



**SYNTHESE DE L'ETUDE 2009 - ANALYSE DES IMPACTS  
HYDROSEDIMENTAIRES DU PROJET DE PARC EOLIEN EN  
MER EN BAIE DE SEINE**

Rapport Définitif

<b>EOLIENNES OFFSHORE DU CALVADOS</b>	<b>RAPPORT MOC N° 0732</b>	<b>Rév. 1.0</b>	<b>13/03/2013</b>
---------------------------------------	----------------------------	-----------------	-------------------

## Liste de diffusion

Sociétés	Destinataires
Eoliennes Offshore du Calvados	Maxime Planque David Lemarquis Cécile Chapelle Antoine Monteillet

## Suivi des modifications

Rev.	Date	Auteurs	Vérifié par	Notes
1.0	25/02/2013	<a href="mailto:leballeur@actimar.fr">leballeur@actimar.fr</a> <a href="mailto:bernard.latteux@wanadoo.fr">bernard.latteux@wanadoo.fr</a> <a href="mailto:girard@actimar.fr">girard@actimar.fr</a>		

# SOMMAIRE

<b>PREAMBULE .....</b>	<b>1</b>
<b>1 INTRODUCTION.....</b>	<b>2</b>
<b>2 ETAT INITIAL – LES DONNÉES NATURELLES .....</b>	<b>3</b>
2.1 BATHYMÉTRIE ET MORPHOLOGIE .....	3
2.2 NATURE DES FONDS .....	3
2.2.1 Nature des sédiments superficiels .....	3
2.2.2 Epaisseur de sédiments .....	4
2.3 PARAMÈTRES MÉTÉO-OCÉANIQUE .....	5
2.3.1 Le niveau de la mer .....	5
2.3.2 La houle et les clapots .....	5
➤ La houle au large .....	5
➤ La houle dans le secteur du projet.....	6
➤ La houle dans le voisinage de l’atterrage .....	6
2.3.3 Le courant .....	7
2.3.4 Hydrologie .....	9
➤ Les débits liquides .....	9
➤ Les débits solides.....	9
➤ Concentration en matière en suspension.....	9
<b>3 IMPACT HYDRODYNAMIQUE .....</b>	<b>10</b>
3.4 MÉTHODOLOGIE .....	10
3.5 DESCRIPTION DU MODÈLE HYDRODYNAMIQUE .....	10
3.6 MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE EN CONDITIONS NATURELLES .....	11
3.7 MODÉLISATION HYDRODYNAMIQUE AVEC LES FONDATIONS GRAVITAIRES .....	12
3.7.1 Analyse de l’impact régional.....	12

3.7.2	Analyse des impacts locaux, aux abords des fondations .....	13
3.8	CAS DES FONDATIONS JACKETS .....	14
<b>4</b>	<b>IMPACT DES FONDATIONS SUR LES ÉTATS DE MER.....</b>	<b>15</b>
4.9	INTERACTIONS ENTRE LES VAGUES INCIDENTES ET LES FONDATIONS .....	15
4.9.1	Processus hydrodynamiques .....	15
4.9.2	Effets non linéaires au sein des interactions houle/structure, run-up .....	16
4.9.3	Influence du déferlement des vagues sur les risques d'affouillement .....	17
4.10	APPLICATION AU SITE DU PARC ÉOLIEN DE LA BAIE DE SEINE.....	17
4.10.1	Impact du parc éolien sur les états de mer à l'échelle régionale .....	17
4.10.2	Impact sur les vagues au voisinage des fondations .....	18
<b>5</b>	<b>ETUDE D'IMPACT SÉDIMENTAIRE .....</b>	<b>19</b>
5.1	EVOLUTION DU LITTORAL ET DES FONDS MARINS .....	19
5.1.1	Aménagement et évolution du littoral (Courseulles-sur-Mer) .....	19
5.1.1.1	Le littoral et le cours de la Seulles .....	19
5.1.1.2	Les ouvrages de défense de plage .....	20
5.1.1.3	L'évolution du littoral .....	20
5.1.1.4	L'évolution de la plage et des petits fonds dans la zone d'atterrage .....	21
5.1.1.4.1	Les levés .....	21
5.1.1.4.2	Comparaison des levés – évolution de la plage à court et moyen terme .....	21
5.1.2	Evolution des fonds le long de la route pressentie du câble et dans le secteur du parc éolien .....	22
5.1.2.1.1	Le long de la route du câble.....	22
5.1.2.1.2	Dans le secteur du parc éolien.....	24
5.2	ANALYSE DE LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE ET PERSPECTIVES D'ÉVOLUTION ULTÉRIEURE .....	25
5.2.1	Secteur littoral .....	25
5.2.2	Le long du tracé pressenti du câble et dans le secteur du parc éolien .....	25
5.3	SIMULATION NUMÉRIQUE .....	26
5.3.1	Description du modèle et méthodologie de l'étude .....	26
5.3.2	Résultats des simulations .....	27
5.3.2.1	Simulations en conditions naturelles.....	27
5.3.2.2	Simulations avec ouvrages.....	28
5.3.2.2.1	Impacts régionaux.....	28
5.3.2.2.2	Impacts locaux, abords des fondations.....	29
5.3.3	Discussion et synthèse.....	31
5.4	INTERACTION ENTRE LE PROJET ET LES FONDS MARINS – PROTECTIONS ENVISAGEABLES.....	32
5.4.1	Caractéristiques du projet.....	32
5.4.2	Impact sédimentaire et aperçu des moyens de protection anti-affouillement.....	32
5.4.2.1	À proximité immédiate des fondations .....	32

5.4.2.1.1	Mécanismes d'affouillement.....	32
5.4.2.1.2	Caractéristiques de l'affouillement .....	33
5.4.2.1.3	Esquisse des moyens de protection contre l'affouillement.....	35
5.4.2.1.4	Examen des risques potentiels selon la localisation des éoliennes.....	36
5.4.2.2	A distance des fondations .....	37
5.4.2.2.1	Effet du courant .....	37
5.4.2.2.2	Effet de la houle.....	37
5.4.2.3	Protection du câble .....	37
<b>6</b>	<b>SYNTHÈSE ET CONCLUSION.....</b>	<b>38</b>
	<b>BIBLIOGRAPHIE .....</b>	<b>39</b>

## PREAMBULE

En avril 2012, la société Éolien Maritime France (EMF) - consortium regroupant la société EDF EN France et DONG Energy Power - a été autorisée à exploiter un parc éolien localisé sur le domaine public maritime au large de Courseulles-sur-Mer. Cette autorisation fait suite à la désignation de la société EMF comme lauréat de l'appel d'offres lancé par l'État pour l'installation de parcs éoliens au large des côtes françaises. En partenariat avec wpd Offshore, EMF a créé la société de projet « Eoliennes Offshore du Calvados » pour la réalisation du projet.

Dans le cadre du Débat Public, Eoliennes Offshore du Calvados souhaite mettre à disposition de tous, les synthèses des études techniques, économiques ou environnementales, réalisées depuis l'origine du projet.

Cette étude « Analyse des impacts hydrosédimentaires du projet de parc éolien offshore en Baie de Seine » réalisée par le bureau d'études ACTIMAR, a été rédigée à partir du descriptif du projet tel qu'il était en 2009. A cette date, deux types de fondation avaient été envisagés pour supporter les éoliennes : embase gravitaire conique en béton ou jackets (structure tubulaire en treillis métallique). Cette étude porte donc sur les impacts hydrosédimentaires relatifs à ces 2 types de fondation. Depuis, le maître d'ouvrage a réalisé de nouvelles études de dimensionnement des fondations sur la base d'une campagne d'étude des caractéristiques du fond marin. Les fondations de type monopieu sont celles qui sont privilégiées par le maître d'ouvrage. Une étude des impacts hydrosédimentaires pour les fondations de type monopieu va être réalisée. A titre de comparaison, l'impact hydrosédimentaire des fondations de type embase gravitaire, eu égard à leurs dimensions et leur volume plus importants, serait supérieur à celui des fondations de type monopieu.

**L'ensemble des données décrites dans cette synthèse décrit le contexte hydrosédimentaire et analyse les impacts du projet tel qu'il était en 2009. Les conclusions qui y sont indiquées sont donc amenées à évoluer en fonction des modifications apportées au projet.**

## 1 INTRODUCTION

Actimar a réalisé en 2009, pour le compte du groupe Poweo (les études ont depuis été acquises par Eoliennes Offshore du Calvados.), une étude des impacts hydrosédimentaires du projet de parc éolien en mer au large de Courseulles-sur-Mer.

Le projet élaboré en 2009 prévoyait l'implantation d'une centrale éolienne composée de 50 turbines réparties sur 3 lignes orientées NO-SE (cf. Figure 1-1), un poste de transformation et un mât de mesures du vent. Le niveau des fonds est compris entre -22 m CM et -28 m CM. Deux types de fondations ont été envisagés pour supporter les turbines :

- Gravitaire conique reposant sur une embase de 34 m de diamètre. Le diamètre de la fondation évolue de 18 m au fond de la mer à 6.5 m de diamètre à 17 m au dessus du fond. Au dessus, se trouve un cylindre avec un diamètre moyen de 6.5 m.
- Jacket, composée de 4 jambes cylindriques légèrement obliques, de diamètre externe 0,86 m, reliées par des croisillons cylindriques de 0,56 m de diamètre et fondées sur des pieux de diamètre 1,52 m. Les jambes sont espacées de 18 à 19 m au fond se réduisant linéairement à 14 m au niveau des plus hautes mers astronomiques.

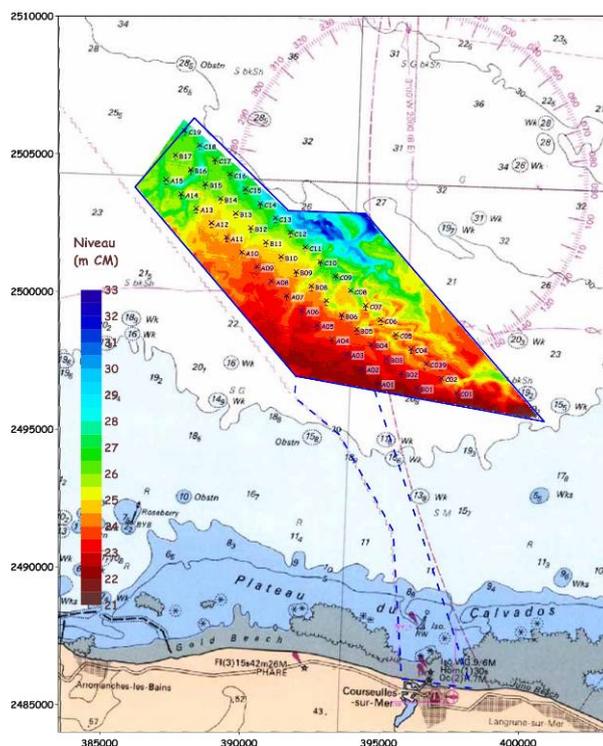


Figure 1-1 : Position et implantation de la centrale éolienne.

Les objectifs de l'étude menée en 2009 par Actimar, avec l'expertise de Bernard Latteux, visaient la caractérisation de l'état initial du milieu marin (environnement physique) et l'évaluation des impacts du projet sur l'hydrodynamisme et l'évolution sédimentaire.

## 2 ETAT INITIAL – LES DONNEES NATURELLES

Les données naturelles sont décrites succinctement ci-après. Elles sont décrites en plus amples détails dans les rapports décrivant spécifiquement ces paramètres (ACTIMAR, 2009).

### 2.1 BATHYMETRIE ET MORPHOLOGIE

Le secteur du projet se situe au Sud d’une légère dépression marquant l’ancienne vallée de la Seine. Dans ce secteur, les profondeurs sont généralement comprises entre 20 m et 30 m sous les plus basses mers. Les fonds sont réguliers, en légère pente vers le Nord.

L’atterrissage pressenti se situe sur la commune de Courseulles-sur-Mer. Le littoral y est traversé par le chenal d’accès au port, implanté sur la Seulles ; ce littoral, protégé de part et d’autre par une batterie d’épis, marque un décrochement au niveau des ouvrages de protection du chenal.

Le haut de plage est couvert de sédiments, alors que le bas de plage et les petits fonds – en très faible pente moyenne - sont essentiellement rocheux.

### 2.2 NATURE DES FONDS

#### 2.2.1 NATURE DES SEDIMENTS SUPERFICIELS

D’après la synthèse réalisée par Larsonneur et al. (1978) sur l’ensemble de la Manche, la plus grande partie de la baie de Seine est couverte de sables caillouteux (notamment dans l’emprise du projet) ou graveleux ; depuis la partie centrale, les sédiments s’affinent vers le SO (baie des Veys) et vers le SE (embouchure de la Seine).

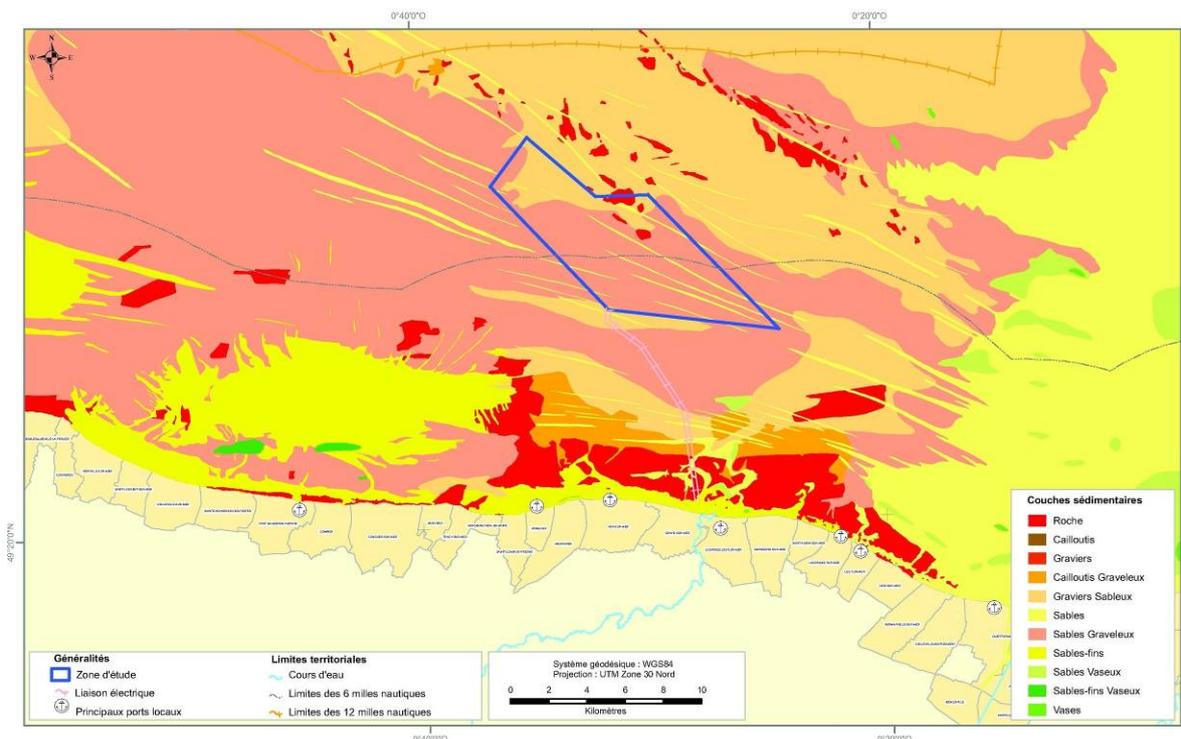


Figure 2-1 : Nature des fonds (d’après SHOM, 2005, traité par In Vivo, 2009).

La carte de nature des fonds du SHOM (2005) retraitée par In Vivo (2009) (Figure 2-1) précise cette répartition dans le secteur du projet :

- au niveau du champ d'éoliennes, les fonds sont majoritairement constitués d'un mélange de sables et de graviers, avec quelques rubans sableux orientés le plus souvent ONO-ESE ; des fonds rocheux isolés sont observés vers le Nord du secteur ;
- dans le secteur de la liaison électrique, du Nord vers le Sud, les fonds sont d'abord similaires à ceux rencontrés dans le secteur des éoliennes ; puis se présentent successivement des fonds sableux, des mélanges de cailloutis et de graviers, puis un secteur dominé par la roche, dans lequel sont tracés des sortes de chenaux sableux ou sablo-argileux ;
- dans le secteur de l'atterrissage, l'estran est composé de sables fins dans lesquels émergent des zones rocheuses, essentiellement en partie inférieure.

In Vivo a procédé en 2009 au prélèvement et à l'analyse de sédiments superficiels :

- Au niveau de la ferme éolienne, le diamètre médian est compris entre 0,5 et 3,8 mm, le plus fin au Sud-Est. Les sédiments sont très hétérogènes.
- Le long du câble, le diamètre médian est en moyenne plus fin. La proportion de graviers et de cailloutis est d'environ 35 % au Nord, et baisse à près de 13 % pour le point situé le plus au Sud.
- Sur l'estran, le sédiment est essentiellement constitué de sables, moyens en haut d'estran, fins à mi-estran, et fins à très fins en bas d'estran.

### 2.2.2 EPAISSEUR DE SEDIMENTS

Le secteur du parc éolien a fait l'objet d'une campagne de mesure d'épaisseur de sédiments meubles par In Vivo en 2009 (Figure 2-2).

