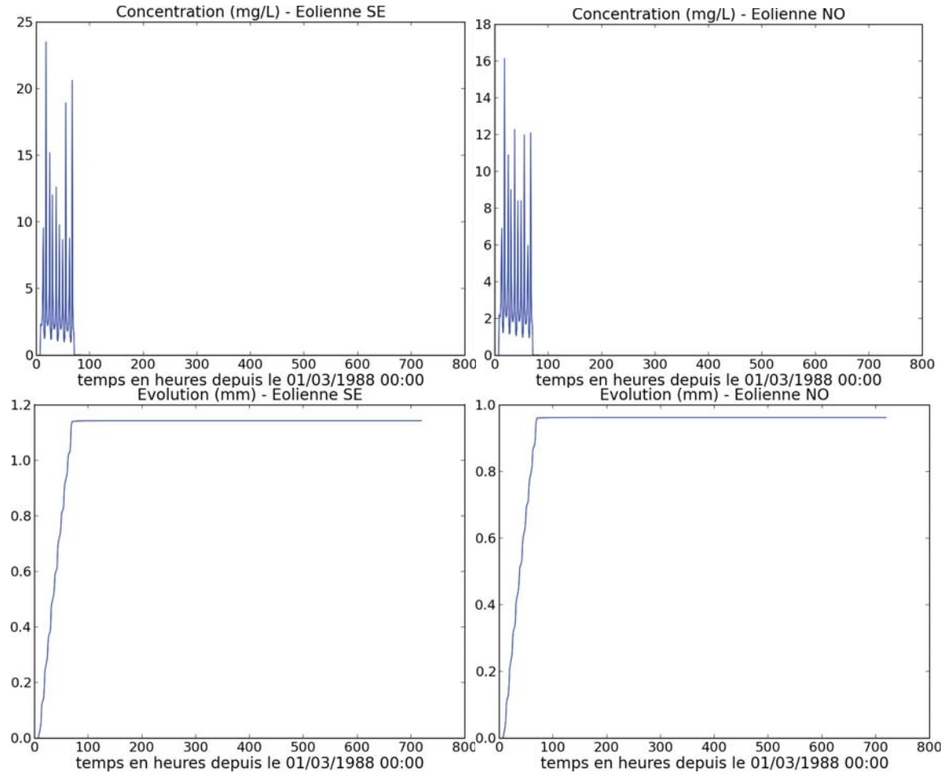


Figure 5-11: Evolution de la concentration et du dépôt au niveau de chaque rejet pour les sédiments fins

5.6 SYNTHESE

Le modèle hydro-sédimentaire SISYPHE a été mis en oeuvre avec des forçages hydrodynamiques issus de MARS et WW3 sur une période de 1mois pour représenter l'impact de la phase de construction des éoliennes sur l'augmentation de la turbidité d'une part et les dépôts d'autre part.

Les matériaux concernés par la remise en suspension et le transport sont des matériaux issus du forage et des matériaux présents sur le fond à l'endroit des travaux.

Les résultats des simulations montrent que les matériaux les plus gros mobilisés pendant la phase travaux ne génèrent pas de panache turbide de nature à impacter l'environnement. Les panaches turbides générés au pied de chaque fondation sont très localisés et n'atteignent pas l'emplacement des autres éoliennes. Donc le forage simultané de plusieurs fondations ne provoquera pas d'impacts plus importants que ceux simulés ici.

Concernant les dépôts engendrés, ceux-ci se dispersent sous l'effet des courants et de la houle. Après 10 jours, il reste encore des dépôts de l'ordre de 5cm au pied de chaque forage, mais après 30 jours, tous les dépôts prédits sont inférieurs à 1mm, l'extension spatiale du dépôt est de l'ordre de 2 km. Ces résultats sont issus du forage de 2 pieds d'un jacket. L'épaisseur de matériau induite par le jacket total sera donc inférieure à 2 mm après 30 jours.

Etant donnée l'extension des panaches, les dépôts issus de deux à trois éoliennes peuvent se superposer en certains points. Le dépôt total théorique pourrait donc atteindre au plus 6mm sur la zone du parc éolien. Pour affiner cette estimation, il est possible de calculer l'épaisseur de matériau déposée sur une surface donnée. Cette valeur, notée *E*, est donnée par la formule suivante :

$$E = \frac{V}{S(1-p)}$$

où *V* est le volume de matériau rejeté, *S* la surface d'étalement et *p* la porosité du matériau (0.4 dans notre cas). Pour un volume total rejeté de 100 200 m^3 et une surface de la zone de clapage d'environ 103 km², on obtient une épaisseur de 1.62mm. Donc si la totalité de ces matériaux grossiers s'étale sur l'emprise exacte du parc, l'épaisseur moyenne du dépôt sera de l'ordre de **1.6 mm**.

Les sédiments fins mobilisés pendant la phase travaux sont issus des forages dans les zones de fonds meubles. Ces sédiments sont présents en quantités relativement faibles et engendrent donc des panaches et des dépôts très limités. Comme pour les matériaux plus grossiers, même si le panache est plus étendu, les concentrations sont faibles et localisées dans le temps et l'espace. Des concentrations pouvant atteindre 80 mg/l de matières en suspension sont possibles pendant les opérations, mais ces valeurs retombent dans la limite du bruit de fond naturel immédiatement après l'arrêt du forage. Les dépôts induits par ces matériaux très fins ne sont pas significatifs étant donné leur caractère très volatil. Ils sont transportés sur de grandes distances et contribuent à un dépôt diffus indiscernable du dépôt naturel.

6 IMPACT SEDIMENTAIRE

6.1 DYNAMIQUES DES SEDIMENTS ET PERSPECTIVES D'EVOLUTION

L'analyse des résultats de la modélisation hydrodynamique (voir section 3) aide à la compréhension de la dynamique des sédiments. De cette analyse, il est clair que les courants de flot sont plus forts que les courants de jusant, et que la vitesse du courant diminue du nord-ouest au sud-ouest. Pour une marée moyenne de vive-eau (coefficient 95), dans la zone du parc éolien, la vitesse maximale de courant de flot est comprise entre 1.05 et 1.35 m/s, et entre 0.8 et 1 m/s pour les courants de jusant. Cette asymétrie entre le flot et le jusant est clairement mise en évidence sur la Figure 6-1. Cette prévalence du flot est encore accrue par la relation non-linéaire entre la vitesse du courant et le transport des sédiments. Le transport est en effet proportionnel à une puissance de la vitesse du courant, comprise entre 3 et 6 selon les estimations empiriques.

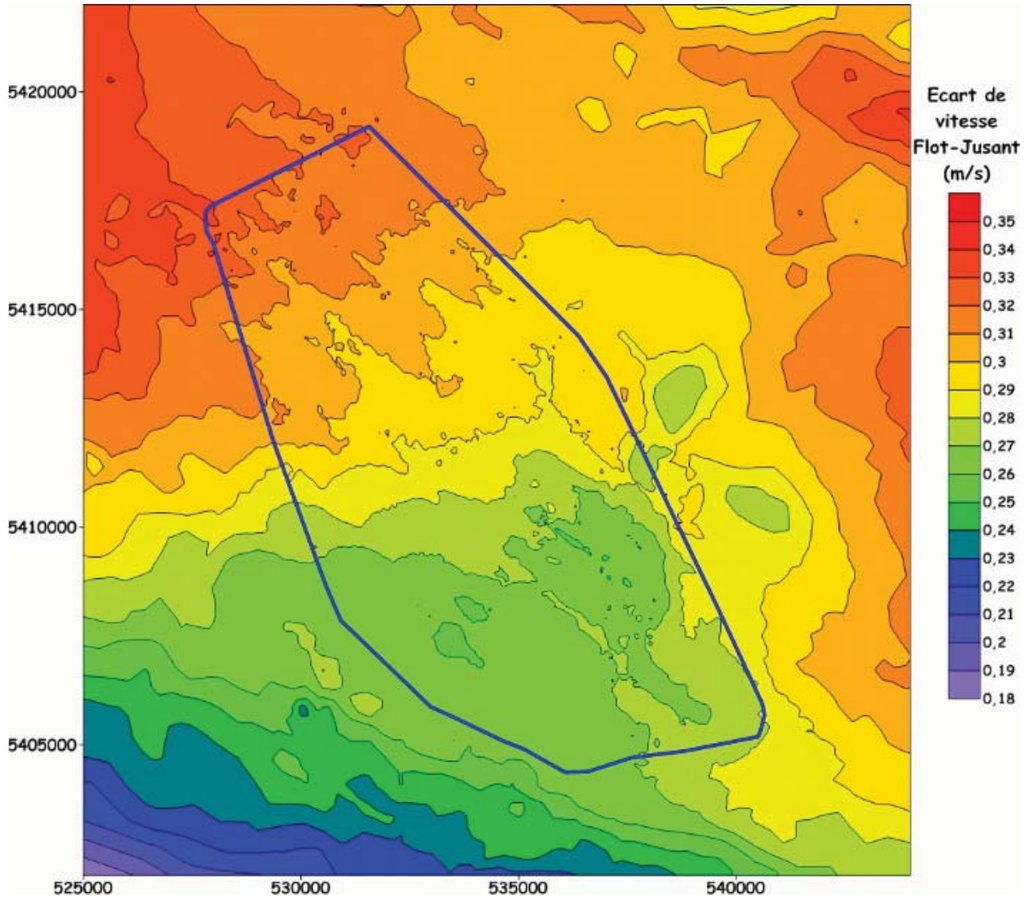


Figure 6-1 Différence entre les vitesses maximales de courants de flot et de jusant sur la zone du parc éolien – coordonnées [m] WGS84 - UTM 30N

De cette analyse, il apparaît que le transport sédimentaire potentiel se produit du nord-ouest vers le sud-est. La réduction de la vitesse du courant le long de la trajectoire NO-SE devrait se traduire par un dépôt sédimentaire significatif. Mais l'analyse de l'évolution à long terme de la bathymétrie (voir § 2.5.2) semble indiquer que ce n'est pas le cas.

