




Cahier des expertises

Volet hydrodynamique et
hydrosédimentaire

Mai 2017 complété en mars 2018

 <p>BRL Ingénierie</p>	<p>BRL ingénierie 1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5</p>
<p>Cotraitant</p>	<p>Benoit Waeles Consultant Génie Côtier</p>

Sommaire

1 INTRODUCTION	1
2 DONNEES DE BASE	5
2.1 Bathymétrie	7
2.2 Bathymétrie pour les modélisations 3D	9
2.3 Les niveaux d'eau	10
2.4 Courantologie	13
2.5 Etat de mer	16
2.6 Nature de la couverture sédimentaire	19
2.7 Structure 3D fondation jacket	22
3 ÉVALUATION DES IMPACTS HYDRODYNAMIQUES ET HYDROSEDIMENTAIRES	23
3.1 Courants de marée	26
3.2 États de mer	38
3.3 Dynamique sédimentaire à l'échelle régionale	45
3.4 Dynamique sédimentaire à l'échelle d'une fondation	54
3.5 Qualité des eaux	65
4 SYNTHÈSE ET CONCLUSION	91
5 ANNEXES	95
5.1 Annexe 1 – Calage du modèle hydrodynamique – Comparaison des résultats du modèle TELEMAC-2D et du programme Previmer pour un coefficient 95	97
5.2 Annexe 2 : Propagation des houles de large à la côte – Résultats Tomawac – Etat initial	110
5.3 Annexe 3 : Propagation des houles du large à la côte – Résultats Tomawac – Etat aménagé	113
5.4 Annexe 4 : Modélisation des capacités de transport instantané – Granulométrie 500µM	115

5.5 Annexe 5 : Modélisation des capacités de transport instantané – Granulométrie 2000μM	117
5.6 Annexe 6 : Modélisation des capacités de transport instantané – granulométrie 315μm	119
5.7 Annexe 7 : Évolution du panache après la dispersion (1000m³) – Temps exprimé en heures à partir de la fin d’une opération– Éolienne 5	121

Table des illustrations

LISTE DES FIGURES

Figure 1 – Parc éolien Dieppe et le Tréport : schéma d’implantation des 64 fondations	3
Figure 2 – Bathymétrie sur l’aire immédiate du parc	7
Figure 3 - MNT Bathymétrie de la façade Atlantique - HOMONIM	8
Figure 4 – Répartition des données bathymétriques collectées pour l’étude.....	9
Figure 5 – Cartes des sites de la zone de marée.....	10
Figure 6 - Niveaux extrêmes de pleine mer (période de retour 100ans).....	12
Figure 7 – Courants de marée – Maximum de flot à Dieppe.....	14
Figure 8 - Courants de marée – Maximum de jusant à Dieppe.....	15
Figure 9 – Localisation du point ANEMOC COAST 2162	16
Figure 10 – Corrélogramme hauteur significative / direction de provenance – Point ANEMOC COAST n°2162	17
Figure 11 – Roses des houles au point ANEMOC 2162	17
Figure 12 – Hauteur significative et direction des vagues le 08/02/2016 à 18:00 (Du Cap d’Antifer au Cap Gris-Nez)	18
Figure 13 – Nature des fonds	19
Figure 14 – Nature des fonds au niveau de l’air immédiate	20
Figure 15 – Textures sédimentaires révélées par les campagnes in situ	21
Figure 16 : Géométrie 3D du jacket et de ses fondations	22
Figure 17 – Emprise du modèle numérique	27
Figure 18 – Maillage global	28
Figure 19 – Détail du maillage au niveau du parc	29
Figure 20 – Maillage pour une éolienne fondation jacket.....	29
Figure 21 – Comparaison des cotes d’eau calculées et prédites au niveau du port de Dieppe	31
Figure 22 – Comparaison des cotes d’eau mesurées au droit de l’ADCP et calculés par le modèle TELEMAC-2D.....	31
Figure 23 – Comparaison des champs de courants calculés par le modèle TELEMAC-2D et issus de l’atlas des courants de marée (SHOM), pour un coefficient 95	32
Figure 24 – Comparaison des champs de courants calculés par le modèle et indiqués dans l’atlas des courants de marée (SHOM), pour un coefficient 95	33
Figure 25 – Différentiel des vitesses au maximum de flot – fondation jacket	34
Figure 26 – Différentiel des vitesses au maximum de jusant – fondation jacket.....	35
Figure 27 – Différentiel des vitesses au maximum de flot zoomé sur les fondations jacket	36