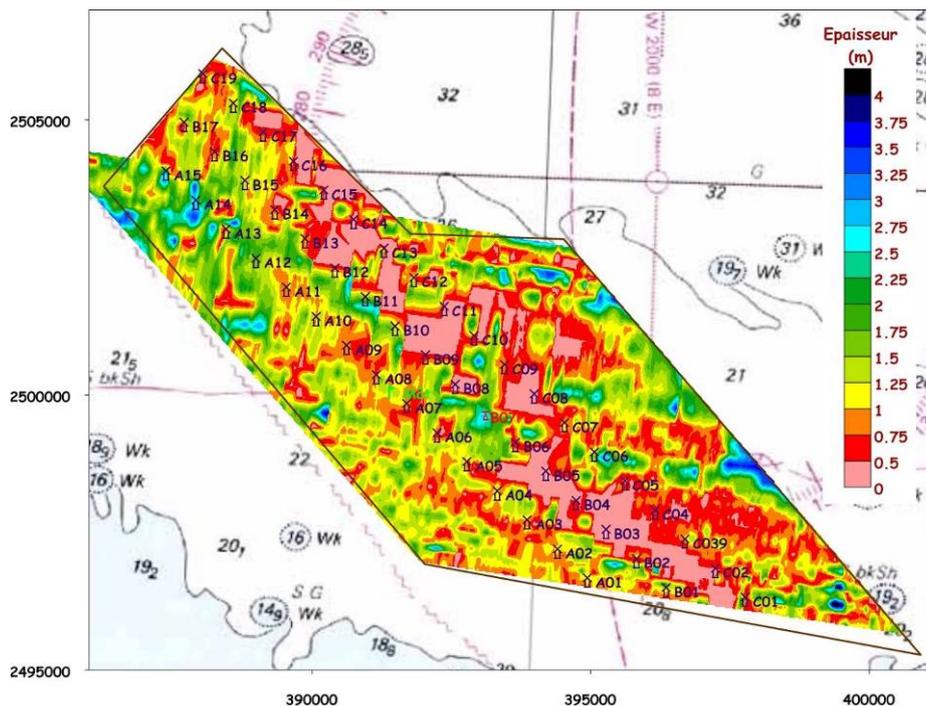


Figure 2-2 : Epaisseur de la couche sédimentaire meuble dans le secteur du parc éolien

En moyenne sur l'emprise du projet, l'épaisseur est légèrement supérieure à 1 m ; elle dépasse assez rarement 2 m. Sur la route du câble, l'épaisseur moyenne est de l'ordre du mètre ; elle ne dépasse 2 m que très ponctuellement, vers l'extrémité Nord du profil, i.e. à proximité du champ d'éoliennes.

## 2.3 PARAMETRES METEO-OCEANIQUE

### 2.3.1 LE NIVEAU DE LA MER

Le Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM) fournit les niveaux caractéristiques de la marée dans les différents ports du secteur. Le tableau 2.1 synthétise cette information, en rapportant ces différents niveaux au zéro hydrographique (0 CM).

Niveaux	Ouistreham	Courseulles	Arromanches
Plus haute mer astronomique (PHMA)	8,12	7,95	7,89
Pleine mer de vive-eau moyenne (PMVE)	7,60	7,40	7,30
Pleine mer de morte-eau moyenne (PMME)	6,30	6,15	6,00
Basse mer de morte-eau moyenne (BMME)	2,60	2,70	2,60
Basse mer de vive-eau moyenne (BMVE)	0,95	1,10	1,05
Plus basse mer astronomique (PBMA)	0,05	0,27	0,24
Marnage astronomique	8.07	7.68	7.65
Cote du zéro hydrographique	-4.08	-3.99	-4.02

**Tableau 2-1 : Niveaux caractéristiques de la marée dans le voisinage du projet, d'après le SHOM**

L'estimation des niveaux extrêmes, dus à la combinaison des marées et des surcotes, a été réalisée sur l'ensemble des côtes françaises du Sud de la Mer du Nord, de la Manche et de l'Atlantique par B. Simon (1994). En 2008, le SHOM et le CETMEF ont actualisé et complété l'étude à partir d'observations marégraphiques de longues durées réalisées dans différents ports le long des côtes françaises. Le niveau extrême centennal sur le parc éolien de Courseulles-sur-Mer est de l'ordre de 4,10 à 4,25 m /IGN69, soit environ 30 à 50 cm au-dessus du niveau des plus hautes mers astronomiques.

### 2.3.2 LA HOULE ET LES CLAPOTS

#### ➤ La houle au large

Les perturbations et les houles les plus sévères proviennent essentiellement de l'Ouest. La forme de la côte protège la baie de Seine de l'action directe des ces perturbations ; compte tenu des fetchs plus limités et des vents plus faibles selon les autres provenances marines (NNO à NE-Est), ce secteur s'avère soumis à une agitation plutôt modérée.

La base de données reconstituées ANEMOC (EDF-LNHE, CETMEF, FR) permet d'évaluer les caractéristiques statistiques de la houle dans le secteur du projet, au point ANEMOC 2577 (49°28.92'N ; 0°31.8' W), situé à l'intérieur de la zone d'emprise du projet.

La Figure 2-3 à gauche présente la répartition des houles reconstituées par classes de hauteur significative et de provenance : les houles les plus fréquentes et les plus fortes sont issues du secteur ONO à NO, puis du secteur Nord à NE. La Figure 2-3 à droite fournit la corrélation entre la hauteur significative et la période de pic. Les mers du vent sont plus fréquentes et plus vigoureuses que les houles ; les périodes de pic les plus courantes passent progressivement de 5 s pour les agitations les plus faibles à 10 s pour les plus violentes.

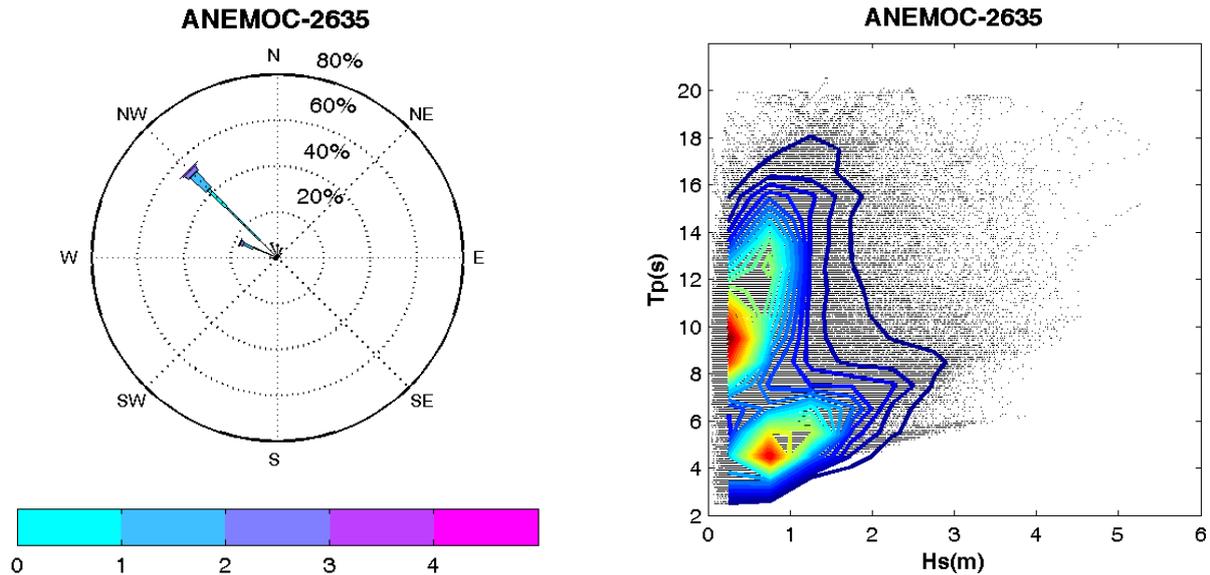


Figure 2-3 : Rose des houles à gauche ; répartition Hs-Tp à droite.

➤ La houle dans le secteur du projet

Actimar (2008) a simulé la propagation en baie de Seine de chacune des houles de provenance N+270° à N+90° en passant par le Nord. Dans l'emprise du projet, les houles les plus fortes sont celles qui proviennent de la direction N+292.5° (Figure 2-4) : les hauteurs significatives annuelles y sont comprises entre 3,5 et 3,6 m.

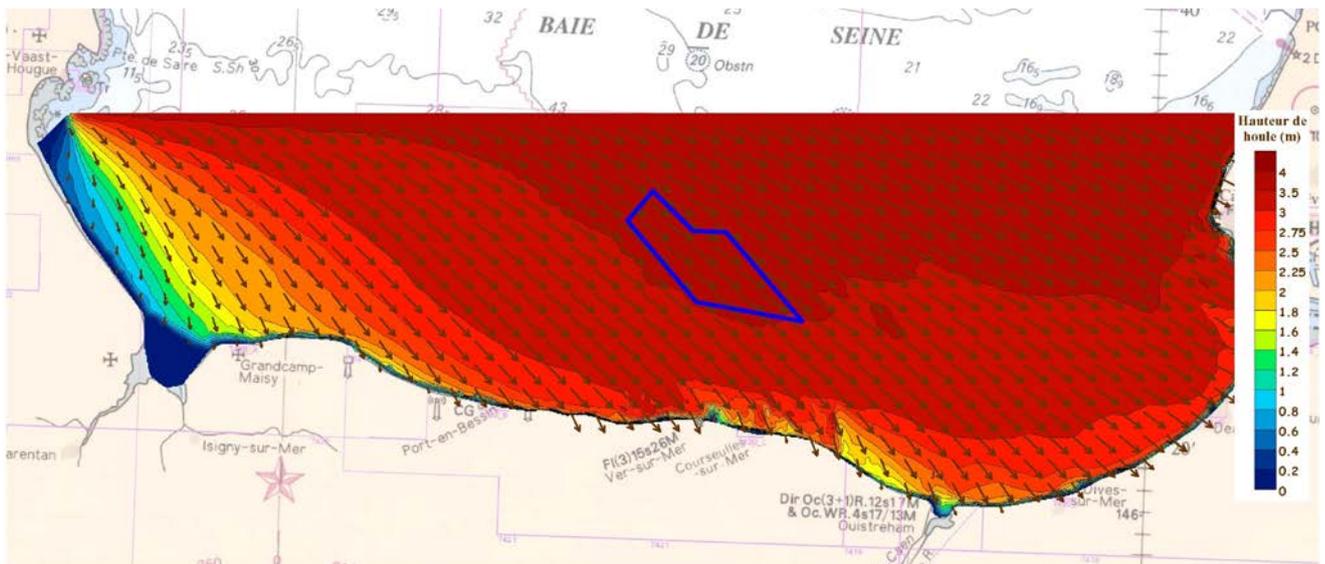


Figure 2-4 : Champ de houle pour la hauteur significative annuelle en provenance NW (simulations Actimar - 2008)

➤ La houle dans le voisinage de l'atterrage

Dans le secteur de l'atterrage, c'est la provenance NO qui provoque la plus forte agitation, suivie de près par la houle d'ONO, Nord et NNE. La normale à la ligne (0 m CM) est sensiblement orientée vers la direction N+11° : il apparaît donc que les houles les plus fortes près du rivage (ONO à N) tendent à provoquer un transport littoral dirigé vers l'Est.

### 2.3.3 LE COURANT

En Manche, la marée est de type semi-diurne : la composante majeure est celle associée à la rotation de la Lune autour de la Terre (onde M2). Ce mouvement astronomique se traduit par un cycle de 12.4 heures décrivant les phases de courants alternés (flot et jusant) séparées par des étales (renverses de courant), soit environ 4 cycles par jour de variation de l'intensité des courants (4 périodes de courants forts et 4 étales au cours d'une journée). Ce cycle principal est modulé par la position du Soleil par rapport à la Lune, générant une onde S2 de période 14.7 jours : le cycle morte-eau / vive-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.

Actimar (2009) a simulé la courantologie liée à la marée dans la baie de Seine ; les Figure 2-5 et Figure 2-6 illustrent les résultats correspondant au courant maximal en vive eau moyenne, respectivement en flot et en jusant.

Le flot, très intense et orienté vers l'Est devant le Cotentin, tourne vers le SSE pour alimenter la baie de Seine en s'atténuant. La vitesse maximale dans le secteur du projet est de l'ordre de 2 nœuds en vive eau (1 nœud en morte eau). En jusant, le courant est légèrement plus faible ; il porte vers l'Ouest dans le secteur du projet.

En flot, un gradient très net de vitesse de courant, décroissant du NO au SE, est bien marqué. Dans l'emprise du projet, le courant maximal est assez uniforme, légèrement inférieur à 1 m/s. Entre le secteur du projet et la côte, l'excroissance rocheuse du plateau du Calvados provoque une accélération de l'écoulement, qui atteint localement près de 1,3 m/s.

En jusant, le courant maximal est généralement plus faible ; il est légèrement inférieur à 0,8 m/s dans l'emprise du projet.

In Vivo a procédé à des mesures de répartition de courant sur la verticale au point (49° 26.34' N ; 0° 33.64' O), légèrement à l'Ouest de la zone des éoliennes, du 7 mai au 10 juin 2009 (coefficients de marée compris entre 37 (18 mai 2009) et 95 (25 et 26 mai 2009)).

La Figure 2-7 détaille les caractéristiques des courants mesurés lors des vives eaux des 25 et 26 mai 2009 (coefficients de marée de 95) :

- la vitesse est naturellement sensiblement plus élevée à proximité de la surface ;
- le flot est plus court et plus rapide que le jusant ;
- enfin le cap est quasiment uniforme sur la verticale sur toute la période de flot ; il l'est moins en jusant (écart de l'ordre de 10 ° entre fond et surface) avec également une rotation plus marquée du courant lors de la fin de jusant.

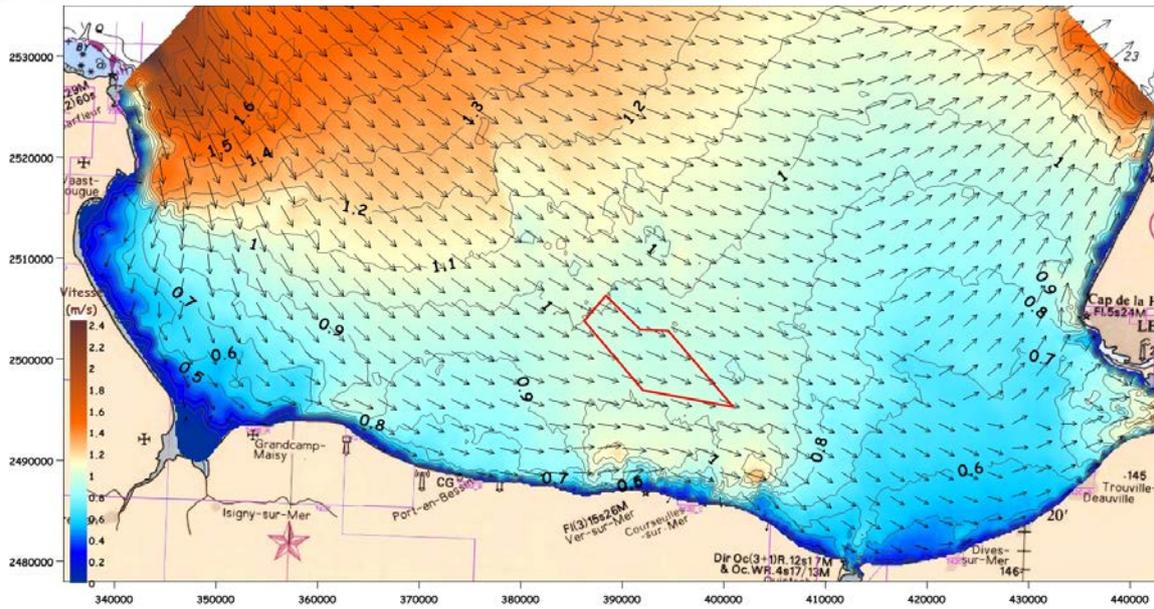


Figure 2-5 : Courant maximal de flot en vive eau moyenne en baie de Seine (Actimar 2009).

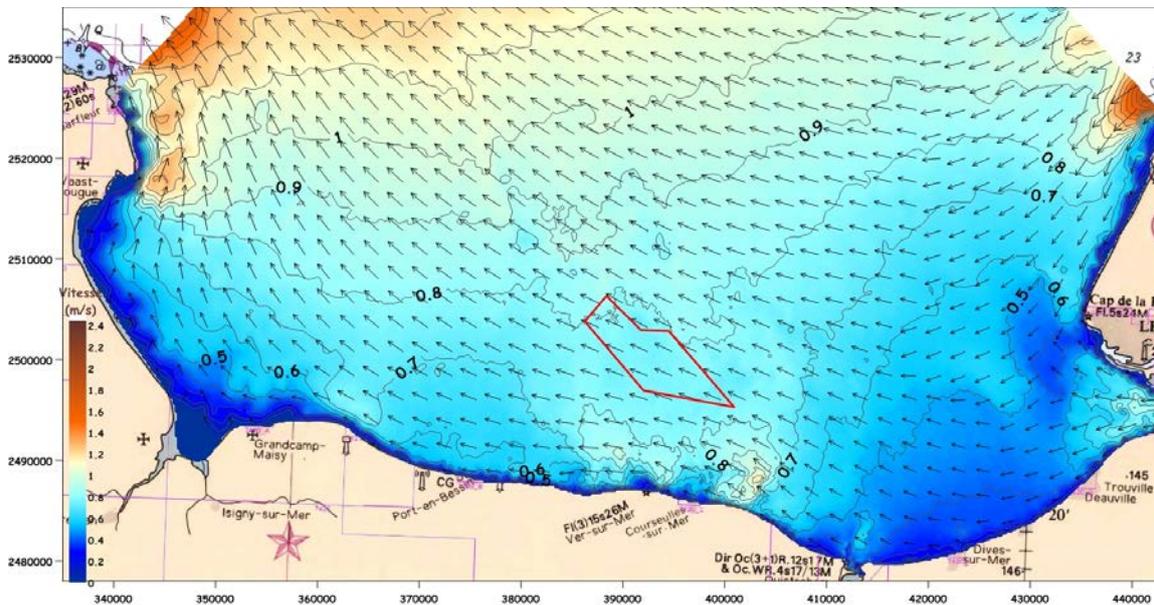


Figure 2-6 : Courant maximal de jusant en vive eau moyenne en baie de Seine (Actimar, 2009).