La capacité de transport sur un site donné décrit la capacité des courants à transporter une quantité de sédiments à travers ce site. Si la quantité de sédiments dans la colonne d'eau dépasse cette capacité de transport, le transport est "saturé". Le dépôt de sédiments sur le fond marin peut se produire seulement si le transport est saturé. Dans l'autre cas, il s'agit d'un simple transit des sédiments à travers le site.

L'absence d'évolution significative de la bathymétrie et l'absence de motifs réguliers sur le fond de la mer sont une indication typique que le transport n'est pas saturé. Les sédiments ne font que transiter à travers la zone prévue du parc éolien. Le transport non-saturé est également cohérent avec les forts courants de marée observés sur le site.

Durant ce transit, les sédiments les plus fins peuvent être piégés par des sédiments plus grossiers sur le fond de la mer, mais pas en quantité significative. La nature très hétérogène des sédiments sur le fond confirme cette analyse. En outre, la proximité de la roche au fond sur la plus grande partie de la zone confirme également la tendance générale à la stabilité du fond marin.

6.2 INTERACTIONS ENTRE LE PROJET ET LE FOND DE LA MER

6.2.1 Impact local

6.2.1.1 Mécanisme d'affouillement

La présence d'obstacles - tels que les fondations des éoliennes - sur un fond de la mer où le transport des sédiments se produit, peut conduire potentiellement à de l'affouillement local. Ce phénomène est dû à la fois :

- à l'accélération de l'écoulement au voisinage de l'obstacle en raison de la convergence des lignes de courant,
- à l'augmentation de l'énergie de l'écoulement turbulent, en raison de la génération de tourbillons autour de la structure (cf. Figure 6-2).

Pour un écoulement stationnaire ou variant lentement avec le temps (marée), l'obstacle conduit à une augmentation de pression sur sa face amont. Le gradient de pression produit un écoulement vers le bas, ce qui génère un premier tourbillon lorsqu'il atteint le fond (Whitehouse, 1998 [Réf. 19]). Dans le cas d'un cylindre, ce tourbillon entoure l'obstacle et disparaît en donnant naissance à un second tourbillon, avec une forme de fer à cheval. Ces deux tourbillons, en augmentant la contrainte de l'écoulement sur le fond, sont largement responsables de l'affouillement autour de la base du cylindre.

Dans le cas des vagues, l'augmentation locale de la pression est plus petite que dans le cas d'un courant de marée, principalement parce que l'effet des vagues décroît avec la profondeur, alors que le courant agit sur toute la colonne d'eau.

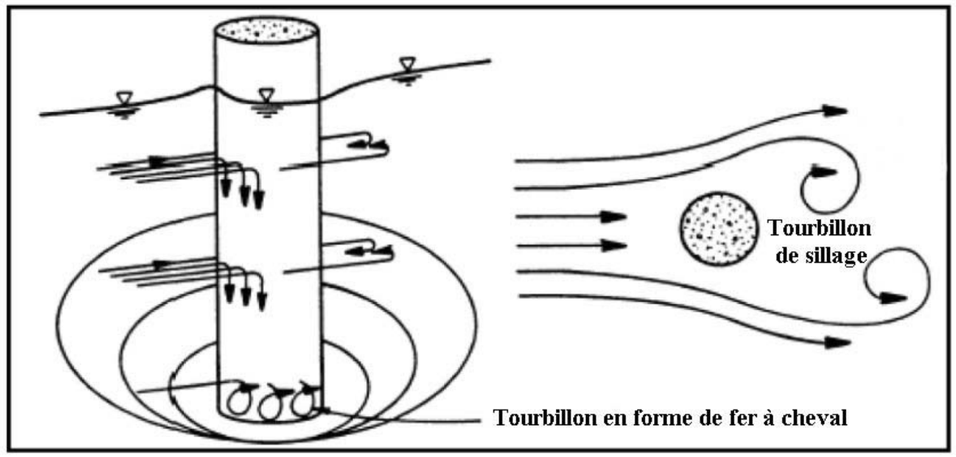


Figure 6-2 : Représentation de l'affouillement au pied d'un cylindre.
Référence: U.S. Army Corps of Engineers - 2001.

6.2.1.2 Caractéristiques de l'affouillement

Etant donné que la turbulence est un phénomène local et compte tenu de la faible dimension des fondations jacket par rapport à la distance séparant les différentes éoliennes, il n'y aura pas d'interaction entre les éoliennes dans le mécanisme de génération de turbulence. Les caractéristiques de l'affouillement sur le site sont donc celles correspondant à une seule fondation isolée.

Le cas d'une structure de type jacket est moins bien documenté que les monopieux et les fondations gravitaires, probablement parce que sa modélisation numérique est beaucoup plus difficile, et que la modélisation physique est facilement impactée par les effets d'échelle. Les informations disponibles proviennent essentiellement d'observations sur le terrain dans des zones où les sédiments sont entièrement mobiles.

Pour ce type de fondation, nous devons faire la différence entre :

- L'affouillement local - directement provoqué par les jambes de la structure,
- L'affouillement global - résultant de l'interaction entre l'écoulement et l'ensemble des éléments de la structure (pieds et croisillons) sous l'effet de la contraction de l'écoulement et de la turbulence générée par les éléments de la structure.

Les affouillements locaux sont situés autour de chaque pied, sur une distance assez limitée, tandis que l'affouillement global a la forme d'une "soucoupe", et va au-delà de l'influence de l'ensemble des fondations. La Figure 6-3 présente une représentation conceptuelle de tous ces phénomènes d'affouillement, issue de Angus et al. (1982 [Réf. 28]).

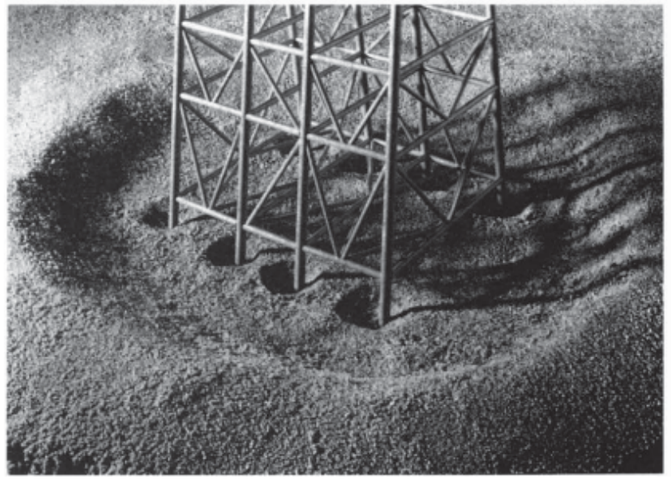


Figure 6-3 : Représentation conceptuelle de l'affouillement autour d'un jacket : local et global (Angus et al, 1982)

En ce qui concerne l'affouillement local, il peut être traité en première approche à partir de la connaissance des effets des fondations de type «étroites», compte tenu de la relation entre le diamètre de la jambe et la profondeur de l'eau. Les caractéristiques de l'affouillement potentiel sont principalement liées au courant : la fosse d'affouillement se développe sur la face avant de l'obstacle, sur le côté, puis sur l'arrière. Il prend une forme sensiblement conique autour de la pile (voir Figure 6-4). La profondeur maximale de la fosse est d'environ 1.3 D à 1.4 D (D étant le diamètre du pieu, soit 1.62 m pour le parc de Saint-Brieuc) lorsque le pieu est cylindrique (Soulsby, 1997 [Réf. 29]). Sa taille est de l'ordre de 3*D en amont de la pile (environ 5 m dans notre cas), et 5*D en aval (environ 8 m dans notre cas). Plus en aval du cylindre se produit un petit monticule correspondant au dépôt des sédiments érodés, jusqu'à une distance d'environ 8*D (légèrement inférieur à 13 m dans notre cas).

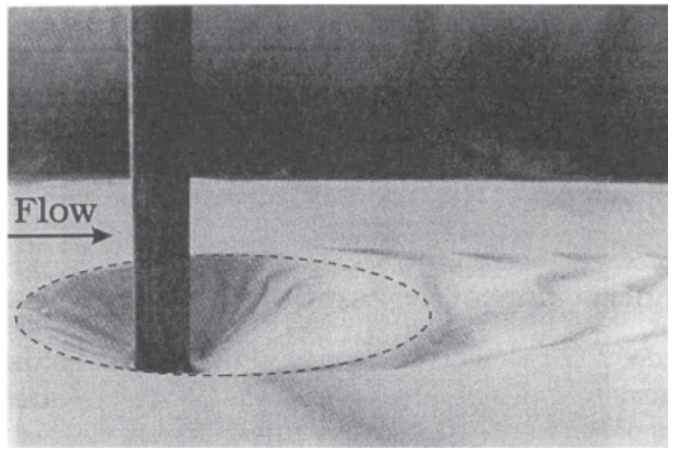


Figure 6-4 : Fosse d'affouillement autour d'un cylindre, développée seulement par le courant (issu de *Eadie et al., 1986* [Réf. 30], *Sumer et al., 2002* [Réf. 31])

Les études de conception de différentes structures donnent quelques informations sur les profondeurs d'affouillement - locale et globale - attendues:

- Pour le champ de gaz Leman dans le sud de la mer du Nord, une profondeur d'eau de 20 m, un affouillement global potentiel de 1 m, et un affouillement local potentiel allant de 2.3 à 2.75 m (en fonction du diamètre du pieu) ont été considérés.
- Dans le cadre d'un précédent projet dans la Baie de Saint-Brieuc, OWEC TOUR AS (2009) [Réf. 32] envisageait un affouillement similaire de 1 m pour l'affouillement global et de 1.5 * le diamètre de la pile – (ici 1.3 m) - pour l'affouillement local.