Figure 28 – Différentiel des vitesses au maximum de jusant zoomé sur les fondations jacket	36
Figure 29 – Variation spatiale de hauteur significative lors de la tempête Ruzica à 18:00 (Du Cap d'Antifer au Cap Gris-Nez)	39
Figure 30 – Variation spatiale de hauteur significative lors de la tempête du 15/02/2016 à 08 :00 (Du Cap d'Antifer au Cap Gris-Nez)	39
Figure 31 – Comparatif entre les prévisions PREVIMER et le modèle TOMAWAC – Tempête Ruzica à pleine mer pour l'état initial	40
Figure 32 – Comparatif entre les prévisions PREVIMER et le modèle TOMAWAC – Tempête Ruzica à basse mer pour l'état initial	40
Figure 33 – Comparatif entre les prévisions PREVIMER et le modèle TOMAWAC – Le coup de vent de Nord-Est à pleine mer pour l'état initial	41
Figure 34 – Comparatif entre les prévisions PREVIMER et le modèle TOMAWAC – Le coup de vent de Nord-Est à basse mer pour l'état initial	41
Figure 35 – Différentiel des hauteurs significatives à pleine mer – Tempête Ruzica – Fondation jacket	42
Figure 36 – Différentiel des hauteurs significatives à basse mer – Tempête Ruzica – Fondation jacket	42
Figure 37 – Différentiel des hauteurs significatives à pleine mer – Evènement de Nord-Ouest – Fondation jacket	43
Figure 38 – Différentiel des hauteurs significatives à basse mer – Evènement de Nord-Ouest – Fondation jacket	43
Figure 39 - Transport instantané au maximum de flot pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 315µm	46
Figure 40 - Différentiel du transport instantané au maximum de flot – jacket – granulométrie 315µm	47
Figure 41 - Transport instantané au maximum de jusant pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 315µm	47
Figure 42 - Différentiel du transport instantané au maximum de jusant – jacket – granulométrie 315µm	48
Figure 43 – Transport instantané au maximum de flot et de jusant sans prise en compte de la houle – 500µm	48
Figure 44 - Transport instantané au maximum de flot pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 500µm	49
Figure 45 - Différentiel du transport instantané au maximum de flot – jacket – granulométrie 500µm	49
Figure 46 - Transport instantané au maximum de jusant pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 500µm	50
Figure 47 - Différentiel du transport instantané au maximum de jusant – jacket – granulométrie 500µm	50
Figure 48 - Transport instantané au maximum de flot pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 2000µm	51
Figure 49 - Différentiel du transport instantané au maximum de flot – jacket – granulométrie 2000µm	51
Figure 50 - Transport instantané au maximum de jusant pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 2000µm	52
Figure 51 - Différentiel du transport instantané au maximum de jusant – jacket – granulométrie 2000µm	52
Figure 52 : Mise à l'eau d'un navire	56
Figure 53 : Dimensionnement de protection contre la houle [exemple Flow-3D©]	56
Figure 54 : Etudes des affouillements en pied d'une hydrolienne [exemple Flow-3D©]	56
Figure 55 : Blocs de maillage du modèle Flow-3D©	57
Figure 56 : représentation 3D du modèle utilisé	58
Figure 57 : Variations du fond du lit à proximité des piles en fonction du temps	59
Figure 58 : Figure d'affouillement obtenue à l'aide de Flow-3D© [1/2]	59
Figure 59 : Figure d'affouillement obtenue à l'aide de Flow-3D© [2/2]	60
Figure 60 : Variations du fond selon les axes X et Y (à t = 1 h)	61
Figure 61 : Conditions hydrodynamiques aux abords de pieds du jacket	63