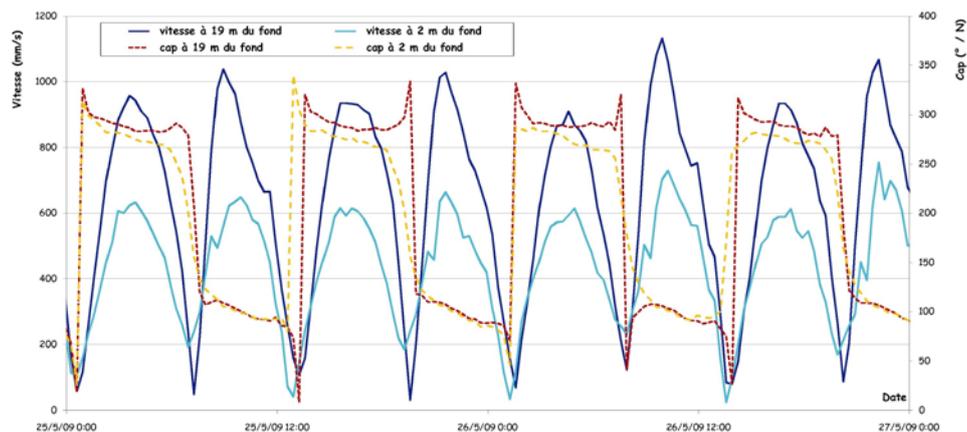


Figure 2-7 : Evolution de la vitesse et du cap du courant mesuré en vive eau, à 2 m et 19 m du fond.

#### 2.3.4 HYDROLOGIE

##### ➤ Les débits liquides

Le module de la Seine à l'embouchure est évalué aux environs de 480 m<sup>3</sup>/s (Garnaud, 2002). Les débits d'étiage les plus faibles se situent aux environs de 40 m<sup>3</sup>/s ; les crues exceptionnelles peuvent dépasser 2 000 m<sup>3</sup>/s.

En baie de Seine, les rivières les plus importantes sont l'Orne (module : 24 m<sup>3</sup>/s), puis la Vire (module : 15 m<sup>3</sup>/s). Le total des modules des rivières débouchant en baie de Seine, hors la Seine, se situe aux environs de 100 m<sup>3</sup>/s (Agence de l'Eau Seine Normandie, 2004).

En se basant sur la comparaison des tailles des bassins versants de l'Orne et de la Seulles – qui débouche dans le secteur de l'atterrage du câble du présent projet, on peut estimer le débit moyen de la Seulles à un peu plus de 3 m<sup>3</sup>/s.

##### ➤ Les débits solides

D'après Avoine (1994, in Lesueur et al., 1999), le débit solide de la Seine en particules fines (vases) sur la période 1960-1993 est de l'ordre de 650 000 t/an au niveau du barrage de Poses. La granulométrie de ces sédiments fins est de l'ordre de 10 à 20 microns en régime de débit moyen, et entre 20 et 60 microns en crue.

Si l'on suppose que l'érosion spécifique des bassins versants côtiers est similaire à celui de la Seine, l'apport solide de vases en baie de Seine de ces rivières côtières s'établit très grossièrement de 100 000 à 150 000 t/an – soit de l'ordre de 800 000 à 900 000 t/an pour l'ensemble des fleuves se jetant en baie de Seine.

##### ➤ Concentration en matière en suspension

Les concentrations en matières en suspension en baie de Seine dépendent à la fois :

- du régime hydrologique de la Seine (variation saisonnière avec forte augmentation, en crue, liée à l'expulsion, du bouchon vaseux),
- et des conditions hydrodynamiques en baie de Seine (remise en suspension des vases par les courants et surtout par les houles).

Dans la partie centrale de la baie, l'effet des tempêtes est prépondérant, surtout dans les zones peu profondes.

La conjugaison de crue et de forts coups de vent peut conduire à des niveaux de turbidité atteignant au fond 5 NTU, soit environ 10 mg/l, jusqu'à une dizaine de kilomètres de la côte au large de Courseulles. En surface, la turbidité est alors environ 2 fois plus faible.

### 3 IMPACT HYDRODYNAMIQUE

#### 3.4 METHODOLOGIE

Il s'agit d'évaluer l'influence du projet de parc éolien en Baie de Seine sur l'hydrodynamique locale et régionale. Pour cela, des simulations hydrodynamiques dans les conditions naturelles (absence des fondations) sont réalisées dans une première phase du projet. Elles permettent de caler et de valider le modèle mis en place. Puis, les fondations des turbines sont insérées dans la grille de calcul et les résultats obtenus sont comparés à la situation de référence (conditions naturelles). Cette méthodologie permet d'évaluer l'impact du projet éolien.

Seules les fondations gravitaires sont considérées dans les modélisations hydrodynamiques. Les fondations jackets ont des structures trop fines et trop complexes pour être prises en compte de manière réaliste dans des modèles hydrodynamiques développés pour l'étude des écoulements géophysiques (type système Telemac). L'analyse d'impact pour les fondations jackets sera abordé par expertise, à partir de références bibliographiques et en s'appuyant sur les résultats des modélisations obtenues avec les fondations gravitaires.

#### 3.5 DESCRIPTION DU MODELE HYDRODYNAMIQUE

Le modèle hydrodynamique retenu pour l'étude est le code Telemac-2D, car il repose sur l'utilisation de maillages non-structurés qui eux seuls permettent de bien représenter les géométries complexes et, pour notre étude, d'inclure des fondations dans le maillage. Le code Telemac-2D simule les écoulements à surface libre en résolvant les équations de Barré de Saint-Venant (1871).

Afin de vérifier que la composante barotrope des courants est dominante en baie de Seine et que le recours à une modélisation bidimensionnelle (2D) est réaliste, nous avons calculé les gradients verticaux de courant à partir des mesures ADCP réalisées par In Vivo du 7 mai au 10 juin 2009 à proximité de la zone d'implantation des éoliennes. Ces gradients restent très faibles. Hormis dans les zones proches de la surface ou du fond, où le frottement de l'air ou du fond modifie la vitesse aux interfaces, le gradient vertical de courant n'excède pas  $0.1 \text{ s}^{-1}$ . L'hypothèse barotrope est donc valide pour l'étude des courants sur la zone de projet.

Les données bathymétriques du SHOM ont été acquises pour la construction du modèle hydrodynamique. Elles ont été complétées par les levés bathymétriques haute résolution de la zone du projet et de l'estran (In Vivo - 2009).

Le modèle bathymétrique dans sa forme finale est présenté en Figure 3-1. Il couvre la totalité de la Baie de Seine, ce qui permet de prendre en compte des processus de meso-échelle. Le maillage est composé de 66 653 nœuds. Au large de la Baie de Seine, la taille des mailles est de l'ordre du kilomètre ; de l'embouchure de la Seine à Port-en-Bessin, elle vaut 500 m. Le maillage est raffiné dans les zones du parc et du corridor des câbles et sur le plateau du Calvados (250 m). Dans le parc éolien la taille des mailles n'excède pas 75 m ; une attention particulière a été portée au maillage autour des 50 fondations et du transformateur qui requièrent une résolution de l'ordre du mètre.

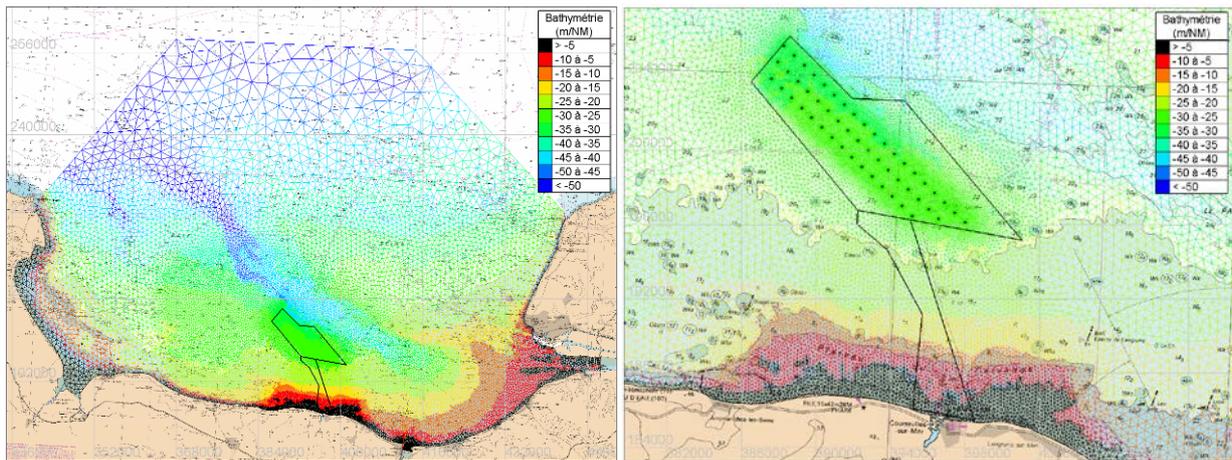


Figure 3-1 : Bathymétrie et maillage du modèle hydrodynamique (référéncée par rapport au niveau moyen à Courseulles-sur-mer).

### 3.6 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE EN CONDITIONS NATURELLES

Le modèle hydrodynamique en conditions naturelles a été construit en 2008 (Actimar, 2008) pour les besoins de l'étude météo océanique, utile au dimensionnement des ouvrages. Le modèle hydrodynamique a été calibré sur la configuration naturelle du site en confrontant les niveaux et les courants calculés aux données du SHOM dans la zone d'étude. Lors de l'étude d'impact, le modèle a été validé par confrontation des courants simulés aux mesures ADCP réalisées en 2009 par In Vivo sur les périodes de vive-eau et morte-eau moyennes (cf. Figure 3-2). Les résultats des modélisations sont cohérents vis-à-vis des mesures ADCP ; notamment les maxima d'intensité sont bien représentés par la modélisation numérique.

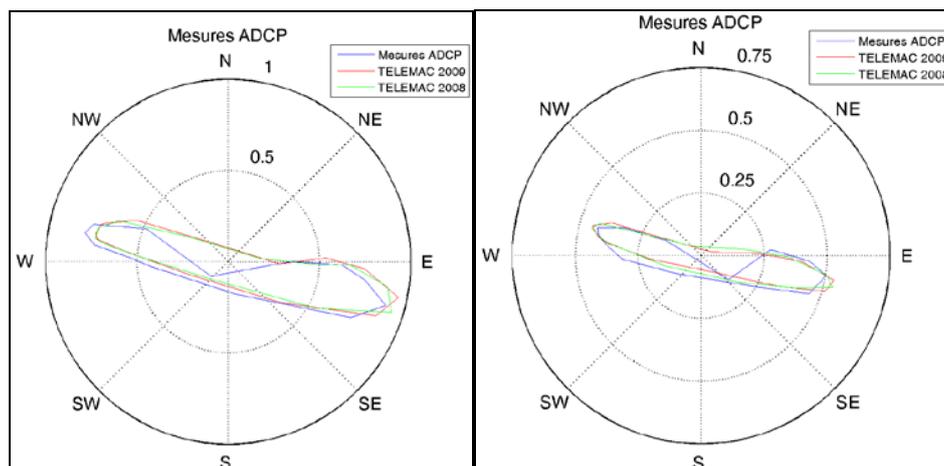


Figure 3-2 : Roses de courant (m/s) pour C95 (à gauche, le 25 Mai 2009) et pour C45 (à droite, le 19 Mai 2009). Comparaisons entre les mesures ADCP et les résultats *Telemac-2D* (2008 et 2009).

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

Les champs de courant horaire ont été tracés à l'échelle de la Baie de Seine, puis à l'échelle du parc éolien. Les Figure 2-5 et Figure 2-6 illustrent les résultats correspondant au courant maximal en vive eau moyenne, respectivement en flot et en jusant. L'absence d'accidents bathymétriques dans la zone du parc éolien confère à l'hydrodynamique de la zone d'implantation un aspect très

homogène spatialement à chaque instant de la marée. Plus au sud, en dehors de la zone d'intérêt, le plateau du Calvados provoque une intensification des courants du fait de la variation brutale du relief marin. C'est dans les parties nord-ouest et sud du parc éolien que l'on rencontre les intensités de courant les plus fortes ; en vive-eau moyenne (C 95), elles s'élèvent à 1 m/s au maximum du flot et elles restent du même ordre de grandeur au centre du parc éolien (0.9 m/s). Les courants sont globalement orientés vers l'Est pendant le flot et vers l'Ouest pendant le jusant.

### 3.7 MODELISATION HYDRODYNAMIQUE AVEC LES FONDATIONS GRAVITAIRES

L'impact des fondations gravitaires sur l'hydrodynamique est étudié sur deux échelles spatiales :

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

#### 3.7.1 ANALYSE DE L'IMPACT REGIONAL

La Figure 3-3 synthétise l'impact du parc éolien, en fondations gravitaires, sur l'hydrodynamique régionale.

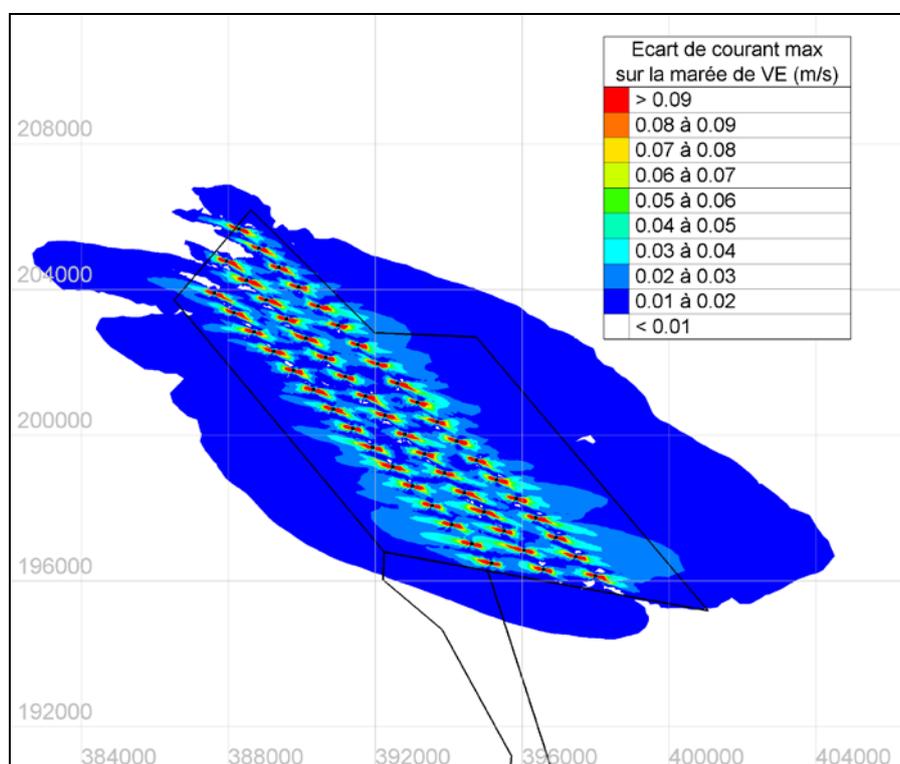


Figure 3-3 : Différences d'intensités du courant pour les fondations gravitaires à l'échelle du parc éolien. Ecart absolu maximal sur une vive-eau moyenne (m/s).

Les résultats des modélisations numériques montrent la présence d'effets de sillages au voisinage des fondations (Actimar, 2009). L'impact est plus fort au moment du maximum de flot et de jusant, lorsque la vitesse du courant est élevée.

Les surfaces colorées de la Figure 3-3 représentent les écarts maxima d'intensités sur les courants barotropes instantanés, entre les conditions naturelles et aménagées. Pour mettre en avant les endroits où le courant est le plus fortement modifié, les zones où les écarts de courant

sont inférieurs à 1 cm/s sont laissées blanches. Ce seuil à 1 cm/s représente moins de 1.4% du courant de jusant à C95 (0.75 m/s) et 1% du courant maximum de flot (1 m/s) à C95.

La présence des fondations affecte le courant principalement dans la zone d’implantation. On note toutefois des écarts faibles (<0.02 m/s) en dehors du parc aux heures de renverse de la marée (PM-5 et PM+1 pour une vive-eau moyenne). La zone impactée par les fondations gravitaires est d’environ 20 km dans la direction NO-SE et 10 km dans la direction SO-NE ; environ deux à trois kilomètres au-delà des limites du parc éolien.

	Fondations gravitaires
<b>Impact sur le courant &lt; 10 %</b>	Au-delà de 500 m
<b>Impact sur le courant &lt; 1 %</b>	Au-delà de 2 à 3 km (suivant la position de la fondation considérée)

Tableau 3-1 : Récapitulatif des distances d’impact sur les courants.