Parmi les observations in situ, Keith Philpott Consulting (1986) [Réf. 33] ont rapporté une profondeur de 3 m pour l'affouillement global pour une des plates-formes étudiées dans le golfe du Mexique. (Sybert 1963 [Réf. 34]). Ils ont également signalé une érosion de 3 m autour des pieds de la plate-forme Nordpipe AS dans le sud de la mer du Nord.

Enfin, l'érosion autour de deux structures dans la mer du Nord (une avec quatre jambes, l'autre avec six jambes), dans une profondeur d'eau de 25 m, a été suivie par plusieurs relevés bathymétriques (Rudolph et al., 2004 [Réf. 35] cf. Figure 6-5). L'érosion peut atteindre jusqu'à 5 m, la plupart des jambes subissant une érosion comprise entre 2 m et 3.5 m. L'influence de l'affouillement global est d'environ 50 m dans toutes les directions - soit 40 fois le diamètre de chaque jambe. Cet exemple est comparable à notre étude en termes de dimensions de la structure, mais pas de nature des sédiments. Il s'agit en fait d'un cas très pessimiste, avec des sédiments beaucoup plus fins et mobiles que dans la Baie de Saint-Brieuc.

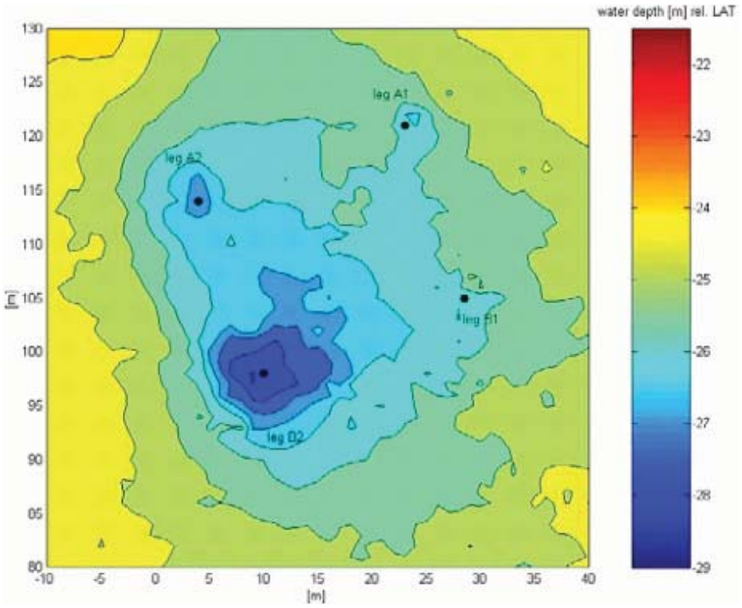


Figure 6-5 Bathymétrie autour de la plateforme L9, 3 ans après son installation (issu de Rudolph et al, 2004 [Réf. 35**]).**

Il montre cependant que la profondeur de l'érosion est beaucoup plus importante que celle qui serait issue de chacun des pieds pris séparéments. Cela corrobore les observations faites par WL/Delft Hydraulics dans le cadre de leurs études en mer du Nord : pour une structure de type jacket, il y aurait un facteur de 3 à 4 entre les profondeurs d'affouillements observées et celles prédites dans le cas d'une fondation unique de même diamètre que les jambes de la structure.

Le **Tableau 6-1** résume l'ensemble de ces valeurs :

Lieu	**Profondeur d'eau**	**Affouillement global**	**Affouillement local**
Mer du Nord (Leman)	20 m	1 m	2.3 à 2.75 m
Baie de Saint-Brieuc	30 m	1 m	1.95 m
Golfe du Mexique		3 m	
Sud de la Mer du Nord (Nordpipe AS)		3 m	
Mer du Nord			2 m à 3.5 m

Tableau 6-1 : valeurs d'affouillements recensées pour quelques structures offshore

Enfin, le suivi bathymétrique pendant et après l'installation des fondations du parc éolien de Thornton Bank (Bolle et al, 2012 [Réf. 36]) a montré une forte différence dans la configuration et l'ampleur de l'érosion entre:

- La phase initiale où seulement quatre pieux étaient installés pour recevoir la structure,
- La phase suivante où l'ensemble du jacket était installé.

Cela montre clairement l'effet spécifique des croisillons et des bras sur l'intensification et l'expansion de l'affouillement.

Dans notre cas, la nature du fond de la mer et l'épaisseur de la couche mobile vont limiter l'influence et la profondeur de l'érosion. Cela pourrait conduire à un tri des sédiments résiduels près de chaque fondation: le sédiment plus fin sera emporté, et le plus grossier aura tendance à rester en place - sauf peut-être dans le voisinage immédiat de chaque pile, où un petit trou d'érosion pourrait être observé.

Étant donné le manque de connaissances précises sur l'effet des fondations sur le fond de la mer et la forte hétérogénéité des sédiments recouvrant le fond (cf. Figure 2-7 et Figure 2-8), il est illusoire d'essayer de prédire la forme et l'ampleur de l'affouillement autour de chaque structure. L'affouillement est fonction de la nature des sédiments et il sera de ce fait inégal autour de chaque fondation à Saint-Brieuc.

6.2.2 Impact régional

6.2.2.1 Effet du courant

La Figure 6-6 montre la différence entre la vitesse du courant avec et sans le projet, pour le courant de flot maximal (la phase la plus dynamique en ce qui concerne le mouvement des sédiments) pour une marée moyenne de vive-eau (coeff. 95).

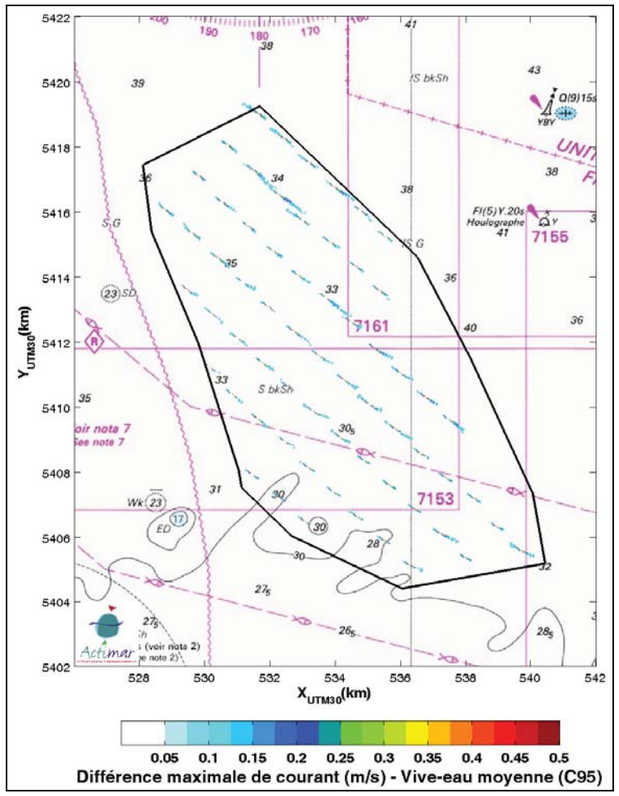


Figure 6-6 : Différence entre les vitesses maximales de courants de flot avec et sans le parc éolien, pour une marée moyenne de vive-eau (coeff. 95). Coordonnées [m] WGS84 -UTM 30N

Excepté dans certaines régions localisées où la bathymétrie accidentée entraîne des artefacts, la différence de vitesse reste inférieure à 5 cm/s à l'extérieur du parc éolien, soit moins de 1% de la vitesse du courant. L'impact régional du champ de courant sur le transport sédimentaire régional est donc insignifiant.

Un moyen d'estimer l'impact des courants est de calculer le pourcentage de temps pendant lequel le courant est suffisant pour remettre en suspension le sédiment du fond. La comparaison entre ces durées avec et sans le parc éolien donnera une indication sur l'impact de la modification des courants. Le seuil de remise en suspension dépend fortement de la nature du sédiment. Il est donc impossible de définir avec précision un tel paramètre à l'échelle du parc. Nous pouvons cependant l'approcher pour les sédiments les plus fins en utilisant les paramètres théoriques présentés au chapitre 2. On peut ainsi retenir un seuil de 1 m/s pour le déplacement des sédiments les plus fins. En moyenne sur l'emprise du parc, la durée pendant laquelle le sédiment est susceptible d'être remobilisé au cours d'un cycle de marée diminue de **3,7%** avec la présence du parc. Cette modification n'est pas significative à l'échelle de la Baie de Saint-Brieuc et au vu de la nature des sédiments du fond.

6.2.2.2 Effet des vagues

Les simulations sur les propagations des états de mer avec et sans le projet du parc éolien a montré que l'impact des éoliennes sur la hauteur des vagues était inférieur à 3.1% à 2 km de la limite du parc (voir § 4.2.3.1) et insignifiant près de la côte (de l'ordre de 1.5% ou moins)

Cette diminution est plus faible que les différences liées à la variabilité interannuelle du climat des vagues estimée à 5.9% à partir des données d'hindcast sur les états de mer : il n'y aura donc pas d'impact significatif dans la zone côtière.

6.3 RESUME

Les impacts de la construction et de l'exploitation d'un parc éolien dans la Baie de Saint-Brieuc ont été étudiés dans ce rapport. Après une description des conditions initiales, les impacts sur la propagation des vagues et sur les courants ont été calculés. Les résultats ont été utilisés avec une approche théorique pour prédire l'impact de l'exploitation sur le comportement des sédiments de la région.