Figure 62 – Carte de turbidités moyennes mensuelles, pour le mois de Février 2014 établie à partir d'observations satellitaires	65
Figure 63 – Carte de turbidités moyennes mensuelles, pour le mois de Juin 2014 établie à partir d'observations satellitaires	66
Figure 64 – Localisation des 5 éoliennes	67
Figure 65 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 1 – Fondation jacket .	71
Figure 66 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 2 – Fondation jacket .	72
Figure 67 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 3 – Fondation jacket .	73
Figure 68 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 4 – Fondation jacket .	74
Figure 69 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 5 – Fondation jacket .	75
Figure 70 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 1 –volume initial du cutting 350m ³	76
Figure 71 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 1 –volume initial du cutting 1000m ³	77
Figure 72 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 2 –volume initial du cutting 350m ³	78
Figure 73 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 2 –volume initial du cutting 1000m ³	79
Figure 74 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 3 –volume initial du cutting 350m ³	80
Figure 75 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 3 –volume initial du cutting 1000m ³	81
Figure 76 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 4 –volume initial du cutting 350m ³	82
Figure 77 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 4 –volume initial du cutting 1000m ³	83
Figure 78 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 5 –volume initial du cutting 350m ³ et 1000m ³	84
Figure 79 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 5 –volume initial du cutting 1000m ³	85
Figure 80 – Evolution du panache après l'arrêt des travaux de forage – temps exprimé en minutes à partir de la fin d'une opération de forage – Eolienne 5 - jacket.....	86
Figure 81 – Evolution du panache après la dispersion (350m ³) – temps exprimé en minutes à partir de la fin d'une opération de forage – Eolienne 5	87

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 – Niveaux d'eau pour Dieppe	11
Tableau 2 – Dimensions générales des ellipsoïdes suivant les éoliennes et leur fondation	69
Tableau 3 – Dimensions générales des ellipsoïdes suivant les éoliennes pour la dispersion avec un volume de cutting de 350m ³	69
Tableau 4 – Dimensions générales des ellipsoïdes suivant les éoliennes pour la dispersion avec un volume de cutting de 1000m ³	70

1 Introduction



Le projet de parc éolien en mer de Dieppe – Le Tréport est localisé au large de ces deux villes côtières, en baie de Somme. La figure ci-dessous illustre la répartition spatiale des 62 éoliennes du parc. Dans la partie Nord, les éoliennes se répartissent sur plusieurs axes qui sont orientés de L'Ouest vers l'Est. La répartition est plus irrégulière dans la partie Sud pour prendre en compte de singularités géomorphologiques. L'espacement entre les éoliennes est d'environ 1.4km (Figure 1).

Le parc est positionné sur des fonds sédimentaires relativement mobiles. Cette mobilité est liée à la présence de formations sédimentaires de type dunes dont la migration est avérée.

A stade de la présente étude les fondations envisagées sont des jackets, structure tubulaire en treillis qui reposent sur 4 pieux implantés dans le substratum. La structure générale rappelle une pyramide, chaque côté étant muni de croisillons reliant les piliers de la structure.

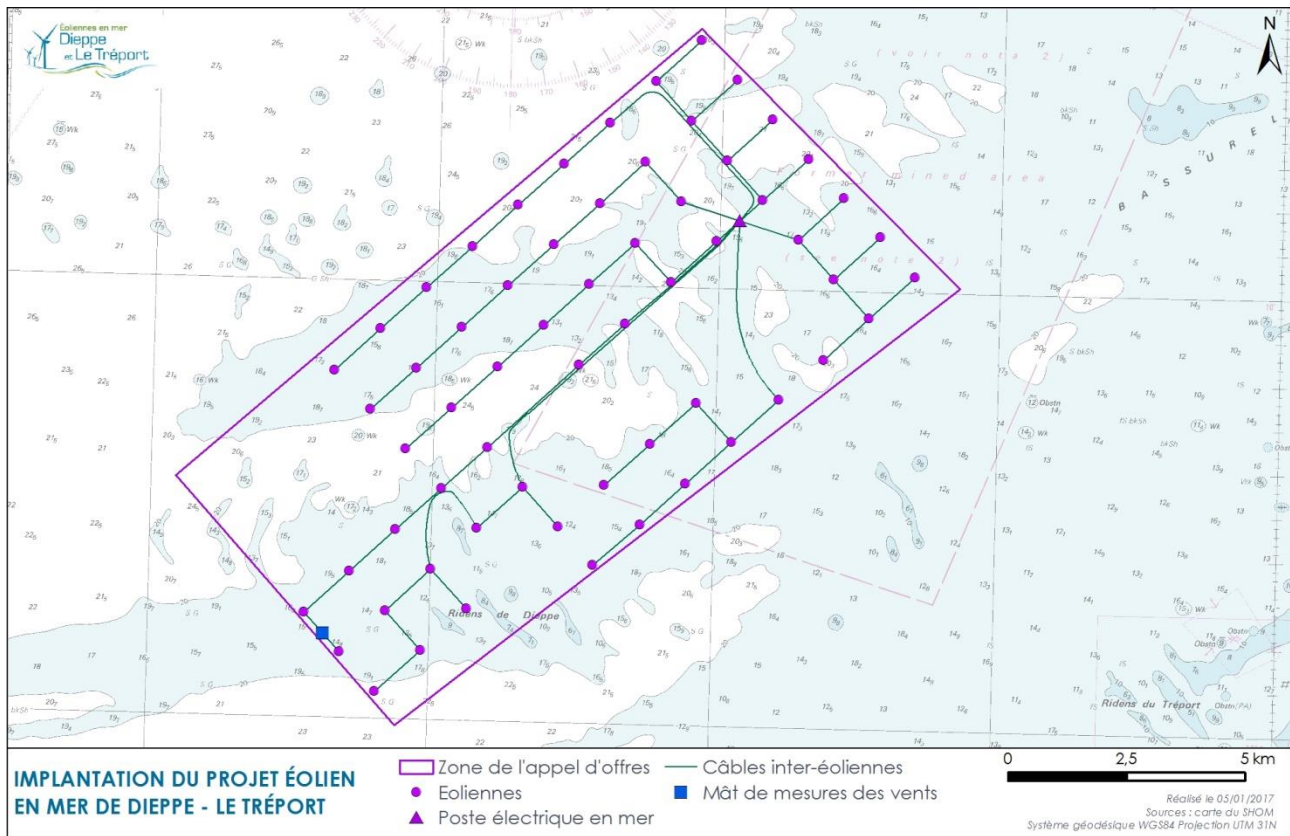
L'objectif de ce rapport est double :