### 3.7.2 ANALYSE DES IMPACTS LOCAUX, AUX ABORDS DES FONDATIONS

L’hydrodynamique est très homogène dans la zone du parc éolien ; cependant, les écarts de vitesse les plus importants sont rencontrés aux abords des éoliennes placées aux extrémités nord et sud du parc éolien. Les écarts de vitesse du courant induits par la présence des fondations gravitaires sont représentés au maximum du flot (Figure 3-4), pour une vive-eau moyenne (C95) et pour les fondations situées à l’extrême nord de la zone. Dans l’illustration, un écart négatif de la vitesse du courant correspond à un ralentissement de l’écoulement en présence des fondations. Réciproquement, un écart positif du courant équivaut à une accélération de l’écoulement en présence des fondations.

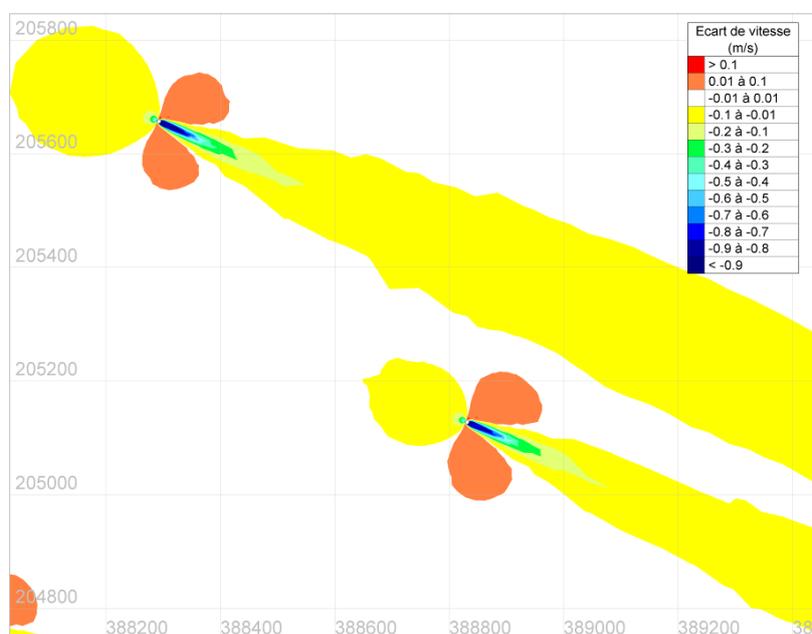


Figure 3-4 : Différences d’intensité du courant aux abords des fondations gravitaires au maximum du flot C95 au nord de la zone.

A l'échelle locale, le courant ralentit en amont et en aval des fondations. Sur les côtés, les vitesses accélèrent. En aval du cylindre se crée une zone de sillage. Le sillage est évanescent avec l'éloignement de la fondation. Pour les fondations gravitaires, l'écart de vitesse au maximum de flot et de jusant est inférieur à 10% au-delà de 500 m de la fondation ; il est inférieur à 1% au-delà de 2 à 3 kilomètres (suivant la position de la fondation considérée).

### 3.8 CAS DES FONDATIONS JACKETS

L'écoulement sur les petits corps, dont la structure de référence est le jacket, a pour caractéristique d'être fortement séparé. En l'état actuel des connaissances, la modélisation numérique des écoulements séparés à grands nombres de Reynolds reste du domaine de la recherche universitaire et nécessite de lourds moyens numériques, même pour des géométries aussi simples (en apparence) que les cylindres circulaires.

Lorsque la structure est composée de cylindres groupés, il existe des effets de proximité entre les différents éléments de la structure :

- Effet de masquage : les cylindres qui se trouvent placés dans le sillage des autres sont soumis à un courant de vitesse diminuée. L'effet de masque est très prononcé si le cylindre aval est près du cylindre amont (à une distance inférieure à 3D).
- Effet de blocage : les cylindres les plus amont sont soumis à un écoulement incident ralenti par la présence des autres cylindres.

Pour le projet de parc éolien en Baie de Seine, l'espacement entre les jambes des jackets (cf. §1) est relativement important :  $L/D \sim 9$  à 13 (entraxe rapporté au diamètre). Dans ces conditions, les données bibliographiques indiquent que les effets de proximité restent limités.

Pour caractériser l'impact de la centrale d'éoliennes sur l'hydrodynamique, Actimar a repris la méthodologie appliquée pour le parc éolien 'Horns Rev' [11]. Cette méthodologie repose sur une analogie à un écoulement dans un canal dans lequel on introduit les deux situations : l'absence puis la présence des fondations. La présence du parc entraîne une modification des courants liée aux forces de traînées sur les fondations. Les relations ainsi obtenues conduisent à un impact évalué à 6.8% pour les fondations gravitaires et 3.5% pour les fondations jackets.

Il convient de noter que la démarche proposée repose sur des hypothèses restrictives (analogie à un écoulement stationnaire dans un canal) et il est difficile d'exploiter ces résultats de manière quantitative. En effet, nous avons vu par le biais des modélisations numériques que la perturbation du champ de courant évolue rapidement avec la distance à la fondation. L'impact calculé à proximité des différentes fondations permet cependant de fournir des éléments qualitatifs ; il montre notamment que les fondations jackets sont approximativement deux fois moins impactantes sur l'hydrodynamique que les fondations gravitaires.

## 4 IMPACT DES FONDATIONS SUR LES ETATS DE MER

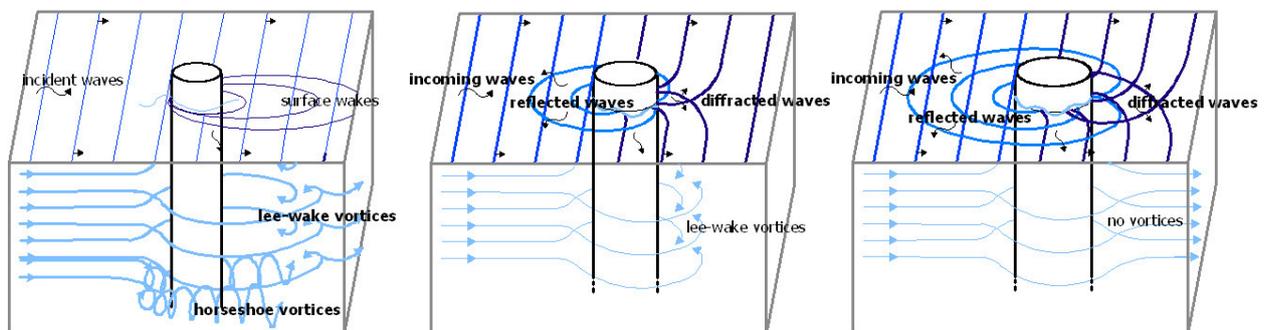
### 4.9 INTERACTIONS ENTRE LES VAGUES INCIDENTES ET LES FONDATIONS

#### 4.9.1 PROCESSUS HYDRODYNAMIQUES

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

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

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



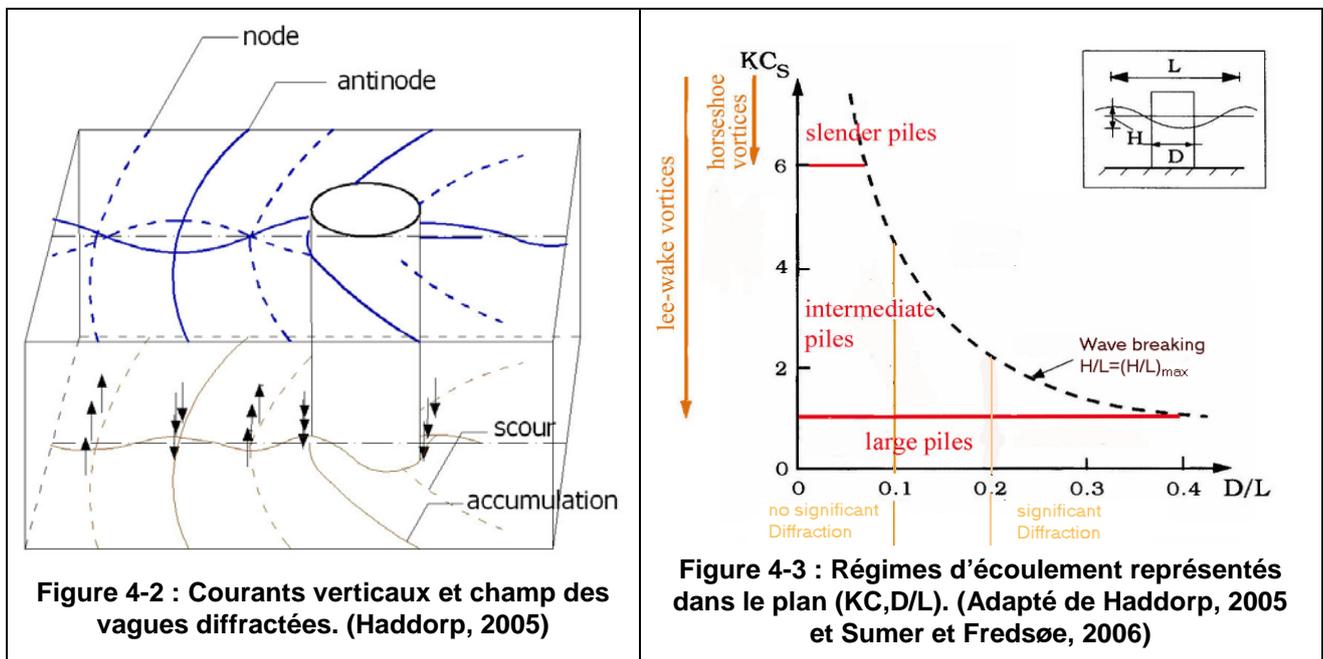
**Figure 4-1 : Effet de la largeur des piles sur l'agitation en surface et le régime de l'écoulement ; de gauche à droite : pile mince, intermédiaire et large (selon Haddorp, 2005).**

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, les vagues seront diffractées autour de la fondation,

- le nombre de Keulegan-Carpenter ( $KC$ ), qui caractérise l'amplitude du mouvement orbital des particules d'eau par rapport à la largeur du cylindre et qui indique si l'écoulement autour du cylindre se séparera et expulsera des tourbillons dans le sillage. Le régime de pile mince est atteint pour les fortes valeurs de  $KC$ , typiquement  $KC > 6$ . Egalement,  $KC$  est borné par la limite de stabilité des vagues (cambrure limite).

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



#### 4.9.2 EFFETS NON LINEAIRES AU SEIN DES INTERACTIONS HOULE/STRUCTURE, RUN-UP

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

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

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



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

#### 4.9.3 INFLUENCE DU DÉFERLEMENT DES VAGUES SUR LES RISQUES D'AFFOUILLEMENT

Quelques expériences permettant l'analyse de l'impact du déferlement des vagues sur l'affouillement autour des cylindres sont répertoriées dans la littérature. Récemment, le 'Offshore Denmark Center' a réalisé une étude pour synthétiser les connaissances et les méthodes utilisées pour estimer les profondeurs d'affouillement local pour les fondations de type monopieu offshore [21]. Au cours de ce projet, des tests physiques ont été réalisés pour étudier l'interaction entre des vagues régulières et irrégulières, déferlantes et non déferlantes sur un cylindre. Tous les essais ont été menés avec  $D/L < 0.1$  (pas de diffraction significative – cf. Figure 4-3) et  $KC$  compris entre 3.1 et 12.4 (régimes de cylindres minces et intermédiaires).

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

#### 4.10 APPLICATION AU SITE DU PARC EOLIEN DE LA BAIE DE SEINE

Les conditions de vagues sur le parc éolien de la baie de Seine ont été présentées dans [1]. Les principaux résultats sont que :

- Les conditions les plus défavorables proviennent du secteur ONO.
- La hauteur significative des vagues, en condition extrême annuelle, est de 3.8 m en pleine mer de vive eau moyenne. Pour des conditions extrêmes centennales, la hauteur significative peut atteindre 6.2 m. La période associée à ces conditions extrêmes 100 ans est de 9.5 s ( $\pm 2$  s).

##### 4.10.1 IMPACT DU PARC EOLIEN SUR LES ETATS DE MER A L'ECHELLE REGIONALE

L'impact du parc éolien sur le climat des vagues à l'échelle régionale est abordé en reprenant la méthodologie appliquée pour le parc éolien 'Horns Rev' [11]. La méthode repose sur l'hypothèse (conservative) que toute l'énergie d'une vague atteignant une éolienne se dissipe à l'arrière de celle-ci (effet de masquage) ; on peut alors calculer la variation du flux d'énergie au travers d'une section liée à la présence des éoliennes.

Le parc éolien de la Baie de Seine est composé de 50 éoliennes, d'un mât de mesures et d'un transformateur qui se répartissent sur une zone que l'on peut approximer par un rectangle de 14 km x 2.5 km orienté sur un axe NO-SE. En fonction de l'incidence des vagues par rapport au parc éolien, l'atténuation des états de mer sera plus ou moins marquée. Elle sera plus forte pour les états de mer en incidence du NO qui vont se propager approximativement au travers de 17 rangées de 3 éoliennes ; par contre, la zone impactée sera plus étroite qu'en incidence de NE.

Pour les états de mer les plus forts et les plus fréquents en incidence d'ONO, on estime une réduction de la hauteur des vagues de 2.5 % en aval de l'ensemble des fondations jackets et 5.3 % en aval des fondations gravitaires. Pour les fondations gravitaires, l'impact est approximativement du même ordre de grandeur que la variabilité naturelle des états de mer (estimé à 6.7% à partir de l'hindcast ANEMOC) ; par contre, l'impact est plus faible pour les fondations jackets.

#### 4.10.2 IMPACT SUR LES VAGUES AU VOISINAGE DES FONDATIONS

Le comportement hydrodynamique autour des fondations se caractérise à partir du paramètre de diffraction et du nombre de Keulegan-Carpenter. Comme ces deux paramètres nécessitent de connaître l'amplitude et la longueur d'onde des vagues, une analyse des tableaux de corrélations statistiques ( $H_s/T_p$ ) et des conditions extrêmes des vagues a été réalisée (cf. [1] et [2]). Cette analyse montre que :

- Pour les fondations gravitaires, la quasi-totalité des états de mer (99%) se situent dans le régime des cylindres larges qui perturbe peu l'écoulement. Cependant, la diffraction devient significative dès que la période de la houle est inférieure à 10 s (85 % des états de mer). Les effets de la diffraction et des non-linéarités vagues / structure perturbent la surface libre essentiellement sur la première longueur d'onde (~130 m pour une période de 10 s, 55 m pour une mer du vent de période 6 s).
- Pour les fondations jackets, dès que la mer commence à s'agiter ( $H_s > 0.5\text{m}$ ) on se trouve majoritairement dans un régime intermédiaire ( $KC > 1$ ). La séparation de l'écoulement devient plus importante avec l'augmentation des états de mer et pour les grandes longueurs d'onde. Pour les forts états de mer ( $H_s > 3\text{ m}$ ),  $KC > 6$  et les tourbillons en fer à cheval pourront se former près du fond (2% d'occurrence).
- Concernant le mât de mesures, les effets de séparation de l'écoulement sont un peu plus faibles que ceux associés aux fondations jackets mais ils restent dominants. Ils sont susceptibles d'apparaître dès que  $H_s > 1\text{ m}$ . Pour les forts états de mer ( $H_s > 3.5\text{ m}$ ),  $KC > 6$  suggérant que les tourbillons en fer à cheval pourront se former (0.2% d'occurrence). Tout comme pour les fondations jackets, la diffraction reste négligeable sur cet édifice à cause de son faible diamètre ; 20% des états de mer ( $T_p < 4\text{s}$ ) sont concernés, mais la longueur d'onde associée à ces états de mer est très courte ( $\lambda_p < 25\text{ m}$ ), et les vagues sont peu énergétiques.

## 5 ETUDE D'IMPACT SEDIMENTAIRE

### 5.1 EVOLUTION DU LITTORAL ET DES FONDS MARINS

#### 5.1.1 AMENAGEMENT ET EVOLUTION DU LITTORAL (COURSEULLES-SUR-MER)

##### 5.1.1.1 Le littoral et le cours de la Seulles

Les amples divagations de l'embouchure de la Seulles sont connues au moins depuis le XVIIIème siècle. La carte de Cassini, levée dans le secteur de 1756 à 1759, montre qu'à l'époque la rivière débouchait en Manche au niveau de Bernières, à environ 2 km à l'Est de l'embouchure actuelle (Figure 5-1). La carte mentionne de plus une ancienne embouchure, située environ 1 400 m plus à l'Ouest.