D'un point de vue hydrodynamique, les principales conclusions de l'étude sont les suivantes:

- Le comportement hydrodynamique autour des fondations se caractérise à partir du paramètre de diffraction et du nombre de Keulegan-Carpenter (§ 4.1.1). La diffraction pourrait provoquer la déformation et l'incurvation des lignes de crête au passage d'un obstacle. Mais le calcul de ces paramètres pour l'ensemble des états de mer présents dans la Baie de Saint-Brieuc montrent que, pour les structures de type Jacket, le régime d'écoulement est caractéristique d'un «régime de cylindre mince», sans diffraction des vagues, c'est-à-dire sans modification de leur longueur d'onde ni de leur direction. La diffraction et ses effets de déformation du champ de vagues seront donc négligeable. A l'échelle régionale, les principales perturbations des états de mer sont dues aux effets de masquage des fondations qui dissipent une partie de l'énergie des vagues. En aval du parc, le paramètre d'états de mer principalement affecté par ces effets de masquage est la hauteur des vagues. La diminution de la hauteur des vagues due à l'effet de masque est évaluée par modélisation numérique ; elle est de l'ordre de 3% à 2 km du parc. Cette diminution est plus faible que les différences liées à la variabilité interannuelle du climat des vagues.
- Les résultats du modèle de courant mettent en évidence une réduction de la vitesse du courant de marée en aval des aérogénérateurs. La modification des courants n'est pas significative en-dehors de la zone du parc (la réduction de la vitesse étant inférieure à 2%).

D'un point de vue sédimentaire, les principaux résultats sont les suivants:

- Les vagues et les courants ne causent pas de fortes modifications du fond marin : pas d'érosion ou d'accumulation de sable par rapport à la situation actuelle
- Cette situation n'est pas susceptible d'évoluer avec le parc éolien : les légères modifications dans la distribution régionale des vagues et des courants ne sont pas suffisantes pour provoquer des impacts conséquents.

L'étude menée décrit le milieu physique et le projet tels que définis au moment de la réalisation de l'étude. Les conclusions qui en sont tirées peuvent être amenées à évoluer avec

les modifications apportées au projet. Toutefois, l'optimisation du placement des éoliennes (micro-sitting) ou l'installation d'un mât pour de la mesure météorologique ne sont pas susceptibles de modifier à eux seuls les conclusions de l'étude.

7 REFERENCES

Actimar. (2013). Projet éolien en mer de la Baie de Saint-Brieuc. Etude d'impact hydro-dynamique et sédimentaire. Rapport MOC-0603-1 FR.

Réf. 1 : Actimar. (2014). Saint-Brieuc wind farm project. Metocean study - phase 3.

Réf. 2 : Saint-Brieuc Offshore Wind Farm – Geophysical, Hydrographic and Benthic Offshore Survey G-TEC S.A. (2013)

Réf. 3 : Van Rijn L.C. (1993) - "Principles of sediment transport in estuaries and coastal seas". Aqua Publications, Amsterdam, the Netherlands.

Réf. 4 : Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France (Manche et Atlantique), 2012, SHOM-Cetmef

Réf. 5 : Violeau D., Projet Discobole, Bilan de l'année 2004 à 2006, (2007), rapport EDF R&D n°H-P74-2007-01181-FR

Réf. 6 : Ardhuin, F., L. Marié, N. Rascle, P. Forget, and A. Roland **(**2009**),** "Observation and estimation of Lagrangian, Stokes and Eulerian currents induced by wind and waves at the sea surface," *JPO*, 39(11), 2820—2838.

Réf. 7 : L.C.H.F. (1987) - « Catalogue sédimentologique des côtes françaises. Côtes de la Manche et de l'Atlantique, de la baie du Mont-St-Michel à la frontière espagnole ». Collection de la Direction des Études et Recherches d'Électricité de France. N° 65. Eyrolles.

Réf. 8 : Le Normant C., Marcos F. (1999) – « Estuaire de la Rance – Synthèse des données naturelles ». Rapport EDF/LNH HE-42/99.01.

Réf. 9 : LE ROY R., SIMON B. (2003). Réalisation et validation d'un modèle de marée en Manche et dans le Golfe de Gascogne. Application à la réalisation d'un nouveau programme de réduction des sondages bathymétriques. Rapport SHOM n°002/03.

Réf. 10 : Les courants de marée des côtes de France (Manche/Atlantique) – SHOM Edition 2005

Réf. 11 : Sumer B.M, Fredsoe J. (2006). "Hydrodynamics around cylindrical structures". World Scientific, ISBN 981-270-039-0.

Réf. 12 : OPTIMER, Latteux B. (2002) – « Commune de St-Cast Le Guildo. Extension du port. Synthèse sur la dynamique sédimentaire ». Rapport OPTIMER N° 02.18

Réf. 13 : Haddorp R. (2005). Predictability of Scour at Large Piles due to Waves and Currents. Diploma Thesis. Delft University of Technology.

Réf. 14 : Sumer B.M, Fredsoe J. (2002). "The mechanics of scour in the marine environment". World Scientific, ISBN 981-02-4930-6.

Réf. 15 : Isaacson M. (1979). Wave-induced forces in the diffraction regime. In. Mechanics of Wave-Induced Forces on Cylinder (Ed. T.L. Shaw). Pitman Advanced Publishing Program, pp. 68-89.

Réf. 16 : Hoffmans G.J.C.M., Verheij H.J. (1997). "Scour Manual", Rotterdam.

Réf. 17 : Coastal Engineering Manual (2003). EM 1110-2-1100 (Part VI). Chapter 5, pp. 242-245

Réf. 18 : Miche, R. (1954). Mouvements ondulatoires des mers en profondeur constante ou decroissante, University of California, Berkeley, Wave Res. Lab., Series 3, Issue 363

Réf. 19 : Whitehouse R. (1998) – « Scour at marine structure - A manual for practical applications ».Thomas Telford, 198 pp.

Réf. 20 : Saito, E., Sato, S., Shibayama, T. (1990): "Local Scour around a Large Circular Cylinder due to Wave Action". Proc. 22nd Int Conf. Coastal Engineering, Delft, Netherlands, Chapter 134

Réf. 21 : Ferrant P., Malenica S., Molin B. (1999). Nonlinear wave loads and runup on a vertical cylinder. Nonlinear water wave interaction. Ed. O. Mahrenholtz & M. Makiewicz. Pp. 101-135. WIT Press.

Réf. 22 : Offshore Center Danmark (2006). Offshore Wind Turbines situated in Areas with strong Currents. Doc. N°. 6004RE01ER1.

Réf. 23 : Rainey R.C.T., Chaplin J.R. (2003). Wave breaking and cavitation around vertical cylinder: experiments and linear theory. Proc. 18th Int. Workshop on Water Waves and Floating Bodies. (Ed. A.H. Clement & P. Ferrant). London: R. Inst. Naval Architects.

Réf. 24 :Molin B., Remy F., Kimmoun O. & Jamois E. (2005). The role of tertiary wave interactions in wave-body problems. Journal of Fluid Mechanics ISSN 0022-1120

Réf. 25 : De Vos, L, Frigaard, P & De Rouck, J 2007, 'Wave Run-Up on Cylindrical and Cone Shaped Foundations for Offshore Wind Turbines' Coastal Engineering, vol 54, no. 1, pp. 17-29.

Réf. 26 : DHI (1999). Horns Rev Wind Power Plant. Environmental impact assessment of hydrography.

Réf. 27 : Sumer B.M., Fredsøe J. and Christiansen N. (1992) – « Scour around vertical piles in waves ». Proc. Am. Soc. Civ. Engrs, J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Engng, 118 (1), pp. 15-31.

Réf. 28 : Angus N.M., Moore R.L. (1982) – « Scour repair methods in the Southern North Sea ». Proc.14th Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 3-6, 1982, Paper N° 4410, pp. 385-399

Réf. 29 : Soulsby R. (1997) – « Dynamics of marine sands. HR Wallingford ». Thomas Telford Publications.

Réf. 30 : Eadie R.W.IV, Herbich J.B. (1986) – « Scour about a single, cylindrical pile due to combined random waves and current ». Proc. 20th ICCE, Taipei, Taiwan, ASCE, Vol 3, pp 1858-1870.

Réf. 31 : Sumer B.M., Fredsøe J. (2006). "Hydrodynamics around cylindrical structures". World Scientific, ISBN 981-270-039-0

Réf. 32 : OWEC TOWER AS (2009) – « OWEC Jacket Quattopod – Saint-Brieuc - Basic Design ».

Réf. 33 : Keith Philpott Consulting Limited with Acres Consulting Services Limited (1986) – « Scour around seafloor structures ». Environmental Studies Revolving Funds Report 017. Ottawa. 249 p.

Réf. 34 : Sybert J.H. (1963) – « Foundation scour and remedial measures for off-shore platforms. » Paper SPE 485, 1st Conf. Drilling and Rock Mechanics, Austin, Texas.

Réf. 35 : Rudolph D., Bos K.J., Luijendijk A.P., Rietema K., Out J.M.M. (2004) – « Scour around offshore structures – analysis of field measurements ». 2nd International Conference on Scour and Erosion, Chiew, Lim and Cheng (Eds), Singapore, pp. 400-407.

Réf. 36 : Bolle A., de Winter J., Goossens W., Haerens P., Dewaele G. (2012) – « Scour monitoring around offshore jackets and gravity based foundations ». 6th International Conference on Scour and Erosion (ICSE6), Paris, August 27-31.