- ▶ Tout d'abord étudier les potentielles incidences du parc éolien sur les conditions environnementales du site, à une échelle locale et régionale sur :
 - Les conditions hydrodynamiques (courants et houles), en utilisant le modèle TELEMAC-2D et son module TOMAWAC ;
 - La dynamique sédimentaire à large échelle, en utilisant le module SYSIPHE ;
 - La turbidité du milieu durant les travaux de forage, en utilisant également le modèle TELEMAC-2D.

Cette partie du document a été rédigé conjointement par la société BRLi et Monsieur Benoit Waeles (Expert en hydrodynamique côtière et dynamique sédimentaire).

- ▶ Dans un second temps, modéliser précisément en 3D la structure jacket et estimer les figures d'affouillement (profondeur et emprise) au niveau des fondations permettant notamment d'évaluer les effets sur la turbidité de la colonne d'eau en phase d'exploitation. Cette modélisation a été réalisée à l'aide du logiciel FLOW3D®.

Figure 1 – Parc éolien Dieppe et le Tréport : schéma d'implantation des 64 fondations



2 Données de base



SOMMAIRE

2.1 Bathymétrie	7
2.2 Bathymétrie pour les modélisations 3D	9
2.3 Les niveaux d'eau	10
2.3.1 Niveau de référence	10
2.3.2 Niveaux de marée astronomique	11
2.3.3 Conditions de surcote/décote	11
2.3.4 Niveaux d'eau extrêmes	11
2.4 Courantologie	13
2.5 Etat de mer	16
2.5.1 Statistiques générales	16
2.5.2 Conditions de tempêtes exceptionnelles	18
2.6 Nature de la couverture sédimentaire	19
2.7 Structure 3D fondation jacket	22