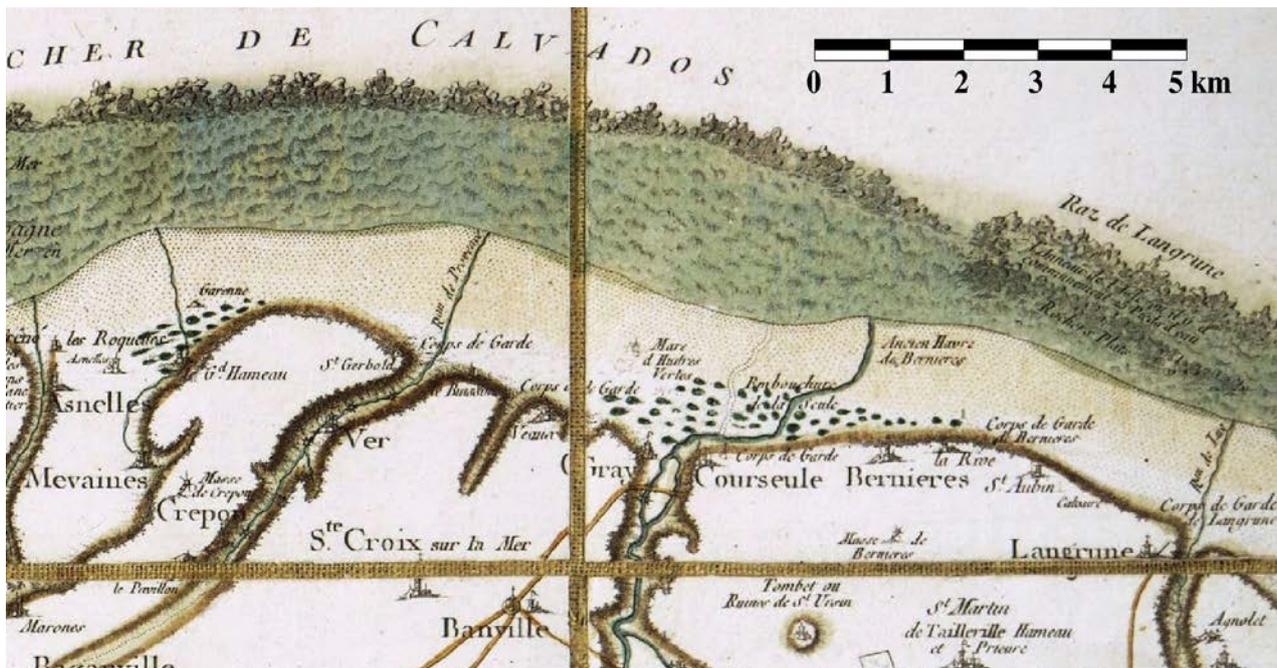


Figure 5-1 : Carte de Cassini des environs de Courseulles-sur-Mer, levée entre 1756 et 1759

En 1829, l'aménagement d'un véritable port est décidé : création d'un bassin à flot en 1833 (bassin de Joinville) ; canalisation de la Seulles entre deux jetées parallèles, orientées sensiblement au NNE (de Rouville, 1946). Les jetées ont été prolongées à diverses reprises au XIXème siècle pour lutter contre l'invasion du chenal par le banc de sable progressant depuis l'Ouest. A la fin du XIXème siècle, l'entrée du port est ainsi protégée par deux jetées à claire-voie en charpente, prolongée en ce qui concerne la digue Est par un épi submersible, très bas, en enrochements de 275 m.

Ces jetées ont été détruites pendant la seconde guerre mondiale. La jetée Est a été reconstruite, et l'épi en enrochements qui la prolonge vers le large a été rehaussé. A la place de la jetée Ouest, un épi massif a été mis en place sur une longueur d'environ 140 m ; il a ensuite été prolongé par un épi plus bas. La longueur totale actuelle de l'épi est de l'ordre de 380 m.

#### 5.1.1.2 Les ouvrages de défense de plage

La défense contre l'érosion du littoral a conduit tout d'abord à la réalisation d'épis en charpente, que l'on peut déjà observer sur les clichés photographiques du début du XXème siècle (cf. Photo 5-1).



**Photo 5-1 : Un épi en charpente sur la plage de Courseulles vers le début du XXème siècle**

Ont été également mis en place des épis en maçonnerie, larges et bas, et qui pour certains servaient de support pour des épis en charpente. Ces épis, longs de 90 à 110 m (LCHF, 1986) réclament un entretien fréquent (BCEOM, 1973).

A noter enfin quelques épis en enrochements, dont le plus imposant, long d'environ 150 m, est situé 850 m à l'Ouest de la jetée Ouest, en limite de zone urbanisée.

A l'Ouest des jetées, les seuls éléments de défense de haut de plage sont, localement, des ganivelles destinées à capter le sable sur la dune et à prévenir la déflation éolienne.

Par contre, à l'Est, le haut de plage est défendu dans tout le secteur urbanisé par deux perrés :

- ➡ le plus ancien, en maçonnerie, s'étend 400 premiers mètres à l'Est du chenal,
- ➡ le plus récent – construit en béton en 1969/1970, suit sur 480 m, jusqu'à l'épi massif en enrochements mentionné plus haut.

Au-delà, sur près de 500 m, le haut de plage est flanqué d'un talus en enrochements, dont la hauteur s'amenuise progressivement.

#### 5.1.1.3 L'évolution du littoral

La Figure 5-2 superpose les traits de côte de 1808, 1892 et 1947 à la photo aérienne de 2006. Les principaux enseignements à tirer de la comparaison sont les suivants :

- ➡ l'évolution de loin la plus forte est celle qui a suivi la construction du port,

- à l'ouest immédiat du port, le littoral s'est avancé progressivement vers la mer. L'avancée est de l'ordre de 150 m entre 1808 et 2006,
- cette avancée se réduit progressivement à mesure que l'on se déplace vers l'Ouest,
- à l'est, l'érosion a été très forte entre 1808 et 1892 ; le littoral s'est stabilisé ensuite.

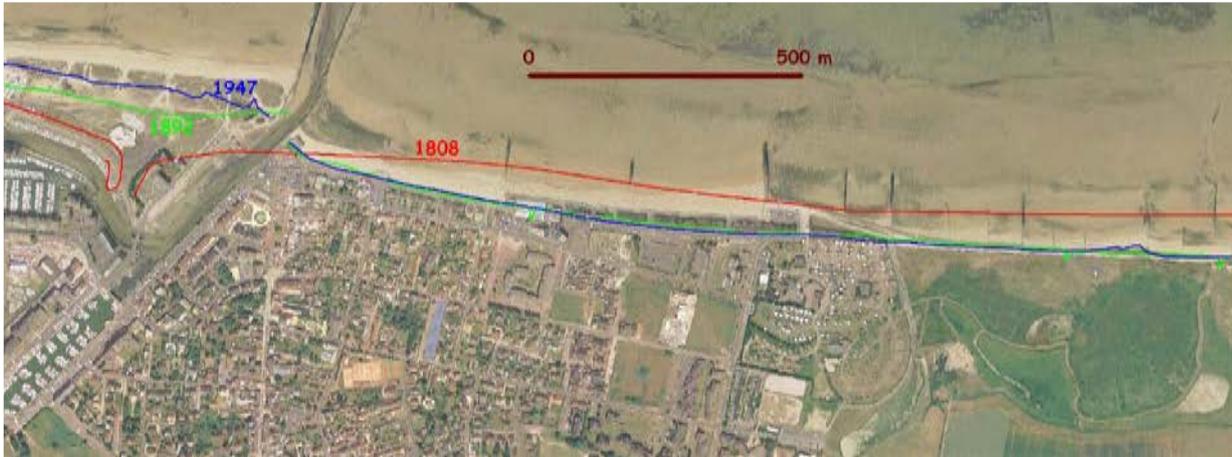


Figure 5-2 : Superposition du cliché aérien de 2006 et des traits de côte de 1808, 1892 et 1947

#### 5.1.1.4 L'évolution de la plage et des petits fonds dans la zone d'atterrage

##### 5.1.1.4.1 Les levés

Le premier levé « précis » date de 1909 (levé au 1/5 000 au voisinage de Courseulles ; au 1/10 000 plus au large).

Le seul autre levé disponible sur l'estran a été réalisé par In Vivo, dans le cadre de l'étude d'impact de la centrale éolienne ; il ne concerne que le secteur situé à l'Ouest des ouvrages d'accès au port de Courseulles-sur-Mer.

##### 5.1.1.4.2 Comparaison des levés – évolution de la plage à court et moyen terme

La Figure 5-3 présente l'évolution de la plage Ouest de Courseulles, sur un siècle, de 1909 à 2009, sur le secteur commun aux deux levés.

Les évolutions sont modérées mais contrastées : une bonne part de la plage est en légère érosion (le plus souvent inférieure à 0,5 m) ; par contre le bas d'estran, et surtout le haut de plage contre la digue d'accès au port est en accrétion – de l'ordre de 0,5 m à 1 m, sur une longueur d'environ 500m.

Cet exhaussement localisé est en parfaite cohérence avec l'avancée de la ligne de rivage décrite plus haut.

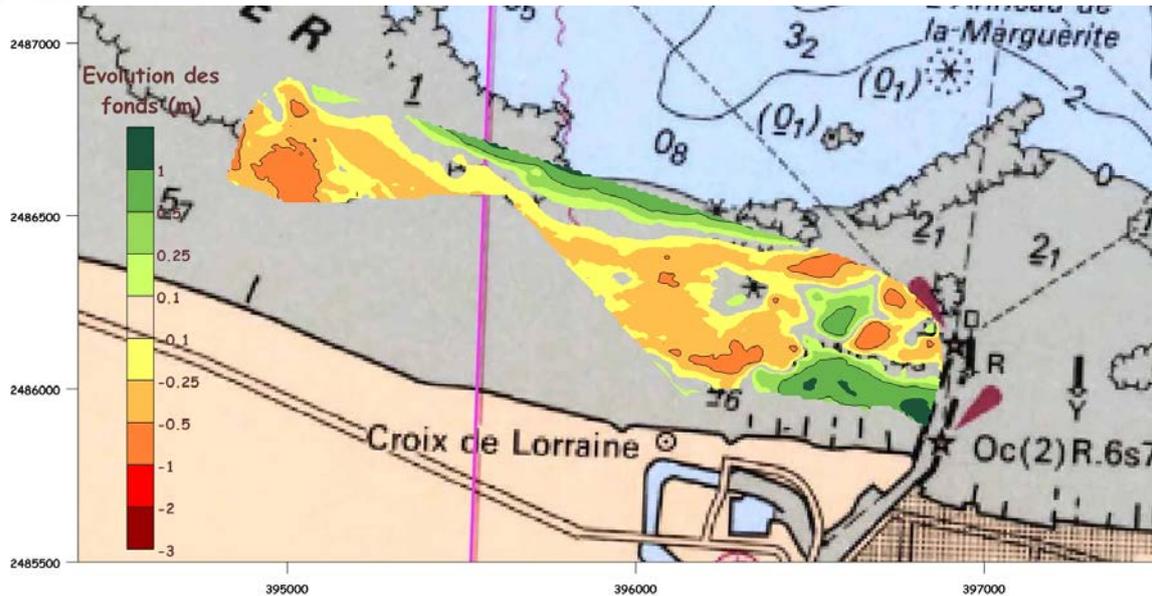
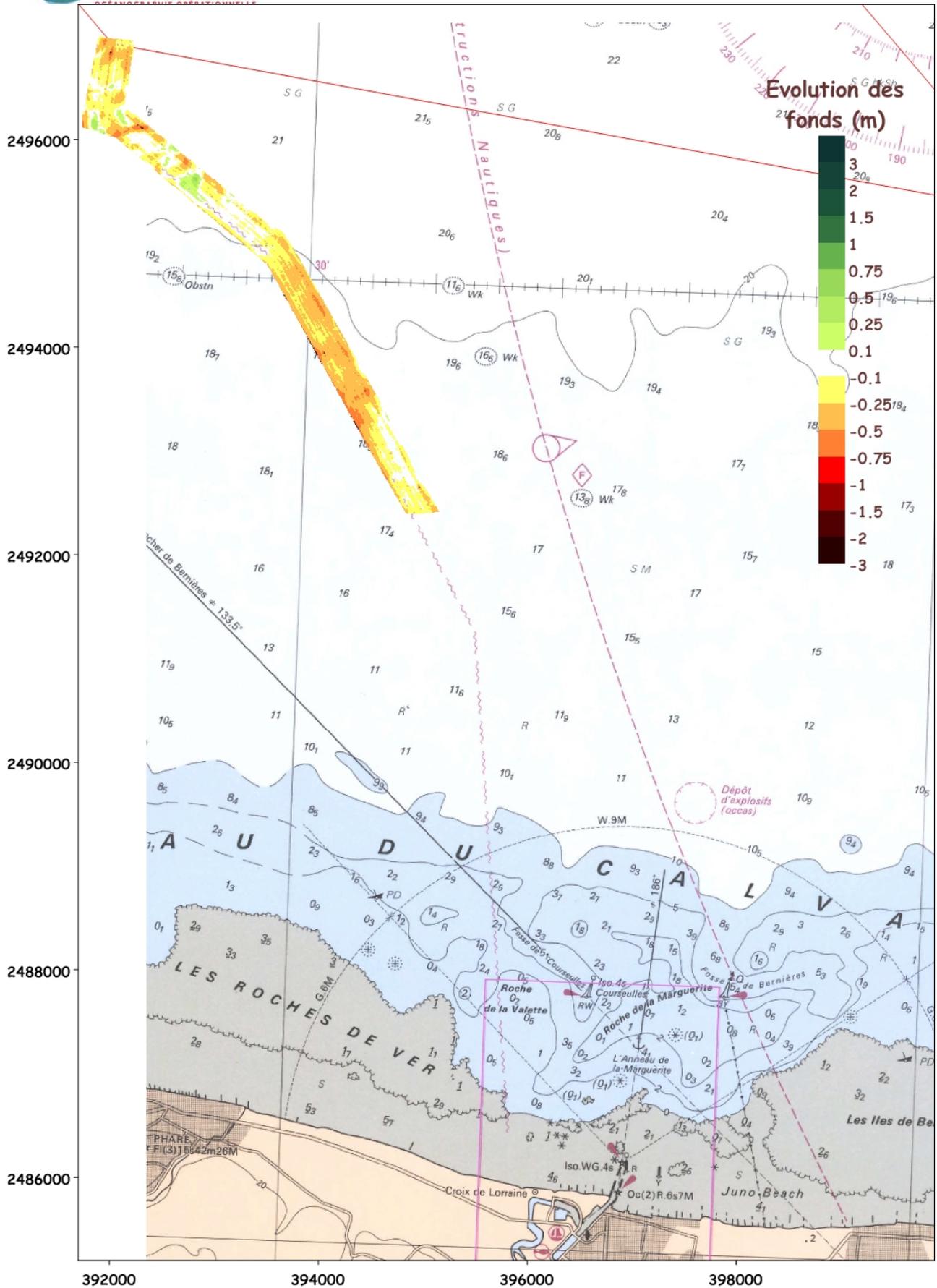


Figure 5-3 : Evolution de la plage Ouest de Courseulles-sur-Mer entre 1909 et 2009

### 5.1.2 EVOLUTION DES FONDS LE LONG DE LA ROUTE PRESSENTIE DU CABLE ET DANS LE SECTEUR DU PARC EOLIEN

#### 5.1.2.1.1 *Le long de la route du câble*

La Figure 5-4 décrit l'évolution des fonds entre 1978 et 2009 dans le voisinage de la route du câble, pour sa partie la plus proche de la ferme éolienne. Les évolutions y sont modérées, dépassant rarement 50 cm, et plutôt en faveur de l'érosion. Le bilan fait apparaître une érosion moyenne d'une vingtaine de centimètres sur l'ensemble du secteur.



5.1.2.1.2 Dans le secteur du parc éolien

La Figure 5-5 présente l'évolution des fonds entre 1978 et 2009 dans l'emprise du projet : l'évolution est le plus souvent faible ; en moyenne, elle correspond à une érosion de 15 cm, i.e. dans la marge d'incertitude de la précision des levés. Les évolutions les plus fortes se situent dans le secteur Est ; cependant leur caractère « haché » pourrait indiquer qu'elles proviennent éventuellement d'un biais dû à la différence de résolution des deux sondages : le sondage de 1978, réalisé à l'échelle du 1/20 000 (1 profil tous les 200 m) ne prenant pas en compte les variations rapides du terrain que le levé de 2009 peut considérer.