8 ANNEXE A – RESULTAT DES SIMULATIONS NUMERIQUES EN ETAT PROJET

8.1 ECHELLE REGIONALE

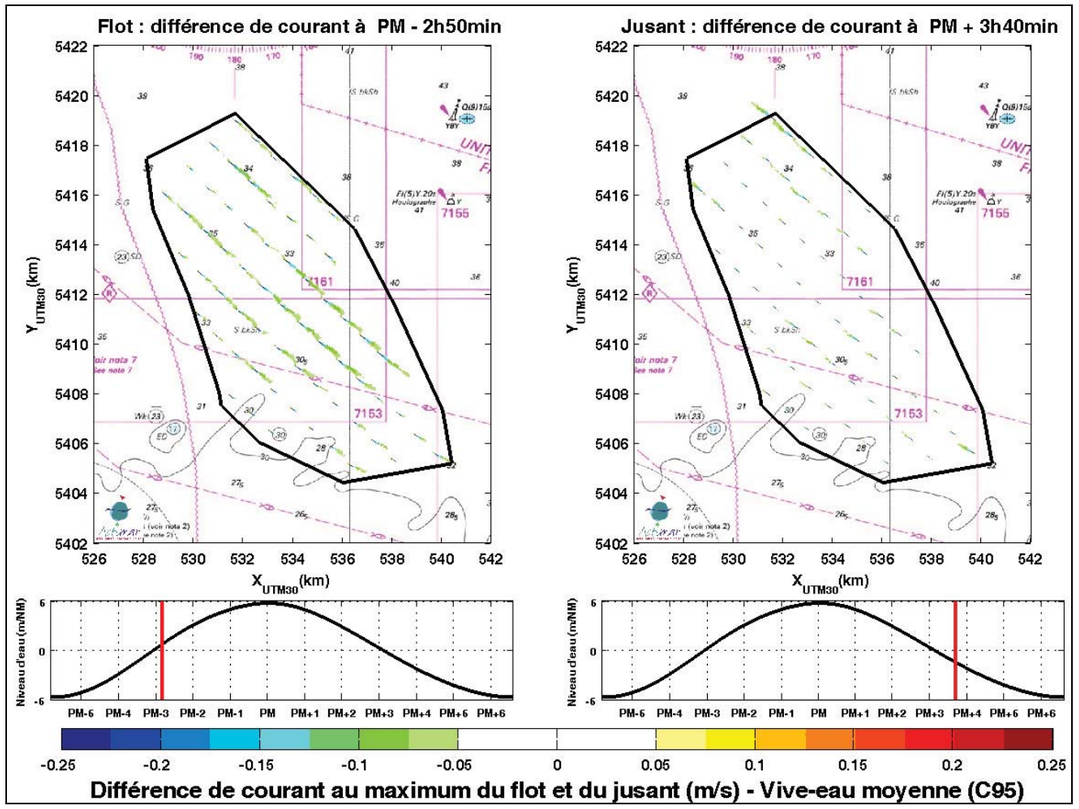


Figure 8-1 : Ecart instantané de vitesses de flot (à gauche) et de jusant (à droite), en m/s, à l'échelle du parc éolien. Coordonnées WGS84 - UTM30N – Marée moyenne de vive-eau (C95)

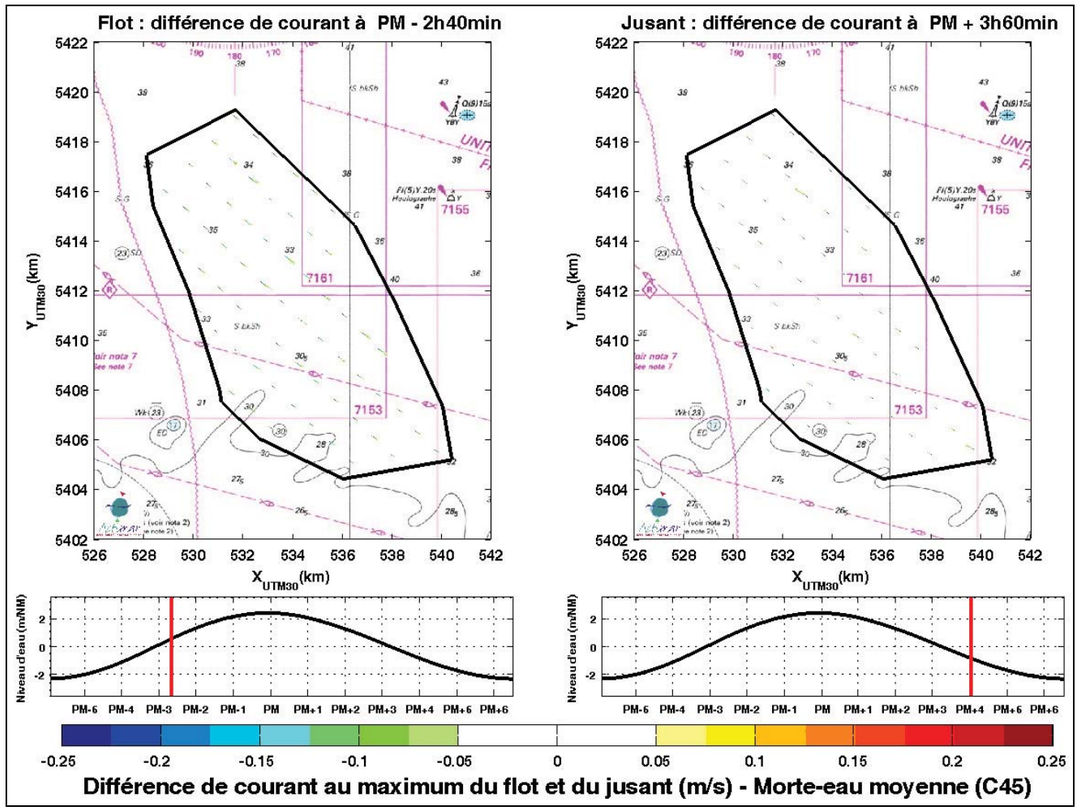


Figure 8-2 : Ecart instantané de vitesses de flot (à gauche) et de jusant (à droite), en m/s, à l'échelle du parc éolien. Coordonnées WGS84 - UTM30N – Marée moyenne de morte-eau (C45)

8.2 ECHELLE LOCALE

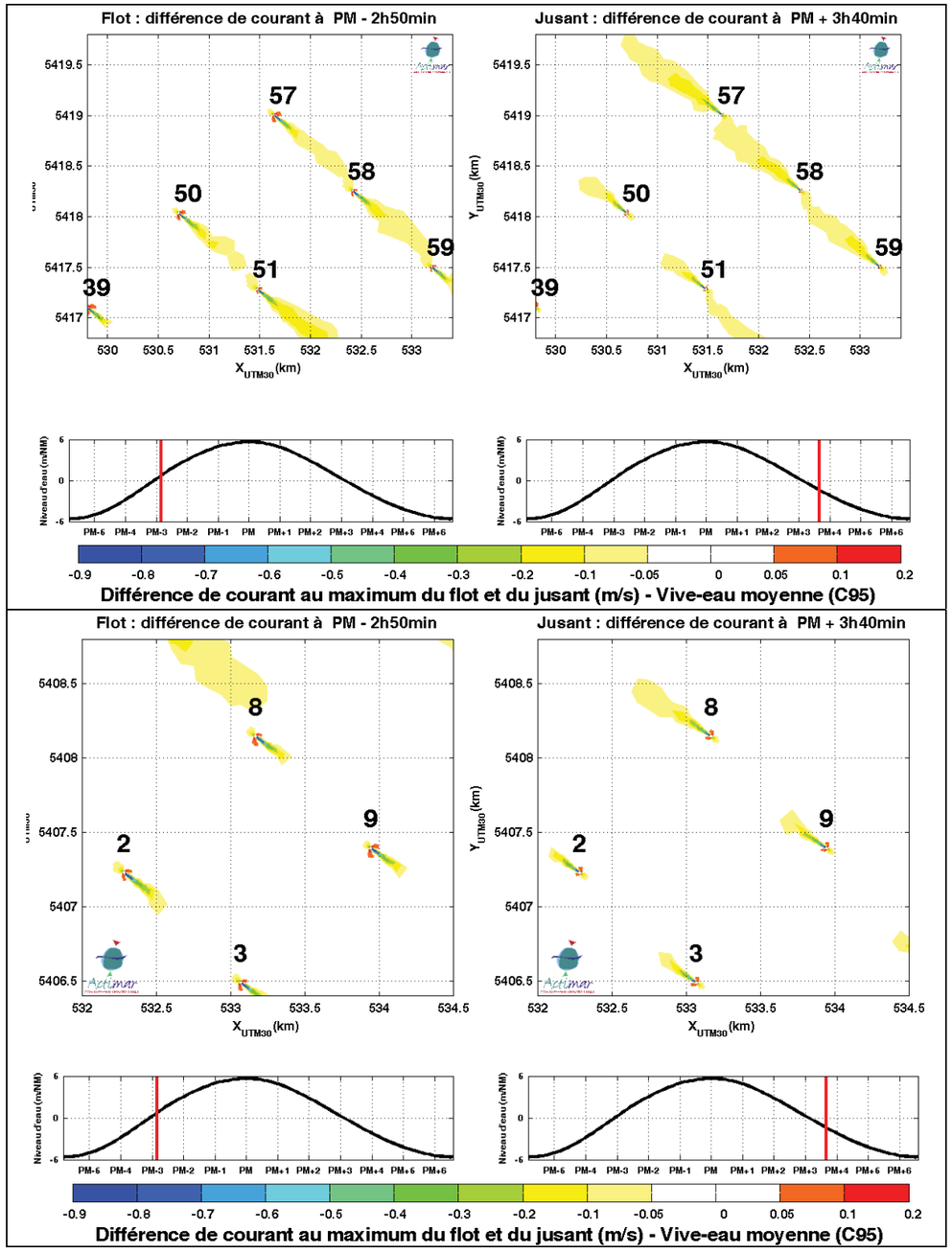


Figure 8-3 : Différence instantanée de la vitesse du courant pour le flot (à gauche) et pour le jusant (à droite), en m/s, pour des fondations situées au nord (en haut) et au sud-ouest (en bas) du parc. Coordonnées WGS84 - UTM30N – Marée moyenne de vive-eau (C95)