2.1 Bathymétrie

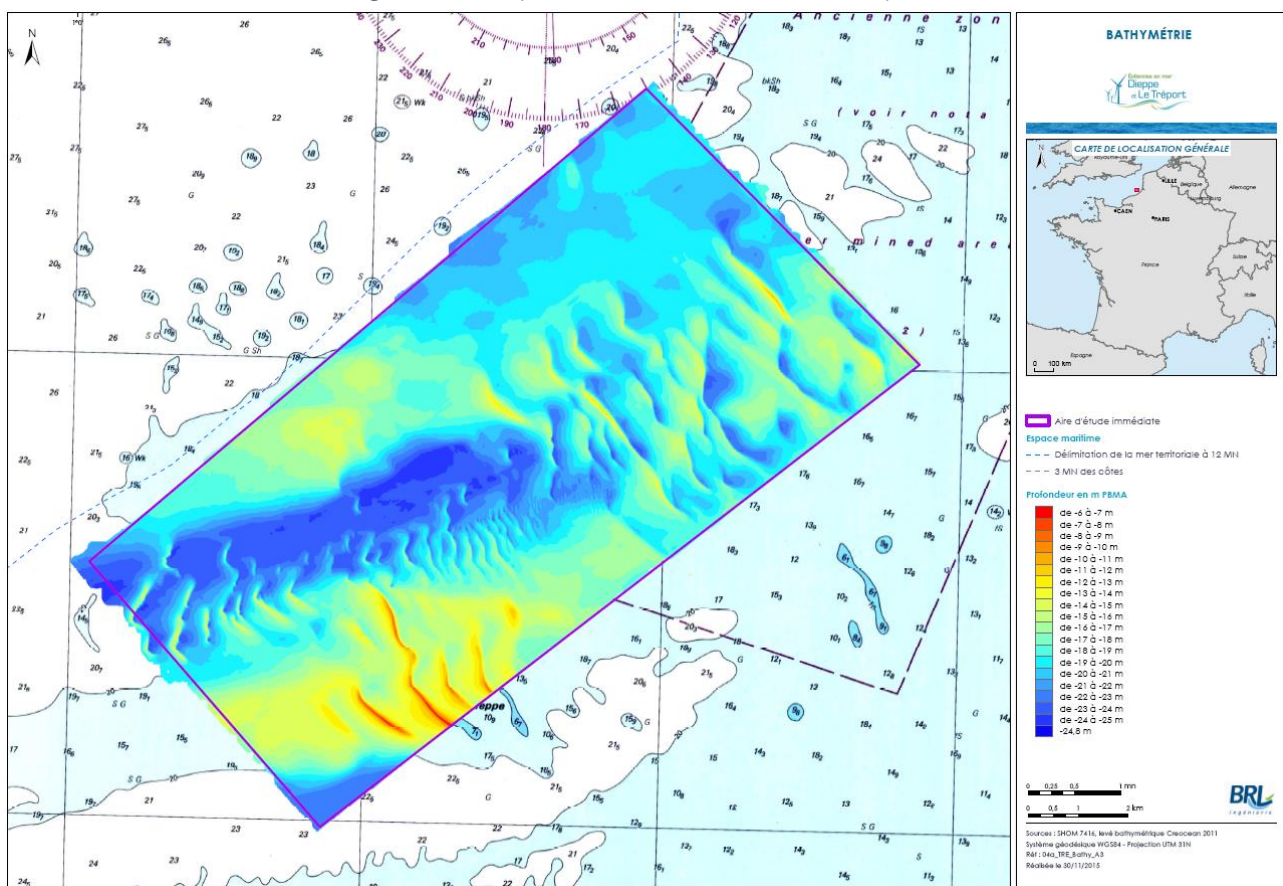
Différentes sources de données ont été rassemblées :

- ▮ les données issues de la campagne bathymétrique réalisée par CREOCEAN en 2011 à l'échelle du parc et de ses abords proches,
- ▮ les produites numériques de bathymétrie du SHOM à une échelle plus globale : dalles bathymétriques et le « MNT bathymétrie de la façade Atlantique » dont la résolution est de 100m.

Un Modèle Numérique de Terrain (MNT) a été défini à partir de la compilation de ces données à une échelle suffisamment large pour renseigner le modèle hydrodynamique mis en place dans le cadre de cette étude (cf. 3.1.3). Afin de bien représenter les conditions de courant sur la zone du parc, le modèle doit être mis en place sur un domaine suffisamment large et intégrer la Baie de Somme.

Les données du levé multifaisceaux de la campagne CREOCEAN (2011) permettent d'avoir une description très précise de la morphologie des fonds sur la zone du parc (Figure 2). Les dunes sableuses sont facilement identifiables et très marquées sur la partie Sud-Ouest de l'aire immédiate. Immédiatement au Nord de ce champ de dunes, un fossé est visible avec des profondeurs allant jusqu'à -24 m CM. La partie Nord-Est du parc présentent également des morphologies sauteuses de type dunes mais qui sont moins marquées. Enfin, les fonds sont relativement monotones dans le coin Nord du parc.