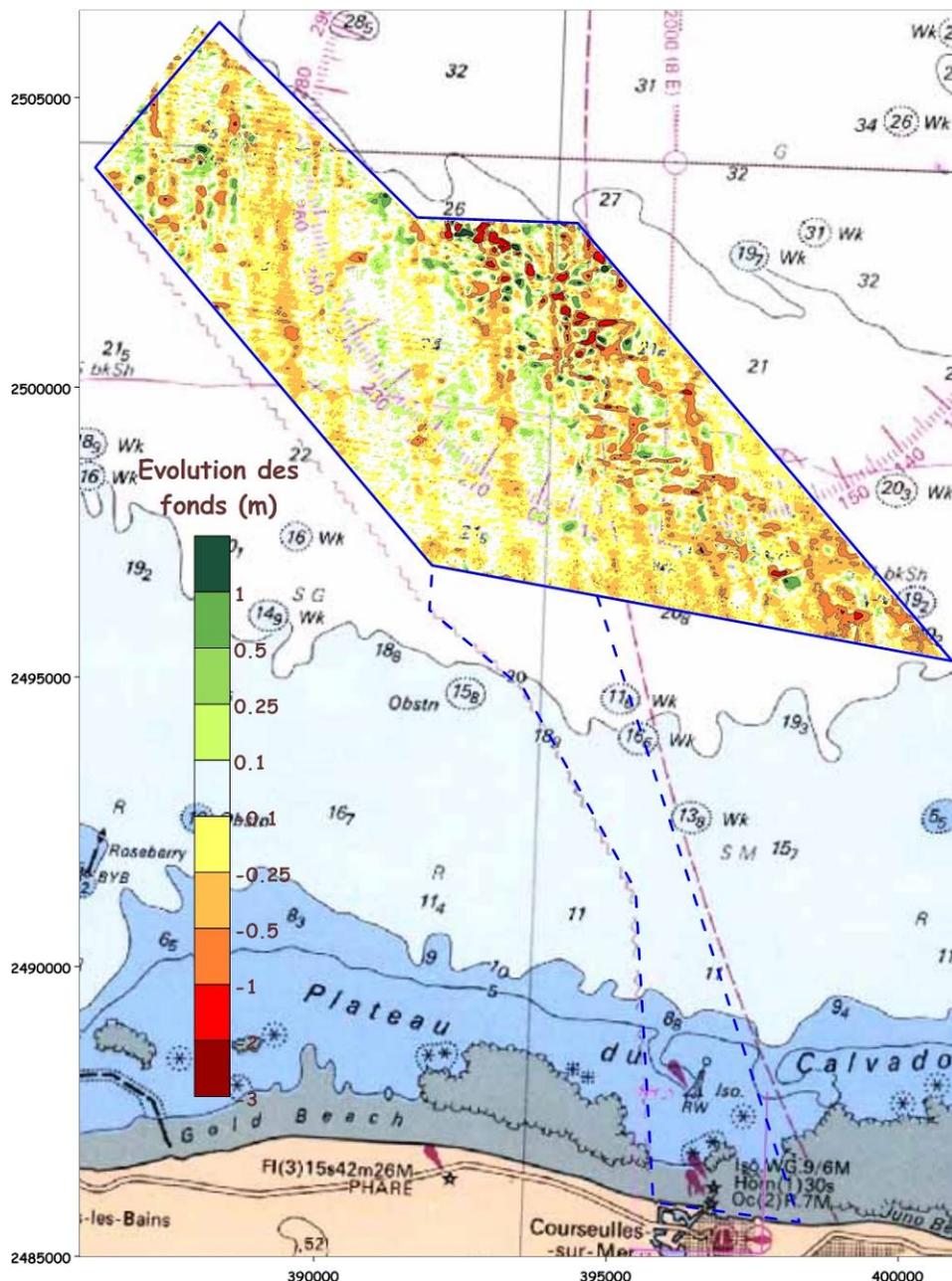


Figure 5-5 : Evolution des fonds entre 1978 et 2009 dans l'emprise du projet

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

### 5.2.1 SECTEUR LITTORAL

Avant la construction des jetées et la canalisation de la Seules, dans la première moitié du XIX<sup>ème</sup> siècle, la poussée des houles de NO entraînait l'embouchure vers l'Est.

La construction des jetées a conduit au blocage des sédiments venant de l'Ouest, provoquant l'avancée du rivage et du haut de plage à l'Ouest immédiat des ouvrages.

En contrepartie, l'interruption du transit sédimentaire a causé l'érosion à l'Est des jetées. Il a fallu bloquer le littoral par un perré et par un talus d'enrochements plus à l'Est, et par un ensemble d'épis, pour enrayer le recul.

### 5.2.2 LE LONG DU TRACE PRESSENTI DU CABLE ET DANS LE SECTEUR DU PARC EOLIEN

Les sédiments tapissant les fonds marins dans l'emprise du projet de parc éolien et à son voisinage sont constitués d'un mélange très hétérogène de sables (fins, moyens et grossiers), de graviers et de cailloutis.

Ces sédiments fins sont masqués par les sédiments plus grossiers, et sont en partie piégés par cette trame sédimentaire grossière.

Comme l'analyse Jardin (1995), la majeure partie des sédiments est héritée. Lors de la dernière transgression, les courants et la houle auraient « décapé » le substratum.

L'adaptation de la nature des fonds à l'écoulement est manifeste lorsque l'on rapproche cette nature de fond à la vigueur de l'hydrodynamisme : les sédiments les plus fins se rencontrent dans les secteurs où les courants sont les moins forts, et à l'opposé les plus grossiers s'observent dans les secteurs où les courants sont les plus forts. Les sédiments qui subsistent sont ceux qui résistent à l'action de la houle et des courants.

La faible épaisseur de la couche sédimentaire, dans des secteurs où la capacité de transport décroît dans le sens du transport dominant (et où donc un dépôt devrait se produire si le transport solide était saturé), confirme que la nature des sédiments est trop grossière pour que s'y produise une dynamique sédimentaire significative. Les fonds sont donc la plupart du temps peu mobiles.

Tous ces indices concordent avec la faiblesse des évolutions constatées entre 1978 et 2009, aussi bien le long du tracé pressenti du câble que dans le secteur du parc éolien : les fonds marins sont sujets à une certaine stabilité moyenne (ou tout au plus une lente érosion du substrat et de la modeste couche sédimentaire qui le recouvre) dans le secteur du projet – l'érosion moyenne évaluée par comparaison de levés hydrographiques étant inférieure à la marge d'incertitude sur ces levés.

### 5.3 SIMULATION NUMERIQUE

#### 5.3.1 DESCRIPTION DU MODELE ET METHODOLOGIE DE L'ETUDE

La simulation de la dynamique des sables a été abordée à l'aide du modèle en éléments finis SISYPHE, élément de la chaîne de calcul TELEMAC développée par EDF-LNHE. À partir du champ de courant (TELEMAC-2D) et du champ de houle (TOMAWAC) calculés au préalable, SISYPHE simule le dépôt, l'érosion et le transport, en direction comme en intensité, des sédiments non cohésifs en charriage et suspension, sous l'action combinée de la houle et des courants, ainsi que les évolutions morphologiques en découlent. Le maillage du modèle hydro-sédimentaire est identique à celui du modèle hydrodynamique (cf. §3.4).

L'évolution hydro-sédimentaire est calculée à partir d'une schématisation du cycle annuel des conditions hydrodynamiques :

- Pour les conditions de marée, une morte eau et une vive eau moyennes sont retenues à proportion égale.
- En ce qui concerne les conditions d'agitation, deux types de conditions ont été distingués :
  - Les cas où les conditions de houle ont une faible influence sur la dynamique sédimentaire, c'est-à-dire pour des hauteurs inférieures à 0.5 m (ce qui correspond exactement à la moitié du temps) qui entraînent une vitesse orbitale d'environ 4 cm/s pour une hauteur d'eau de 28 m, ce qui est plus faible que l'incertitude sur les courants. Dans cette situation, nous négligeons l'influence de la houle pour la modélisation sédimentaire.
  - Pour les vagues dont la hauteur est supérieure à 0.5 m, il convient de retenir une hauteur caractéristique. Pour ce faire, nous avons considéré que la relation entre transport solide et hauteur de houle n'est pas linéaire. D'après Soulsby (1997), la hauteur représentative de houle correspond à la moyenne d'ordre 3 de la hauteur s'il s'agit de transport par charriage uniquement, et d'ordre compris entre 3 et 5 s'il s'agit de transport total (charriage + suspension). Nous avons par conséquent retenu une moyenne d'ordre 4 pour la hauteur de houle :  $H_s = 1.6$  m.  
De la même manière, nous avons caractérisé une vitesse orbitale moyenne associée aux hauteurs de houle supérieures à 0.5 m. La moyenne d'ordre 4 nous donne une vitesse orbitale caractéristique de l'ordre de 0.15 cm/s.  
Hauteur de houle et vitesse orbitale permettent alors de déduire une période représentative de l'effet de l'état de mer sur le fond :  $T_p = 8$  s. Bien que ne correspondant à aucun événement rencontré sur le site, ce couple ( $H_s/T_p$ ) résulte d'un compromis conservatif tenant compte à la fois des climats de houle et de mer du vent présents sur le site.  
La provenance retenue est celle correspondant aux provenances des houles les plus fortes au niveau du site étudié, c'est-à-dire la direction ouest nord-ouest ( $N+292.5^\circ$ ).

Les prélèvements réalisés par In Vivo en 2009 indiquent une forte hétérogénéité des sédiments. Ils révèlent également une granulométrie bimodale dont le mode fin correspond à une fraction de sédiment masquée par des éléments plus grossiers (cf. § 2.2.1). La capacité du modèle à prendre en compte ces 2 aspects étant limitée, nous avons réalisé une étude de sensibilité sur le paramètre du diamètre médian de manière à balayer l'éventail des conditions granulométriques présentes sur le site. Nous avons retenu 3 valeurs de diamètre médian pour cette étude : 0.5 mm, 1.5 mm et 4 mm correspondant respectivement aux diamètres médians minimum, moyen et maximum rencontrés sur le site.

D'après la campagne de mesures réalisée dans le secteur du parc éolien par In Vivo en 2009, la cartographie de la couche meuble de sédiments a été établie (cf. Figure 2-2). Les données ponctuelles associées ont été utilisées pour fournir un état initial d'épaisseur sédimentaire pour la modélisation numérique, par interpolation des données sur le maillage de calcul. En dehors de la zone d'étude, l'épaisseur est arbitrairement supposée constante et égale à 2 m ; excepté sur les zones rocheuses émergeant en bas d'estran qui sont supposées non-érotables.

### 5.3.2 RESULTATS DES SIMULATIONS

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

#### 5.3.2.1 Simulations en conditions naturelles

Les simulations réalisées en conditions naturelles servent de référence pour les simulations réalisées avec les ouvrages.

La Figure 5-6 présente le transport solide résultant total, évalué sur l'ensemble d'une marée de vive-eau moyenne (C 95) pour des conditions d'agitation hivernales ( $H_s = 1.6$  m –  $T_p = 8$  s). Ces résultats correspondent à la capacité de transport de sédiments soumis à l'action des courants et de la houle combinés, en supposant qu'un sédiment sableux couvre uniformément les fonds de la baie de Seine. Cette carte a notamment pour intérêt d'illustrer le cheminement des sédiments, en décrivant la vigueur, la direction et le sens du transit (dominance du flot ou du jusant) :

- Sur une marée, on constate que le transport résultant est dominé par la période de flot, où les courants sont plus brefs mais plus vifs que ceux de jusant (cf. §2.3.3). Leur intensité et leur orientation vers le sud-est se répercutent de manière significative sur le transport des sédiments sableux.
- Les secteurs où le transport potentiel est le plus intense se situent au large du parc éolien, où les courants de marée sont relativement importants. Dans le prolongement du Parfond, au nord immédiat de l'emprise du projet, la capacité de transport est plus faible à cause de la profondeur plus importante induisant des courants moyens plus faibles. Le transport s'intensifie alors du nord vers le sud dans le secteur du projet. On retrouve un transport résultant élevé au niveau des roches du plateau du Calvados. Ce sont d'ailleurs des secteurs où les sédiments sableux ont été décapés, et où ne subsistent que des éléments bien plus grossiers, moins mobiles sous l'action des courants, voire des affleurements rocheux (de ce fait, l'évaluation du transport solide ne correspond pas à la réalité – le sédiment n'a pas la bonne dimension – mais le décapage des sables est tout à fait cohérent avec la très forte capacité de transport potentiel de sable que l'on y constate).

A l'est du secteur du projet, les faibles courants rencontrés induisent une capacité du transport limitée.

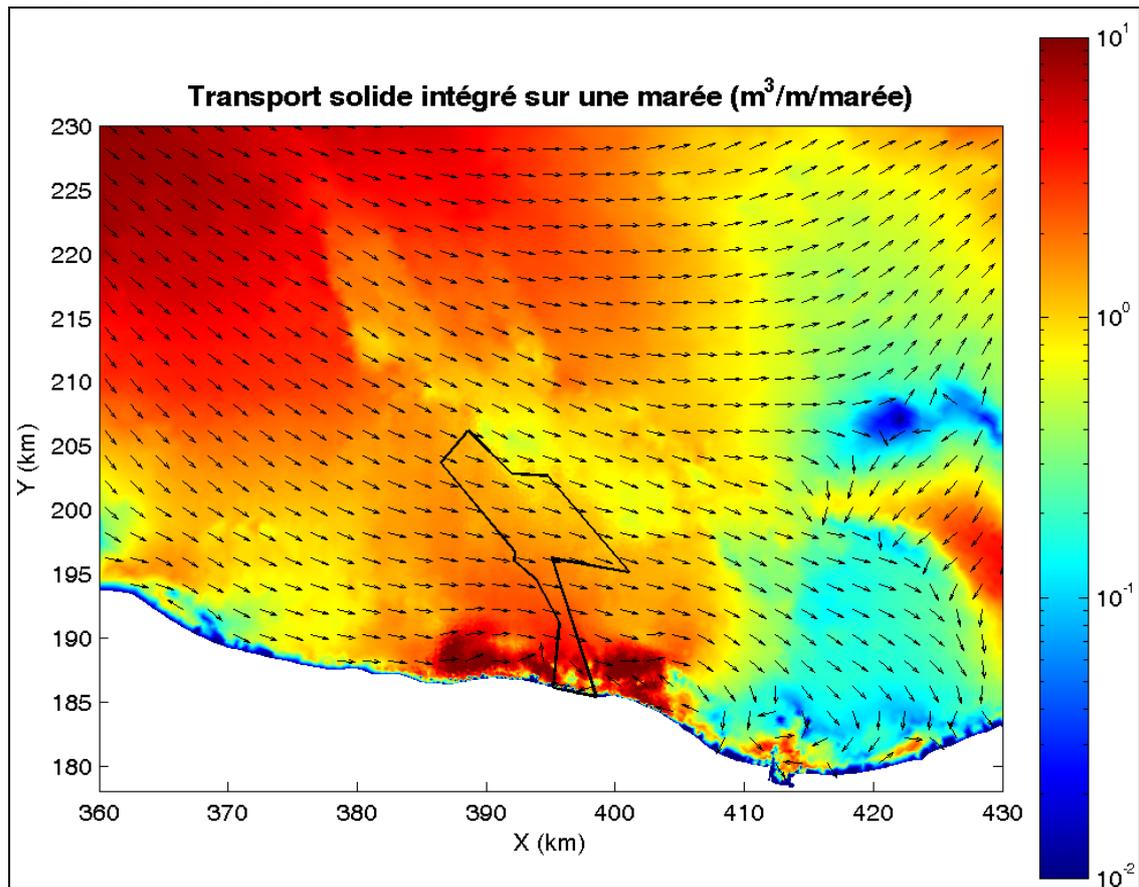


Figure 5-6 : Transport solide intégré sur une marée dans l'état actuel (sans fondation), pour une vive-eau moyenne (C95) et des conditions d'agitation hivernale.

### 5.3.2.2 Simulations avec ouvrages

Seules les fondations gravitaires sont considérées dans les modélisations numériques. L'analyse d'impact pour les fondations jackets est abordée par expertise, à partir de recherches bibliographiques et en s'appuyant sur la modélisation du parc en fondations gravitaires.

Pour évaluer l'impact des fondations sur l'évolution des fonds, on établit la cartographie des écarts d'évolution des fonds entre l'état naturel et l'état aménagé..

#### 5.3.2.2.1 Impacts régionaux

Les Figure 5-7 et Figure 5-8 représentent les écarts d'évolution des fonds induits par la présence des fondations gravitaires à l'échelle régionale, au bout de trente ans de simulation, pour les 2 diamètres médians extrêmes retenus. Les écarts sont évalués en soustrayant les évolutions sans fondations, aux évolutions en présence de fondations. Cela signifie qu'un écart négatif correspond à un affouillement des fonds dû aux fondations. Réciproquement, un écart positif équivaut à une accrétion des fonds liée à ces fondations.

Pour mettre en avant les endroits où les fonds sont le plus fortement modifiés, les zones où les écarts sont inférieurs à 5 cm sont laissées blanches. Ce seuil correspond à une évolution moyenne de moins de 2 mm/an, ce qui – à l'échelle de la modélisation numérique – est une précision difficilement accessible. Les figures montrent que la présence des fondations ne modifie pas la morphologie des fonds à l'échelle régionale de plus de 5 cm par rapport aux évolutions naturelles – et ce quel que soit le diamètre médian des sédiments considéré pour les simulations

numériques. La présence des fondations gravitaires n'affecte l'évolution des fonds que très localement autour des fondations et ne perturbe donc pas l'évolution naturelle des fonds au-delà de la zone d'implantation du parc éolien.

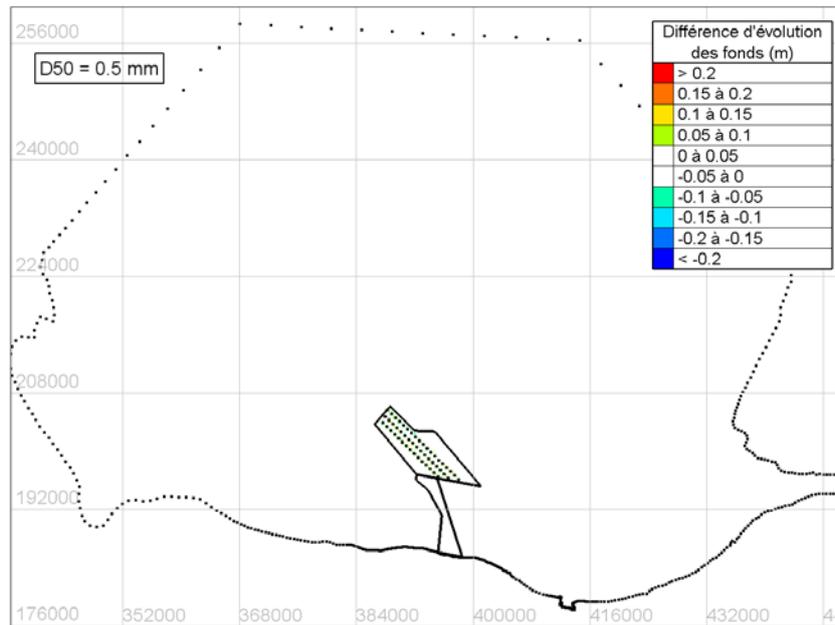


Figure 5-7 : Impacts régionaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation entre l'état naturel et le parc éolien (fondations gravitaires) pour un diamètre médian de 0.5 mm.