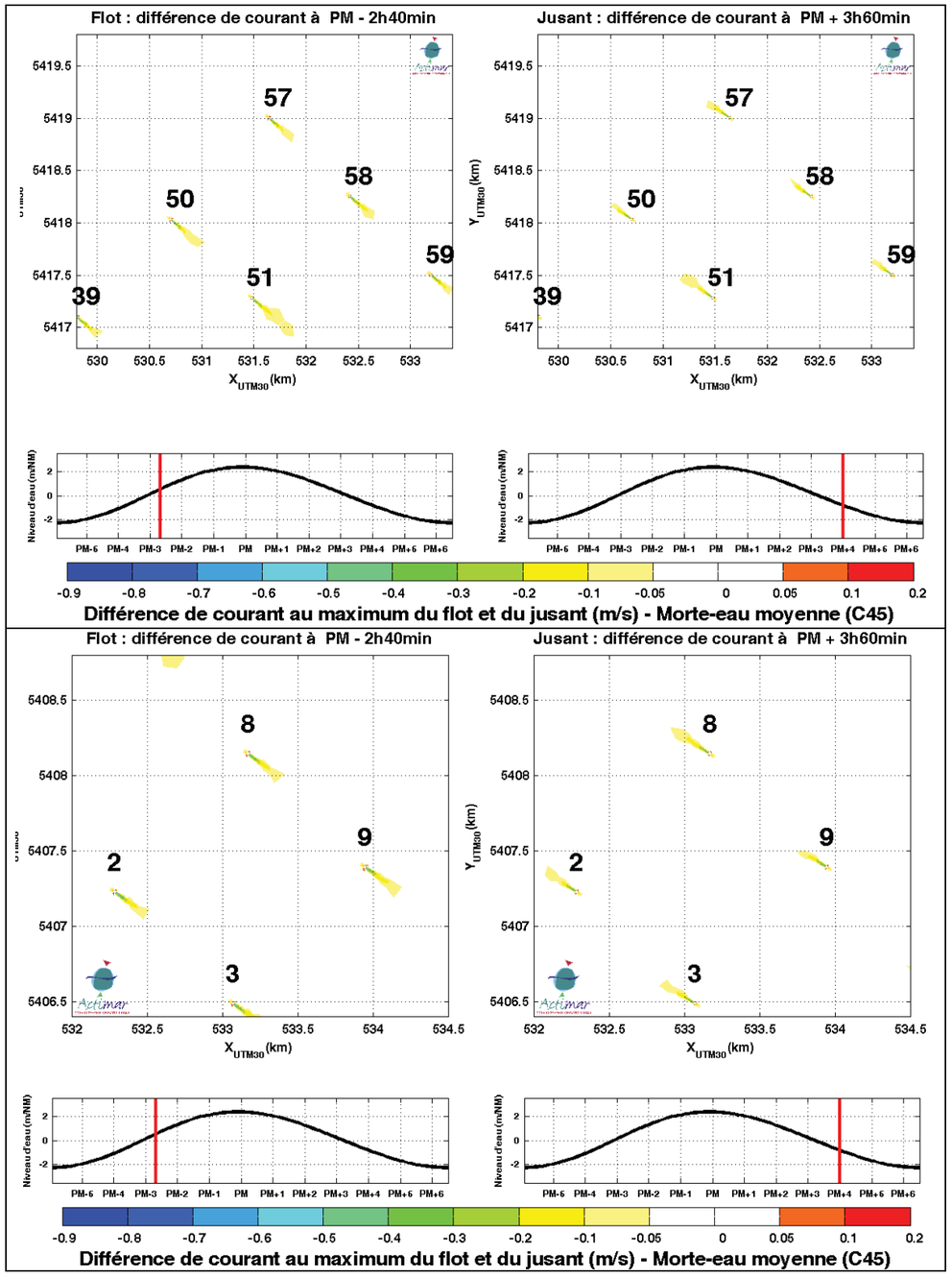


Figure 8-4 : Différence instantanée de la vitesse du courant pour le flot (à gauche) et pour le jusant (à droite), en m/s, pour des fondations situées au nord (en haut) et au sud-ouest (en bas) du parc. Coordonnées WGS84 - UTM30N – Marée moyenne de morte-eau (C45)

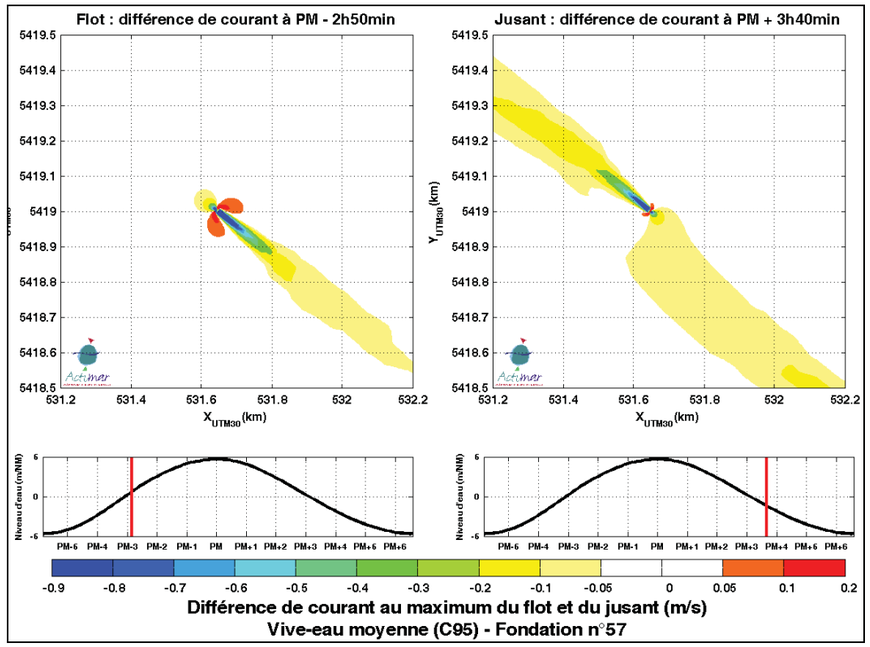


Figure 8-5 : Différence instantanée de la vitesse du courant pour le flot (à gauche) et pour le jusant (à droite), en m/s, pour la fondation n°57 située à l'extrémité nord du parc. Coordonnées WGS84 - UTM30N – Marée moyenne de vive-eau (C95)

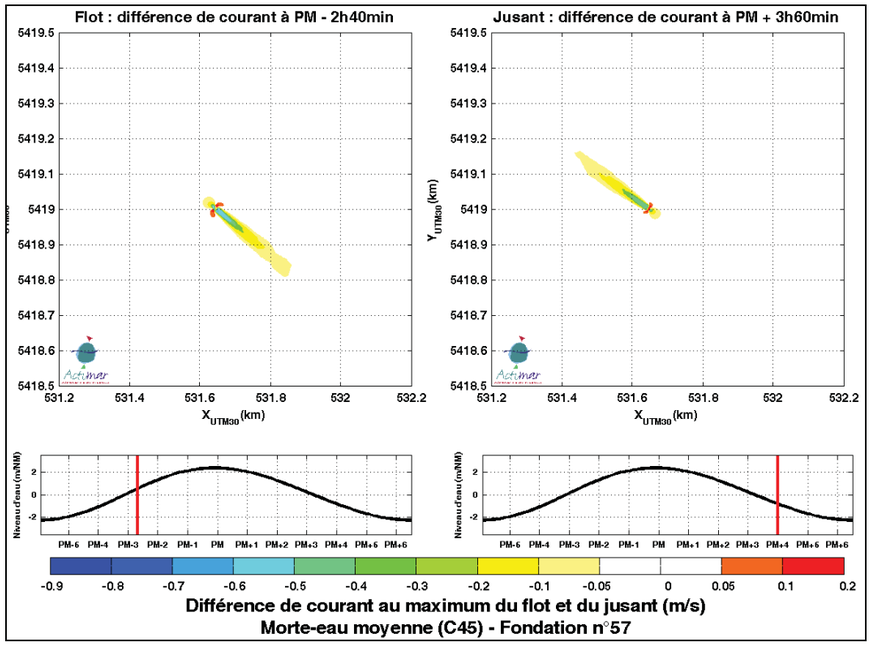


Figure 8-6 : Différence instantanée de la vitesse du courant pour le flot (à gauche) et pour le jusant (à droite), en m/s, pour la fondation n°57 située à l'extrémité nord du parc. Coordonnées WGS84 - UTM30N – Marée moyenne de morte-eau (C45)

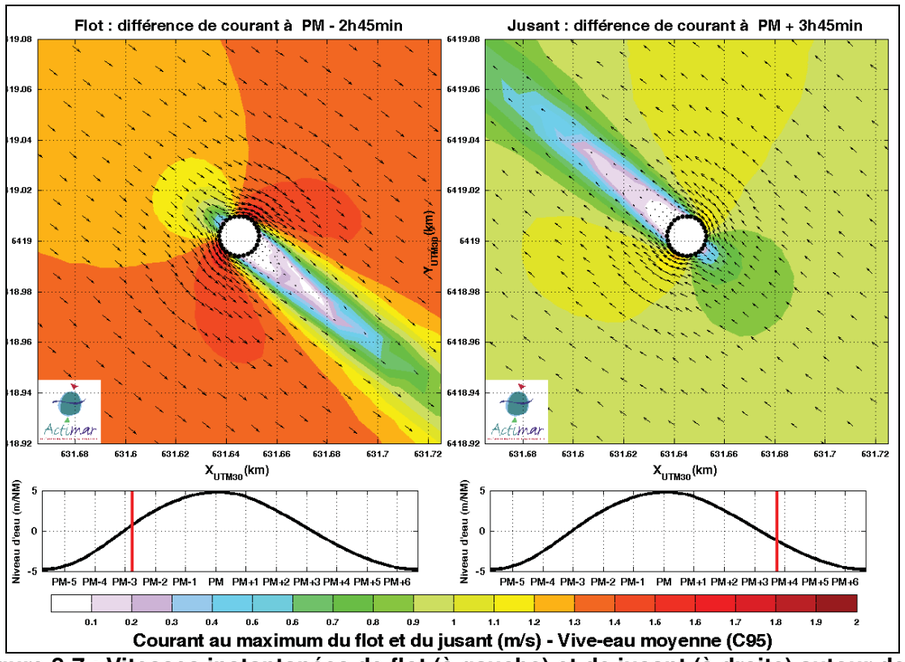


Figure 8-7 : Vitesses instantanées de flot (à gauche) et de jusant (à droite) autour de la fondation n°57, pendant une marée moyenne de vive-eau (coefficient de marée 95). Coordonnées WGS84 - UTM30N