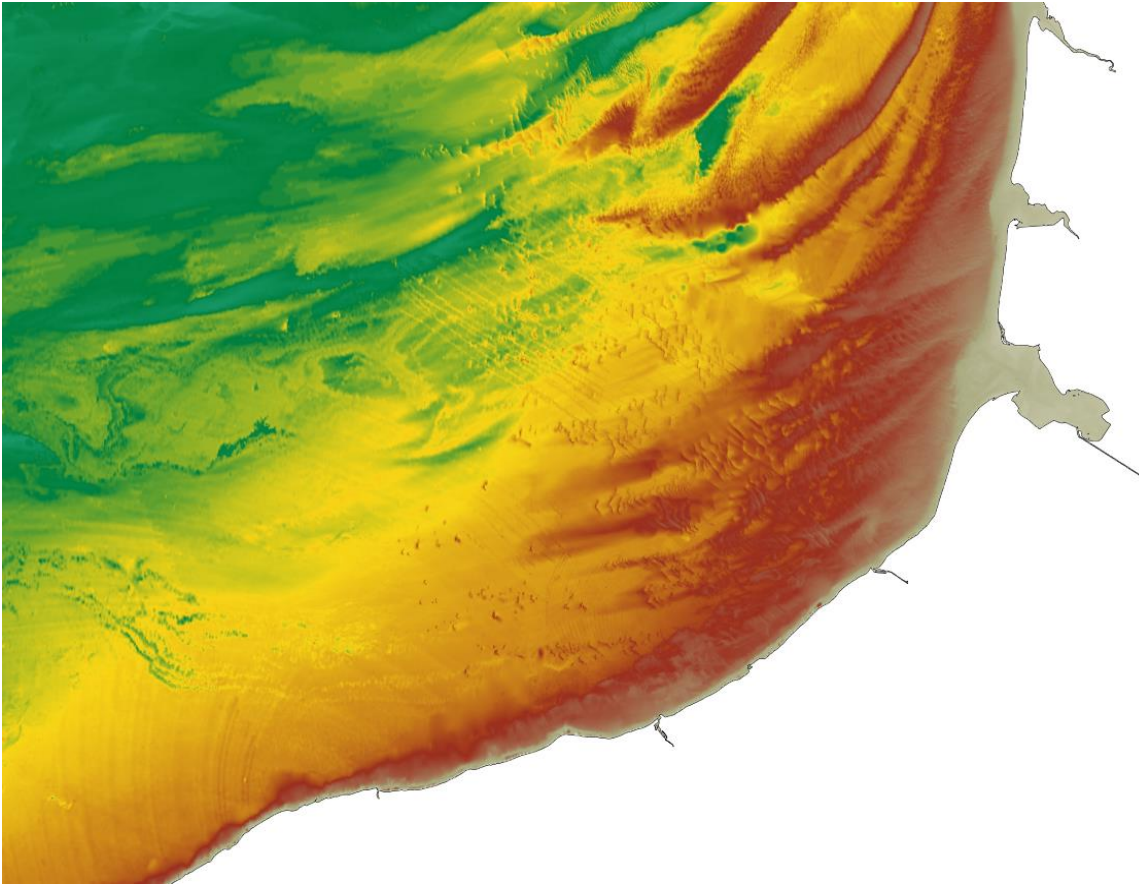
Figure 2 – Bathymétrie sur l'aire immédiate du parc



(Source : CREOCEAN)

A une échelle plus large, le « MNT bathymétrie de la façade Atlantique » a été réalisé dans le cadre du projet HOMONIM¹. Les données couvrent l'ensemble de la Manche avec une résolution de 0.001° (soit environ 100m). La Figure 3 donne un aperçu de la précision de ces données.