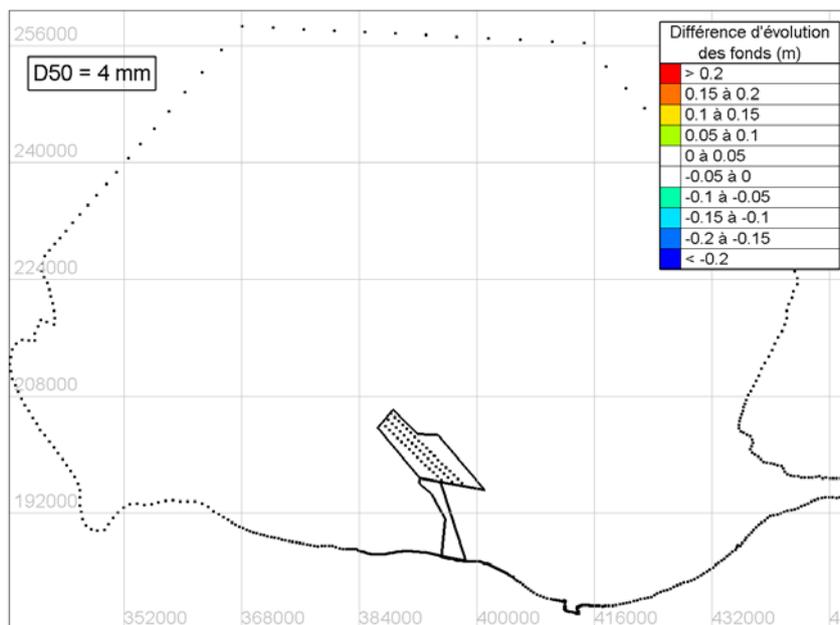


Figure 5-8 : Impacts régionaux : écarts d'évolution des fonds au bout de 30 ans de simulation entre l'état naturel et le parc éolien (fondations gravitaires) pour un diamètre médian de 4 mm.

### 5.3.2.2.2 Impacts locaux, abords des fondations

Les Figure 5-9 et Figure 5-10 montrent l'impact des fondations d'éoliennes à l'échelle locale. On constate que les différences d'évolution des fonds sont d'autant plus importantes que le diamètre médian est faible, ce qui est cohérent puisque les sédiments fins sont plus sensibles aux forçages hydrodynamiques. A cette échelle spatiale, pour un diamètre médian donné, les différences d'évolution simulées sont relativement homogènes sur l'ensemble de la zone d'étude, étant

donné l'homogénéité des conditions hydrodynamiques (houle et courant). Pour le plus gros diamètre (4 mm), les différences d'évolution des fonds sont très faibles et restent inférieures au seuil de 5 cm sur 30 ans de simulation. Pour le diamètre le plus fin, les évolutions autour d'une fondation donnée semblent rejoindre les évolutions constatées sur les fondations voisines mais pour des valeurs restant très faibles (5 à 10 cm sur 30 ans).

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

Il a été montré précédemment (§ 3.7) que la présence des fondations avait pour conséquence de ralentir le courant en aval de la fondation, c'est-à-dire à l'ESE pendant le flot et à l'ONO de la fondation pendant le jusant. Le ralentissement de l'écoulement entraîne un dépôt de sédiments. Les Figure 5-9 et Figure 5-10 indiquent la tendance des évolutions obtenues au bout de 30 ans de simulation au pied de la fondation A15 pour les 2 diamètres médians extrêmes utilisés. Cette fondation a été choisie car c'est l'une de celles où l'épaisseur de sédiments est la plus grande. On constate pour le diamètre médian le plus faible que les dépôts se forment aux endroits où l'écoulement ralentit, c'est-à-dire dans le sillage de flot et de jusant de chaque fondation. De la même manière, l'écoulement s'accélère latéralement, de chaque côté de la fondation, et les fonds s'affouillent à ces endroits.

La dominance du courant de flot sur celui de jusant provoque une répartition différente des dépôts à l'est et à l'ouest de la fondation. Pour les simulations réalisées avec un diamètre médian de 0.5 mm (cas le plus défavorable), l'intensité du courant de flot entraîne un dépôt de sédiment supérieur à 0.5 mètre sur environ 150 mètres à l'est de la fondation ; tandis que le courant de jusant, moins intense, limite l'accrétion à 100 mètres à l'ouest de la fondation mais les dépôts y sont plus marqués. La zone d'érosion a une emprise d'environ 100 mètres et s'étend également sur une zone plus vaste à l'est de la fondation.

Les séries temporelles des Figure 5-9 à Figure 5-10 montrent l'évolution sédimentaire à la base des fondations, pour différents points situés aux endroits où le sédiment se dépose (points 1, 2 et 3) et où il s'érode (points 4 et 5). La dynamique est linéaire au cours du temps, aussi bien pour les dépôts que pour les érosions, tant que la couche superficielle de sédiments n'a pas été complètement érodée (cf. Figure 5-9). Pour le diamètre médian le plus faible (0.5 mm), on constate un ralentissement de la sédimentation (points 2 et 3 essentiellement) lié à l'érosion complète de la couche meuble de sédiments au bout d'une dizaine d'années environ. A partir de cet instant, le rythme des évolutions ralentit progressivement pour atteindre un état de quasi-équilibre. La fosse d'érosion s'étend cependant au fil du temps, ce qui entraîne la propagation du bourrelet sédimentaire qui résulte de ces érosions. Dans le cas des diamètres médians 1.5 mm et 4 mm, les évolutions sont plus faibles et n'atteignent pas le 'bed rock' au cours des 30 ans de simulations. Cependant pour des fondations situées à des endroits où l'épaisseur de sédiments est plus faible, il arrive que cette limite soit atteinte.

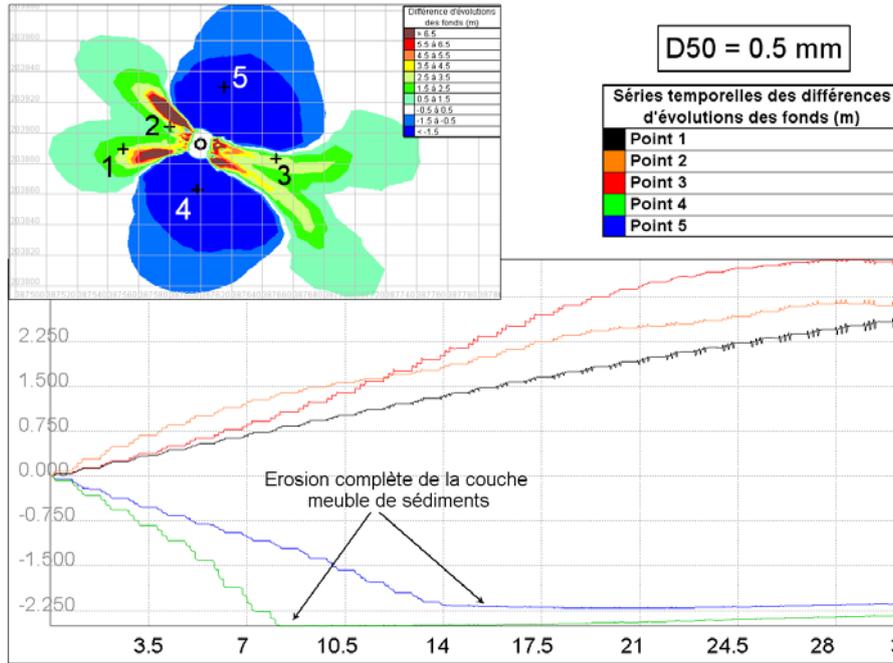


Figure 5-9 : Impacts locaux : Séries temporelles des différences d'évolutions des fonds à différents endroits autour de la base d'une fondation gravitaire pour un diamètre médian de 0.5 mm. L'échelle de temps est en année.

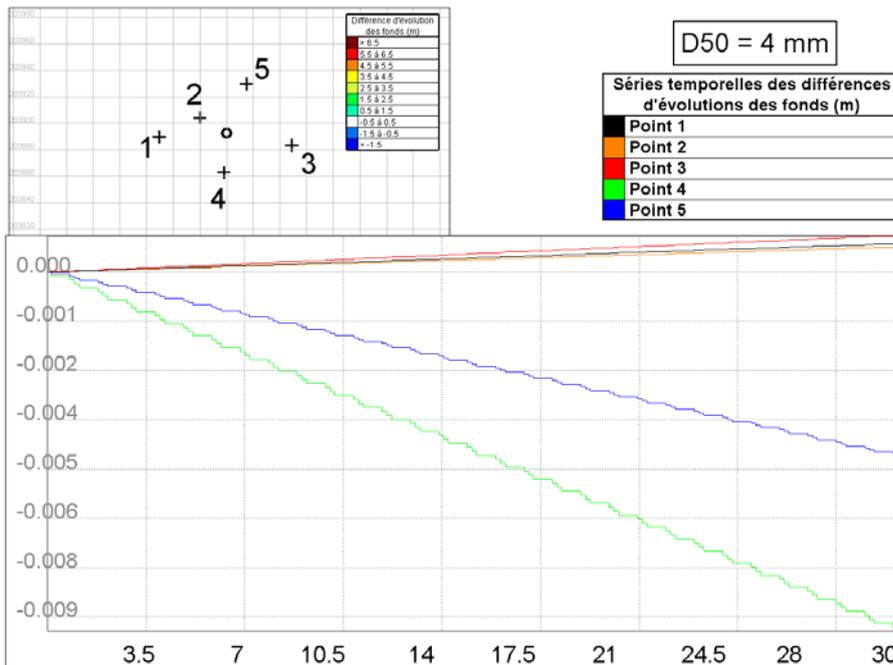


Figure 5-10 : Impacts locaux : Séries temporelles des différences d'évolutions des fonds à différents endroits autour de la base d'une fondation gravitaire pour un diamètre médian de 4 mm. L'échelle de temps est en année.

### 5.3.3 DISCUSSION ET SYNTHÈSE

La modélisation mise en œuvre ici est affectée d'une limitation assez nette au niveau de la représentation des phénomènes locaux autour des fondations : en particulier, tous les aspects tridimensionnels de l'écoulement ne peuvent être pris en compte – et il n'est techniquement pas envisageable de recourir à une modélisation tridimensionnelle avec autant de mailles et des pas de temps aussi courts que le nécessite la bonne simulation des ouvrages.

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

- les fondations n'ont pas d'effet sur les fonds hors de l'emprise du champ d'éoliennes,
- à l'intérieur du champ d'éoliennes, il n'y a pas d'interaction entre les impacts sédimentaires des différentes fondations pour des niveaux significatifs d'évolution,
- les impacts les plus forts sont attendus vers les extrémités Nord et Sud (courants les plus forts) du champ d'éoliennes, ainsi qu'aux endroits où l'épaisseur de sédiment est la plus forte,
- l'emprise des secteurs impactés est sensiblement plus étendue dans le cas de sédiments fins.

## 5.4 INTERACTION ENTRE LE PROJET ET LES FONDS MARINS – PROTECTIONS ENVISAGEABLES

### 5.4.1 CARACTERISTIQUES DU PROJET

Le projet comporte 50 éoliennes réparties sur 3 lignes orientées NW-SE. L'espacement entre 2 lignes est de 945m ; l'espacement entre 2 éoliennes d'une même ligne est de 756 m. Le niveau des fonds est compris entre - 22 m CM et - 28 m CM.

En ce qui concerne les éoliennes, les études conceptuelles ont conduit à envisager deux types de fondation :

- fondation gravitaire en béton ballasté (Doris Engineering, document DHD-0882, 2009) comportant une embase cylindrique de 1 m de hauteur et de diamètre 33 m (fonds de - 20 m CM) ou 34 m (fonds de - 28 m CM, surmontée d'un élément conique de 17 m de hauteur, d'un diamètre passant de 18 m à la base à 6,50 m au sommet, puis d'un élément cylindrique de 6,50 m de diamètre.
- fondation par « jacket » à 4 jambes cylindriques légèrement obliques (OWEC TOWER AS, 2009), ces 4 jambes formant un carré de 18 m de côté (fonds situés au-dessus de - 22,7 m CM) à 19 m de côté (fonds situés sous – 22,7 m CM).

Quant au poste de transformation, la fondation est également :

- soit de type gravitaire, similaire à celles des éoliennes de même type, avec cependant une embase moins large (diamètre 28 m,
- soit de type jacket, avec une distance de 19 m entre « jambes » au niveau du fond.

Enfin, la fondation du mât de mesure est de type cylindrique monopieu, avec un diamètre de 1,83 m.

### 5.4.2 IMPACT SEDIMENTAIRE ET APERCU DES MOYENS DE PROTECTION ANTI-AFFOUILLEMENT

#### 5.4.2.1 À proximité immédiate des fondations

##### *5.4.2.1.1 Mécanismes d'affouillement*

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

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

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

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

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

#### 5.4.2.1.2 Caractéristiques de l'affouillement

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

#### Cas des fondations gravitaires

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

Le rapport entre la profondeur maximale d'érosion et le diamètre de la fondation est bien plus faible que dans le cas de pieu étroit ; en houle seule, l'érosion maximale s'observe en périphérie de l'obstacle, à 45° par rapport à l'axe de l'écoulement. Dans le cas présent, compte tenu des conditions de houle, la profondeur d'érosion serait inférieure à 5% du diamètre de la fondation.

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

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

Pour conclure, l'érosion maximale pourrait atteindre 5 à 10 % du diamètre de la base de la structure, soit de l'ordre de 1 à 2 m ; cependant la présence de l'embase de 33 à 34 m de diamètre (éolienne) ou de 28 m (poste de transformation) devrait réduire cette érosion maximale en la reportant en périphérie de cette semelle. L'emprise de la zone érodée serait une couronne de l'ordre de 20 et 35 m de large comptés à partir de la périphérie de la fondation.

### Cas des fondations de type « Jacket »

Ce cas est moins bien documenté que celui des fondations monopieux et gravitaires. Les informations disponibles proviennent donc principalement d'observations sur site.

Pour ce type de fondation, une particularité concerne la différenciation entre :

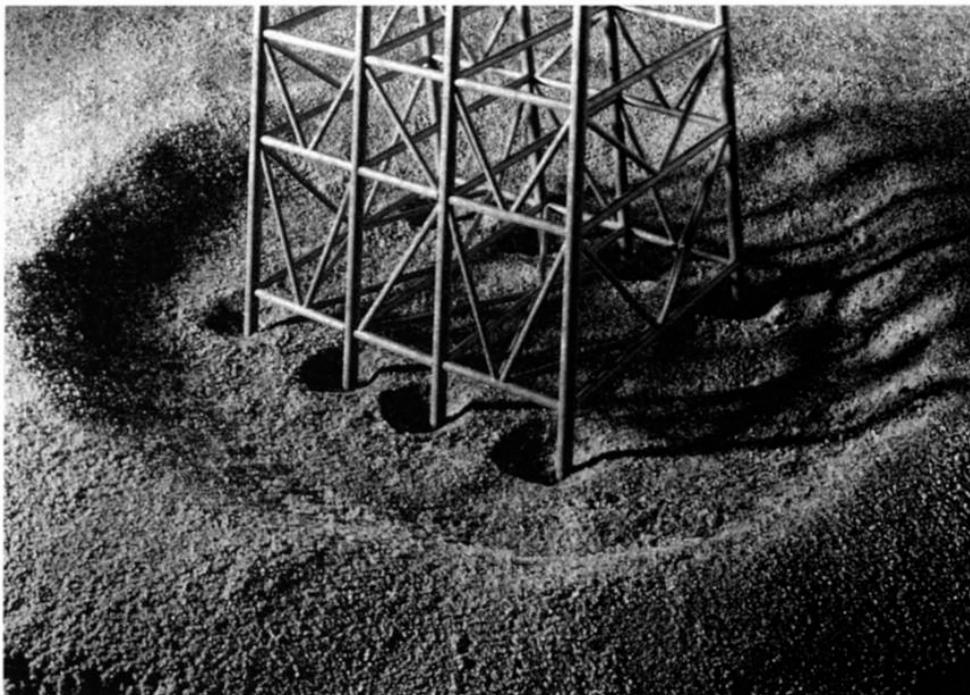
- l'affouillement local – directement provoqué par les jambes de la structure,
- et l'affouillement global - résultant de l'interaction entre l'écoulement et l'ensemble des éléments de la structure.

Les affouillements locaux sont situés autour de chacun des pieds, sur une emprise assez limitée ; par contre, l'affouillement global est en forme de « soucoupe », et déborde largement de l'emprise de l'ensemble de la fondation. La Figure 5-11 donne une représentation conceptuelle d'ensemble de ces affouillements, d'après Angus *et al.* (1982, *in* Whitehouse, 1998).

Parmi les observations sur site, notons celles rapportées par Keith Philpott Consulting (1986) :

- érosion en forme de « soucoupe » d'une profondeur allant jusqu'à 3,6 m sur l'une des plateformes examinées dans le golfe du Mexique,
- érosion de 3 m autour des jambes de plateforme Nordpipe AS dans le Sud-Est de la mer du Nord.

Enfin, l'érosion autour de deux structures jackets en Mer du Nord, par des profondeurs de 25 m, a fait l'objet de plusieurs levés bathymétriques (Rudolph *et al.*, 2004). L'érosion atteint jusque 5 m. L'emprise de l'affouillement global est de l'ordre de 50 m dans toutes les directions pour une emprise de la fondation de 17 m \* 20 m.