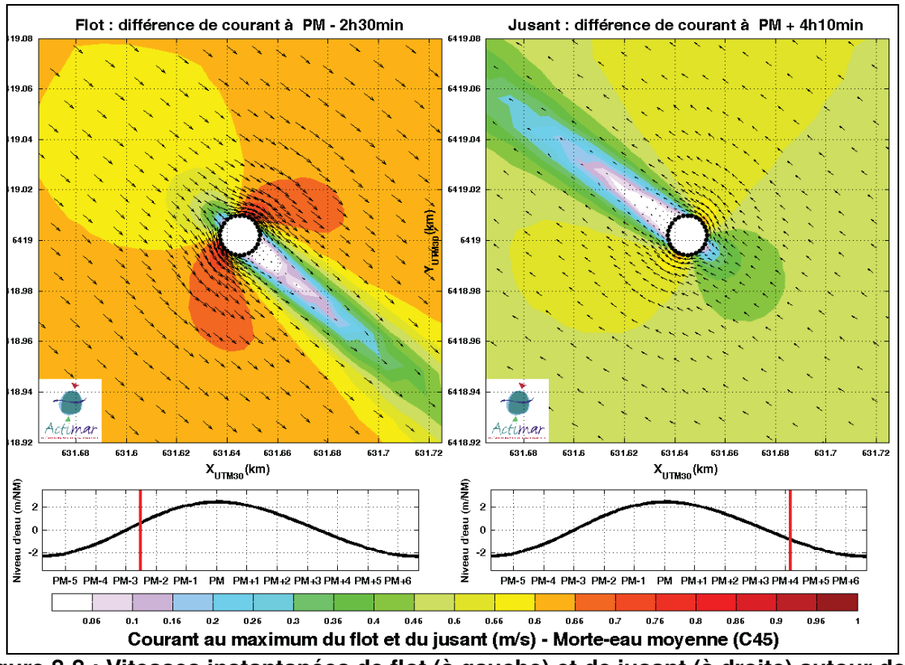


Figure 8-8 : Vitesses instantanées de flot (à gauche) et de jusant (à droite) autour de la fondation n°57, pendant une marée moyenne de morte-eau (coefficient de marée 45). Coordonnées WGS84 - UTM30N

9 ANNEXE B – PROPAGATION DES VAGUES EN CONDITIONS ACTUELLES

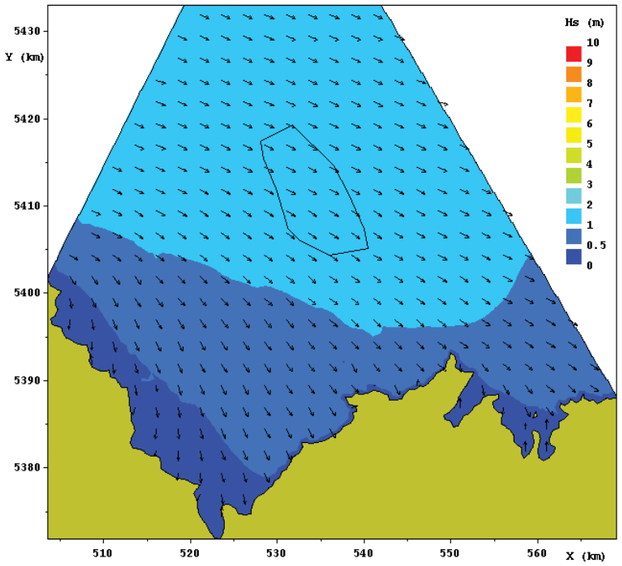


Figure 9-1 : Evolution spatiale des états de mer en conditions actuelles.
Condition moyenne en incidence ouest-nord-ouest : Hs = 1.3 m / Tp = 12.5 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N.

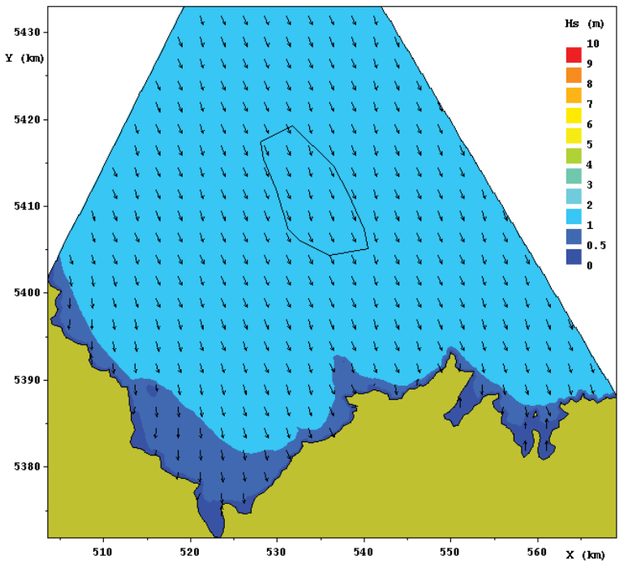


Figure 9-2 : Evolution spatiale des états de mer en conditions actuelles.
Condition moyenne en incidence nord-nord-ouest : Hs = 1.5 m / Tp = 5.5 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N.

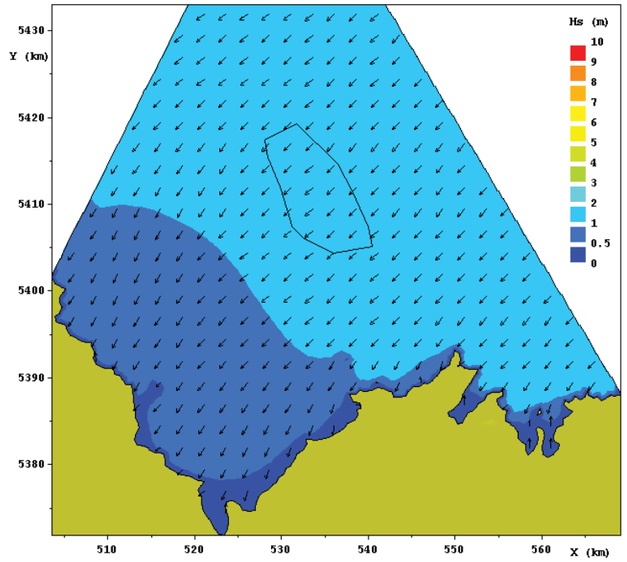


Figure 9-3 : Evolution spatiale des états de mer en conditions actuelles.
Condition moyenne en incidence nord-est: Hs = 1.2 m / Tp = 4.5 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N.

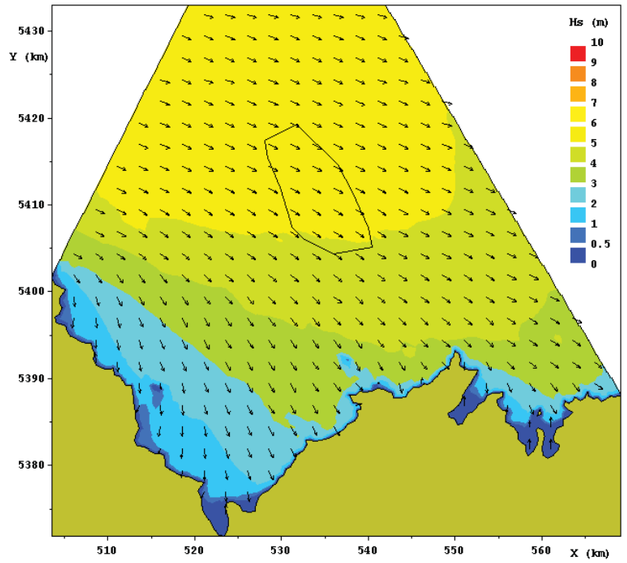


Figure 9-4 : Evolution spatiale des états de mer en conditions actuelles.
Condition extrême 1 an en incidence ouest-nord-ouest : Hs = 5.6 m / Tp = 15 s.
Coordonnées WGS84 - UTM 30 N.

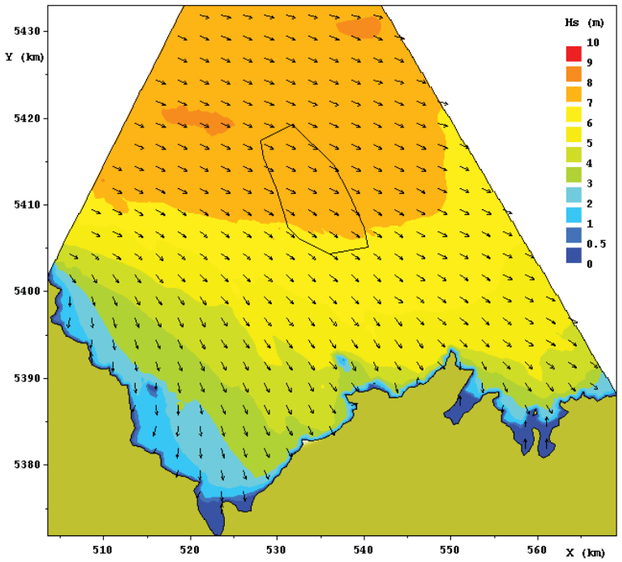


Figure 9-5 : Evolution spatiale des états de mer en conditions actuelles.
Condition extrême 10 ans en incidence ouest-nord-ouest : Hs = 7.8 m / Tp = 17.7 s.
Coordonnées WGS84 - UTM 30 N.