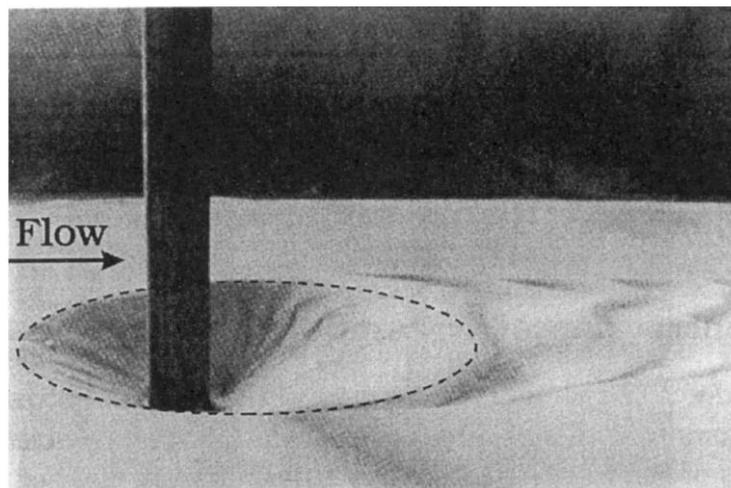
**Figure 5-11 : Représentation conceptuelle de l'ensemble des affouillements – local et global – dans le cas d'une fondation de type jacket, d'après Angus *et al.*, 1982**

La profondeur d'érosion est donc bien plus importante que celle qui proviendrait de chaque pieu pris isolément – ce que corroborent, d'une manière générale, les observations réalisées par

WL/Delft Hydraulics dans le cadre de ses différentes études en Mer du Nord : il y aurait un facteur de 3 à 4 entre les profondeurs d'affouillement observées et celles qui sont prédites dans le cas d'une fondation isolée de même diamètre que les jambes de la structure.

#### Cas du mât de mesure

Il s'agit d'une fondation de type « étroite », compte tenu du rapport entre son diamètre et la profondeur d'eau. Les caractéristiques de l'affouillement potentiel sont liées principalement au courant : la fosse d'affouillement prend à l'équilibre une forme sensiblement conique autour du pieu (cf. Figure 5-12). La profondeur maximale de la fosse est de l'ordre de 1,3 D à 1,4 D (D étant le diamètre du pieu) lorsque le pieu est cylindrique (Soulsby, 1997). Son étendue est d'environ 3 D à l'amont par rapport au courant, et de 5 D à l'aval.



**Figure 5-12 : Fosse d'érosion autour d'un pieu, développé en courant seul (d'après Eadie et al., 1986, in Sumer et al., 2002)**

Dans le cas présent, le diamètre de la fondation est de 1,83 m : la profondeur maximale de la fosse d'érosion serait donc de l'ordre de 2,5 m si la couche sédimentaire meuble était suffisamment épaisse. Mais elle n'est en réalité que d'environ 1,25 m à proximité du mât de mesure : la fosse d'érosion sera donc limitée à cette profondeur.

#### *5.4.2.1.3 Esquisse des moyens de protection contre l'affouillement*

Si nécessaire, différentes sortes de dispositifs anti-affouillement sont envisageables dans le cas de structures de type cylindrique (Whitehouse, 1998) :

- radier de protection,
- tapis d'enrochements,
- dispositif de dissipation d'énergie de l'écoulement,
- amélioration de la résistance du sol.

Dans le cas spécifique de la fondation gravitaire, il peut être avisé de prévoir, sous la semelle, une jupe verticale, ou bêche, permettant d'empêcher le balancement cyclique de la structure : en effet celui-ci peut alors conduire à la liquéfaction des sols (lorsque ceux-ci sont constitués de sédiments fins), entraînant l'enlèvement de sédiments (Sumer *et al.*, 2002).

Les avantages spécifiques du tapis d'enrochements sont nombreux :

- sa souplesse (il s'adapte aux éventuels affouillements en périphérie de tapis, voire même aux érosions naturelles de grande emprise),
- sa résistance aux actions mécaniques (chocs, ancrés ou chaluts qui traînent sur le fond, cisaillement par les câbles d'ancre ...),
- la facilité d'éventuels confortements ou extensions, si le suivi en montrait la nécessité,
- sa durée de vie (pas de problèmes de vieillissement),
- l'existence de règles de dimensionnement, éprouvées par de nombreuses réalisations,
- l'effet de "récif".

Le tapis d'enrochements doit résister à l'action de la houle. D'après les formules de stabilité, la protection des fonds vis-à-vis des conditions de mer les plus sévères pourrait être assurée par une double couche d'enrochements de 50 à 100 kg (soit des dimensions de l'ordre de 0,3 m à 0,4 m par couche), reposant sur un filtre d'enrochements ou géotextile.

Cette analyse ne donne qu'un ordre de grandeur du poids des enrochements ; un dimensionnement plus précis devrait s'appuyer en outre sur les conditions d'un véritable entraînement des blocs (et non d'un simple début d'oscillations), sur une évaluation plus précise du renforcement de la contrainte sur le fond provoquée par la présence de la fondation ...

Le tapis d'enrochements devrait s'étendre sur environ 25 à 30 m autour de la fondation si l'on souhaitait empêcher totalement l'érosion des fonds induite par celle-ci – dans le cas où la prévention de l'érosion paraît nécessaire ; cependant, en raison de sa capacité d'adaptation géométrique à l'érosion des fonds à sa périphérie, une étendue plus faible, de l'ordre de la quinzaine de mètres, est envisageable, et permettrait même de s'adapter à une éventuelle lente érosion naturelle des fonds marins.

Une technique récente (protection anti-affouillement dynamiquement stable) est également proposée par CIRIA (2007), dans le cadre de la protection des fondations gravitaires : le recours à une couche d'enrochements de plus petite catégorie, susceptible d'être érodée, mais disposée sur une couche dépassant la profondeur d'érosion potentielle ; en quelque sorte une protection remodelable, sur le modèle des « berm breakwaters ». Outre l'utilisation d'enrochements de petit calibre, cette technique présente l'intérêt d'être d'une maintenance aisée, par le recours au déversement d'enrochements additionnels.

#### *5.4.2.1.4 Examen des risques potentiels selon la localisation des éoliennes*

##### Effet de la dynamique sédimentaire naturelle

Comme indiqué au § 5.2.2, les fonds marins sont en moyenne assez stables. Finalement, c'est uniquement dans les secteurs où se trouvent des ondulations de sable (bancs, dunes ou mégarides) que la cote du fond peut évoluer sensiblement dans le temps (en dehors de l'évolution liée à l'impact des fondations), du fait de la migration naturelle de ces ondulations.

Or la nature des fonds (hétérogène avec beaucoup d'éléments grossiers) et la faible épaisseur de la couche meuble sont peu propices à la formation de telles formes de fond. Effectivement, les seules figures sédimentaires décelées par In Vivo sont des mégarides de petites dimensions (2 à 5 m de longueur d'onde), de faible emprise, situées dans les rares fonds de sable pur. De plus, ces quelques figures sont situées à distance des fondations d'éoliennes.

Il n'y a donc pas lieu de tenir compte de la migration de dunes et mégarides pour situer la base des fondations gravitaires.

### Effet de l'épaisseur de la couche sédimentaire

La faible épaisseur de la couche sédimentaire limite les risques de déstabilisation liés à l'affouillement en périphérie du tapis d'enrochements disposés autour des fondations, dans le cas où ce tapis serait de faible emprise. A cet égard, il y a lieu de soigner plus particulièrement les fondations dans les secteurs où l'épaisseur de la couche sédimentaire meuble est la plus importante (cf. Figure 2-2) :

- éoliennes A14 et A15 ; poste de transformation, où cette épaisseur est de l'ordre de 2,5 m,
- éoliennes A12, B11 et C06, où l'épaisseur est comprise entre 1,5 et 2 m.

Excepté pour ces différentes structures, la faible épaisseur de la couche sédimentaire permet de réduire l'emprise du tapis d'enrochements à une dizaine de mètres depuis la périphérie de la fondation.

#### 5.4.2.2 A distance des fondations

##### *5.4.2.2.1 Effet du courant*

Les résultats de la simulation numérique (cf. § 5.3) montrent que l'impact des fondations se réduit rapidement avec la distance à ces fondations. L'impact sur les fonds n'est pas perceptible en dehors du champ d'éoliennes, que ce soit en pleine mer ou dans le secteur littoral.

##### *5.4.2.2.2 Effet de la houle*

L'effet de la houle est surtout manifeste à proximité immédiate des fondations – dans la zone où une protection des fonds est envisagée. A plus grande distance, cet effet est moins sensible que celui dû aux courants.

A la côte, l'impact sous l'effet de la houle est plus faible que les écarts liés aux variabilités interannuelles du climat de houle : elle n'aura donc pas d'impact notable dans le domaine littoral.

#### 5.4.2.3 Protection du câble

Il est conseillé de protéger le câble contre les agressions extérieures (arrachage par les ancres de navires ou chaluts, cisaillement par les chaînes d'ancrage, actes de malveillance ...). De plus, dans le secteur rocheux, il serait bon d'éviter l'usure sur les fonds, surtout dans la zone de déferlement.

Selon que l'on néglige ou que l'on considère la nécessité d'une protection contre les ancres de cargo, un ensouillage de 1 m ou de 2 m sous les fonds les plus bas attendus pendant la durée de vie du projet devrait être suffisant pour se prémunir contre ces agressions. Compte tenu de l'érosion potentielle pendant cette durée de vie (au maximum de l'ordre de 0,50 m), cette profondeur d'ensouillage est de 1,5 m ou de 2,5 m – selon que l'on néglige ou non le risque « cargo » - sous les fonds actuels.

Dans les secteurs où l'épaisseur de sédiments est inférieure à la profondeur d'ensouillage recommandée (1,5 m ou 2,5 m selon l'option retenue), la mise en place du câble dans une tranchée creusée sur un minimum de 1 mètre de profondeur, remplie ensuite d'enrochements, garantirait contre les risques de sa détérioration.

## 6 SYNTHÈSE ET CONCLUSION

L'étude réalisée par Actimar et Bernard Latteux en 2009 visait à évaluer l'impact du projet de parc éolien de la baie de Seine, situé à une dizaine de kilomètres de la côte, sur les conditions hydrodynamiques et sédimentaires de la zone, pour 2 types de fondations (gravitaire conique et jacket).

Le parc éolien, tel que défini en 2009, a un impact faible sur l'hydrodynamique. Les résultats du modèle mettent en évidence une réduction de la vitesse du courant en aval des aérogénérateurs. Cette réduction est inférieure à 10% au-delà de 500 m d'une fondation ; elle est inférieure à 1% au-delà de 2 à 3 kilomètres des fondations. Une analyse qualitative montre par ailleurs que les fondations jacket sont approximativement deux fois moins impactantes sur l'hydrodynamique que les fondations gravitaires.

L'atténuation de l'énergie des états de mer est plus ou moins marquée en fonction de l'incidence des vagues par rapport à la centrale éolienne. Elle est la plus prononcée pour les vagues en incidence du NO qui vont se propager approximativement au travers de 17 rangées de 3 éoliennes ; par contre, la zone impactée sera plus étroite qu'en incidence de NE où l'atténuation sera plus faible. Pour les états de mer les plus forts et les plus fréquents en incidence d'ONO, on estime une réduction de la hauteur des vagues de 2.5 % en aval de l'ensemble des fondations jackets et 5.3 % en aval des fondations gravitaires. L'impact est approximativement du même ordre de grandeur que la variabilité naturelle des états de mer (6.7%) pour les fondations gravitaires ; mais plus faible pour les fondations jackets.

Enfin, sur les aspects sédimentaires, la présence des fondations n'affecte l'évolution des fonds que très localement autour des fondations et ne perturbe donc pas l'évolution naturelle des fonds au-delà de la zone d'implantation du parc éolien. L'impact à l'échelle régionale est infime (écart d'évolution des fonds inférieur à 5 cm au bout de 30 ans). Au voisinage des fondations, étant donné la forte variabilité de la granulométrie des sédiments que l'on peut trouver sur la zone d'implantation des éoliennes, une étude de sensibilité au diamètre médian du sédiment a été menée. Plus le sédiment est fin, plus il est aisément transporté par l'action des courants et de la houle, et plus les évolutions constatées sont importantes. Trois diamètres médians ont été testés : 0.5 mm, 1.5 mm et 4 mm, couvrant l'ensemble de la gamme de sédiments que l'on retrouve sur la zone d'étude. Les évolutions morphologiques augmentent de 30 à 50% pour un sédiment de 0.5 mm par rapport à celui de 1.5 mm. En revanche, les évolutions simulées pour un sédiment de diamètre 4 mm sont très faibles.

L'étude menée en 2009 par Actimar a été réalisée à partir d'un descriptif de projet assez précis, qui est présenté dans cette synthèse. Les conclusions de l'étude sont susceptibles d'évoluer avec le projet.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **ACTIMAR** (2008) – « Metocean Design Criteria for Offshore Wind Farm in the Baie de Seine ». Rapport 08.23.
- [2] **ACTIMAR** (2009). Rapport n°08.23 v2.0. Etude météo océanique pour un projet de centrale éolienne offshore dans la baie de Seine.
- [3] **Aminot A., Guillaud J.F., Kérouel R.** (1997) – « La baie de Seine : hydrologie, nutriments et chlorophylle (1978-1994). Publication IFREMER.
- [4] **Angus N.M., Moore R.L.** (1982) – « Scour repair methods in the Southern North Sea ». Proc.14<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas, May 3-6, 1982, Paper N° 4410, pp. 385-399.
- [5] **Auffret J.P., Alduc D.** (1977) – « Ensembles sédimentaires et formes d'érosion du Quaternaire sous-marin de la Manche orientale ». Bulletin de l'Association française pour l'étude du quaternaire, Volume 14, N° 4, pp 71-75.
- [6] **Auffret J.P., Alduc D., Larsonneur C., SMITH A.J.** (1982) – « La Manche orientale, carte des paléovallées et des bancs sableux au 1/500 000 ». Cnexo-BRGM.
- [7] **Avoine J.** (1994) – « Synthèse des connaissances sur l'estuaire de la Seine. Sédimentologie ». Rapport IFREMER-PAH, 154 p.
- [8] **BCEOM** (1973) – « Le littoral français – dommages côtiers – ouvrages de défense ».
- [9] **CIRIA** (2007) – « The Rock Manual : The Use of Rock in Hydraulic Engineering ». C683
- [10] **De Vos L., Frigaard P., De rouck J. (2007).** Wave run-up on cylindrical and cone shaped foundations for offshore wind turbines. Coastal Eng. 54. pp. 17-29.
- [11] **DHI** (1999). Horns Rev Wind Power Plant. Environmental impact assessment of hydrography.
- [12] **Haddorp R.** (2005). Predictability of Scour at Large Piles due to Waves and Currents. Diploma Thesis. Delft University of Technology.
- [13] **Hoffmans G.J.C.M., Verheij H.J.** (1997) – « Scour Manual », Rotterdam.
- [14] **In Vivo** (2009) – « Etude d'impact pour l'implantation d'une centrale éolienne en mer en baie de Seine ».
- [15] **Jardin G.** (1995) – « Réalisation de la carte des sédiments superficiels en baie de Seine ». Mémoire de maîtrise, Université de Caen, Laboratoire de géologie Marine.
- [16] **Keith Philpott Consulting Limited with Acres Consulting Services Limited** (1986) – « Scour around seafloor structures ». Environmental Studies Revolving Funds Report 017. Ottawa. 249 p.
- [17] **Larsonneur C., Vaslet D., Auffret J.P.** (1978) – « Les sédiments superficiels de la Manche. Carte à l'échelle du 1/500 000 ». Ed. CNEXO-BRGM.
- [18] **LCHF** (1986) – « Catalogue sédimentologique des côtes françaises – Côtes de la Mer du Nord et de la Manche – partie C : de la baie de Seine au Mont-Saint-Michel ». Collection des Etudes et Recherches d'EDF – Eyrolles, n° 61.

- [19] **Lesueur P., Lesourd S.** (1999) – « Programme Scientifique Seine aval - Fascicule 3 – Sables, chenaux, vasières ... : dynamique des sédiments et évolution morphologique ».
- [20] **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.
- [21] **Offshore Center Danmark** (2006) – « Offshore Wind Turbines situated in Areas with Strong Currents ». Doc. N° 6004RE01ER1.
- [22] **OWEC TOWER AS** (2009) – « OWEC Jacket Quattopod – St Brieuc - Basic Design ».
- [23] **de Rouville A.** (1946) – « Le régime des côtes – Eléments hydrographiques des accès des ports ». Dunod.
- [24] **Rudolph D., Bos K.J., Luijendijk A.P., Rietema K., Out J.M.M.** (2004) – « Scour around offshore structures – analysis of field measurements ». 2<sup>nd</sup> International Conference on Scour and Erosion, Chiew, Lim and Cheng (Eds), Singapore, pp. 400-407.
- [25] **Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM)** (2005) – « Carte 7421 G - Carte de nature de fond – de la pointe de la Percée à Ouistreham ».
- [26] **Simon B.** (1994) – « Statistiques des niveaux marins extrêmes le long des côtes de France ». Rapport d'étude SHOM n° 001/94.
- [27] **Soulsby R.** (1997) – « Dynamics of marine sands. HR Wallingford ». *Thomas Telford Publications*.
- [28] **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.
- [29] **USACE** (2003) – « Coastal Engineering Manual, Part VI, Chapter 5 ».
- [30] **Whitehouse R.** (1998) – « Scour at marine structure - A manual for practical applications ». Thomas Telford, 198 pp.