10 ANNEXE C – IMPACT DU PROJET SUR LES VAGUES

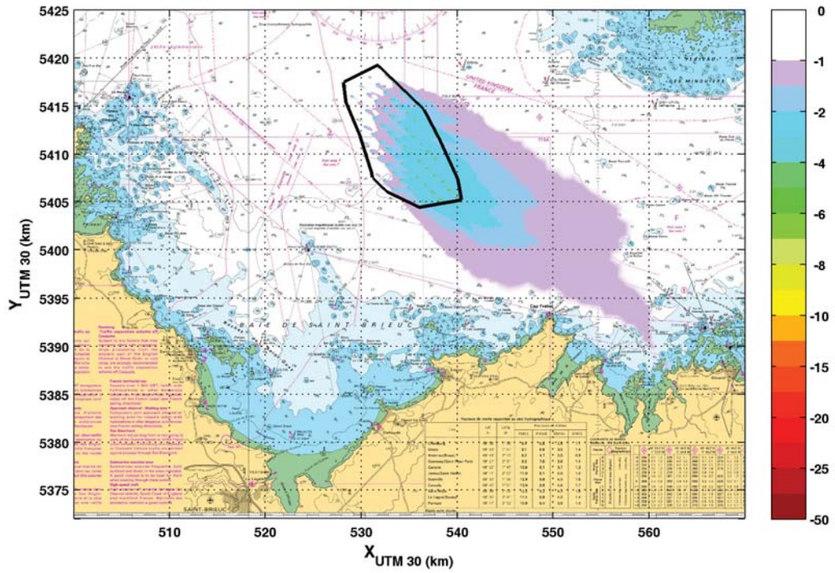


Figure 10-1 : Différence relative de la hauteur significative (%).
Condition moyenne en incidence ouest-nord-ouest : Hs = 1.3 m / Tp = 12.5 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N

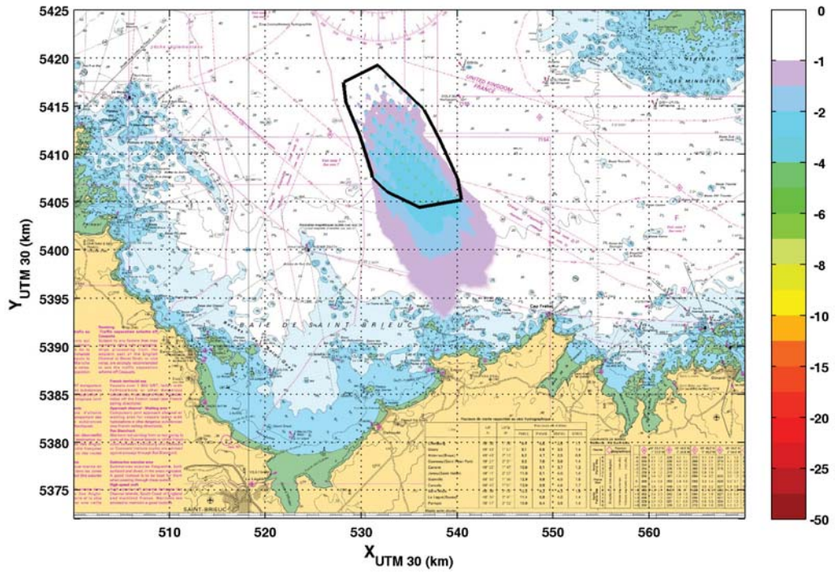


Figure 10-2 : Différence relative de la hauteur significative (%).
Condition moyenne en incidence nord-nord-ouest : Hs = 1.5 m / Tp = 5.5 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N

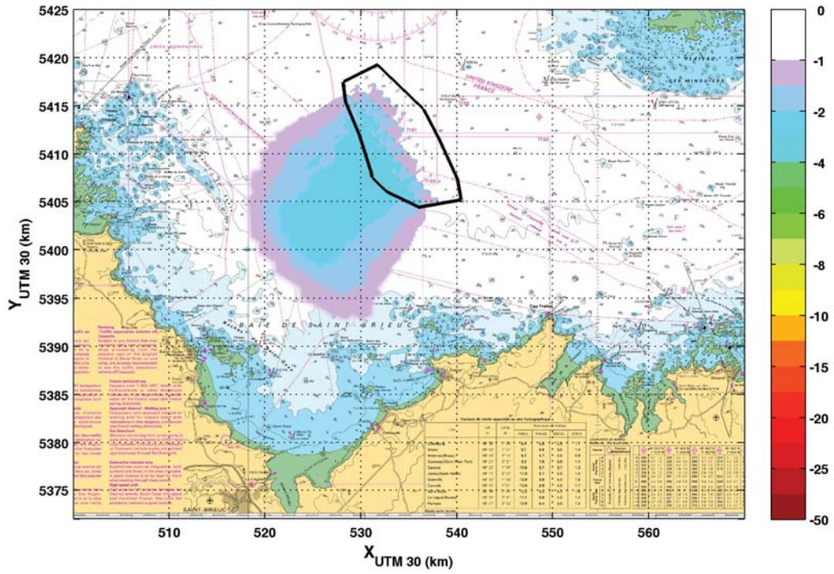


Figure 10-3 : Différence relative de la hauteur significative (%).
Condition moyenne en incidence nord-est : Hs = 1.2 m / Tp = 4.5 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N

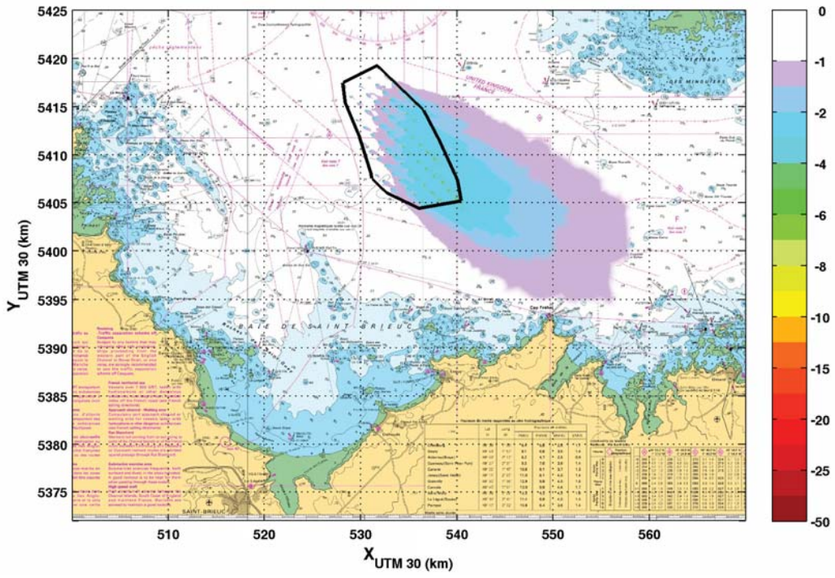


Figure 10-4 : Différence relative de la hauteur significative (%).
Condition extrême 1 an en incidence ouest-nord-ouest : Hs = 5.6 m / Tp = 15 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N

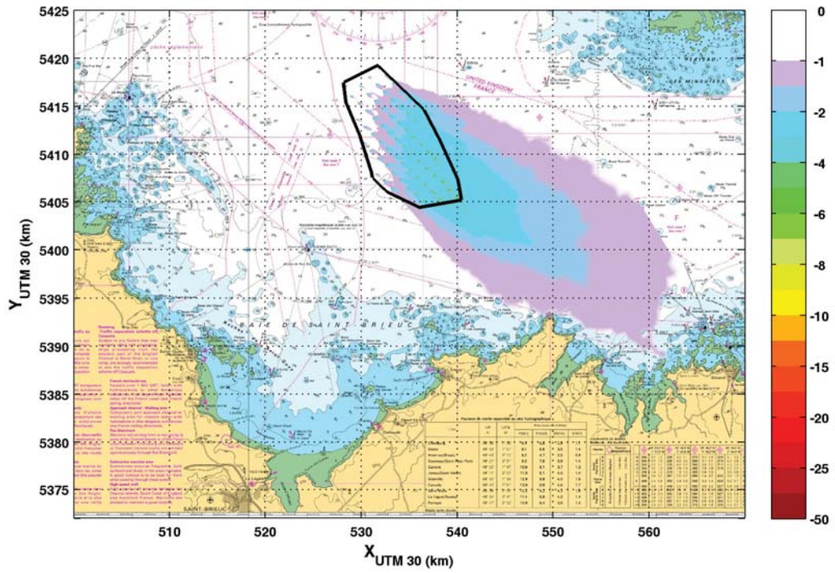


Figure 10-5 : Différence relative de la hauteur significative (%).
Condition extrême 10 ans en incidence ouest-nord-ouest : Hs = 7.8 m / Tp = 17.7 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N

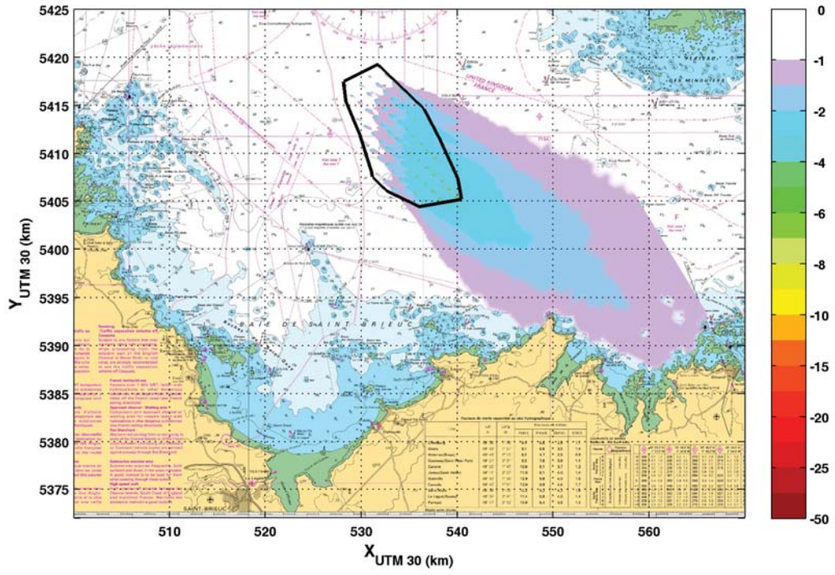


Figure 10-6 : Différence relative de la hauteur significative (%).
Condition extrême 100 ans en incidence ouest-nord-ouest : Hs = 10.0 m / Tp = 20.1 s.
Coordonnées WGS84 - UTM30N

Fin du rapport