Figure 3 - MNT Bathymétrie de la façade Atlantique - HOMONIM

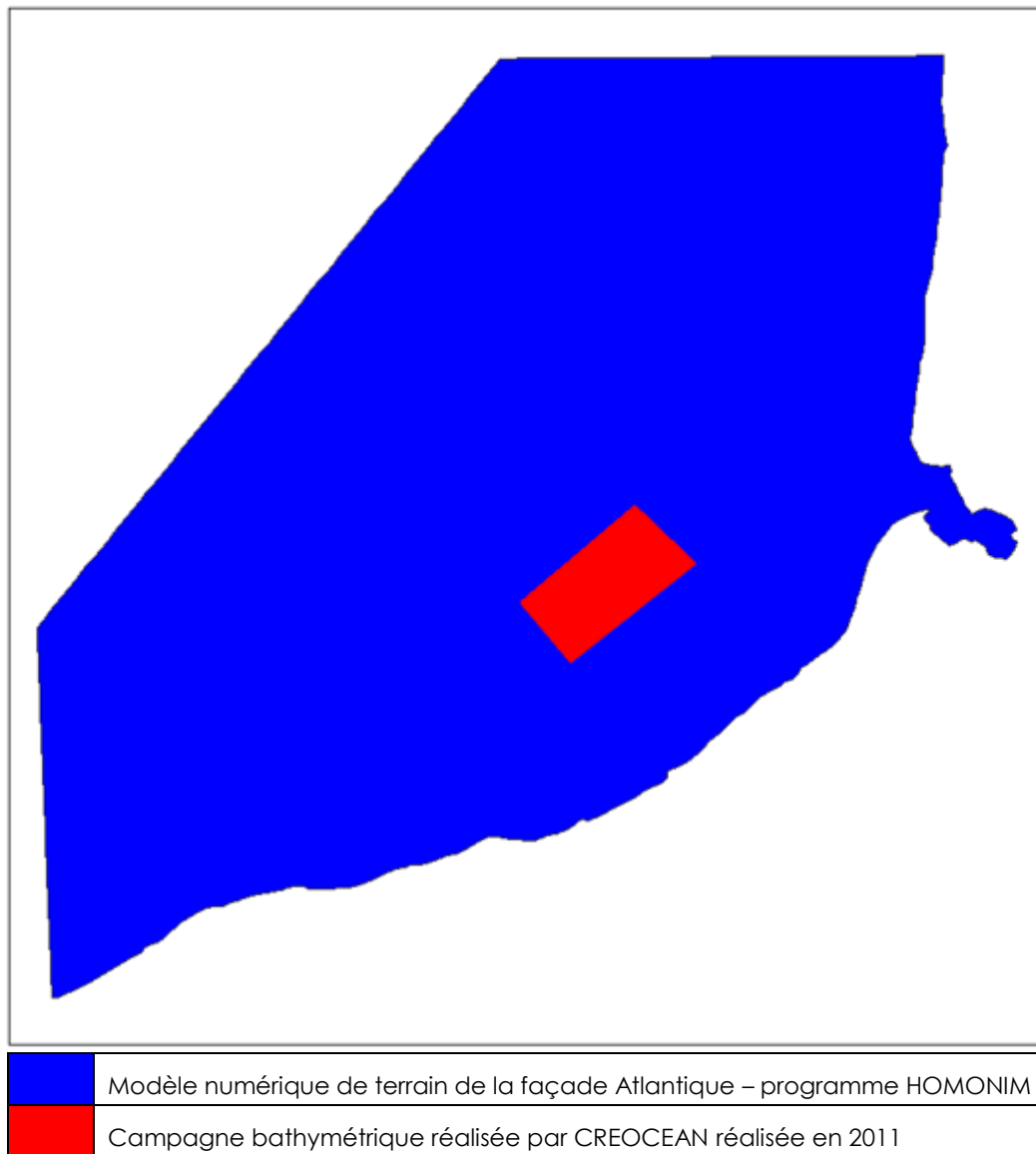


(Source : SHOM)

La Figure 4 rend compte de la répartition spatiale des jeux de données qui ont été compilés pour constituer le MNT du modèle hydrodynamique.

1 SHOM, 2015. MNT Bathymétrie de façade Atlantique (Projet Homonim).http://dx.doi.org/10.17183/MNT_ATL100m_HOMONIM_WGS84

Figure 4 – Répartition des données bathymétriques collectées pour l'étude



(Source : SHOM)

2.2 Bathymétrie pour les modélisations 3D

Pour les modélisations impliquant le modèle Flow3D© les données bathymétriques utilisées sont celles compilées par CREOCEAN en 2011, et représentées en Figure 2.

Selon Créocéan (2011), les profondeurs varient de 15 à 21m CM dans la partie Nord du périmètre. Une dépression d'environ 1,5 km de large orientée Est-Ouest est mise en évidence au milieu du site, où les profondeurs atteignent 25 m CM. Cette zone nommée « Zone du Creux » est évitée par le projet (Figure 1) et n'a donc pas été considérée ici. En partie Sud, au niveau des ridens de Dieppe, les profondeurs sont très variables, de 5 à 20 m CM de par la présence de vagues de sables à faibles longueur d'onde. Toutefois, cette zone est également évitée par le projet. En conséquence, il a été supposé **un fond uniforme à une cote de -19,5 m CM.**

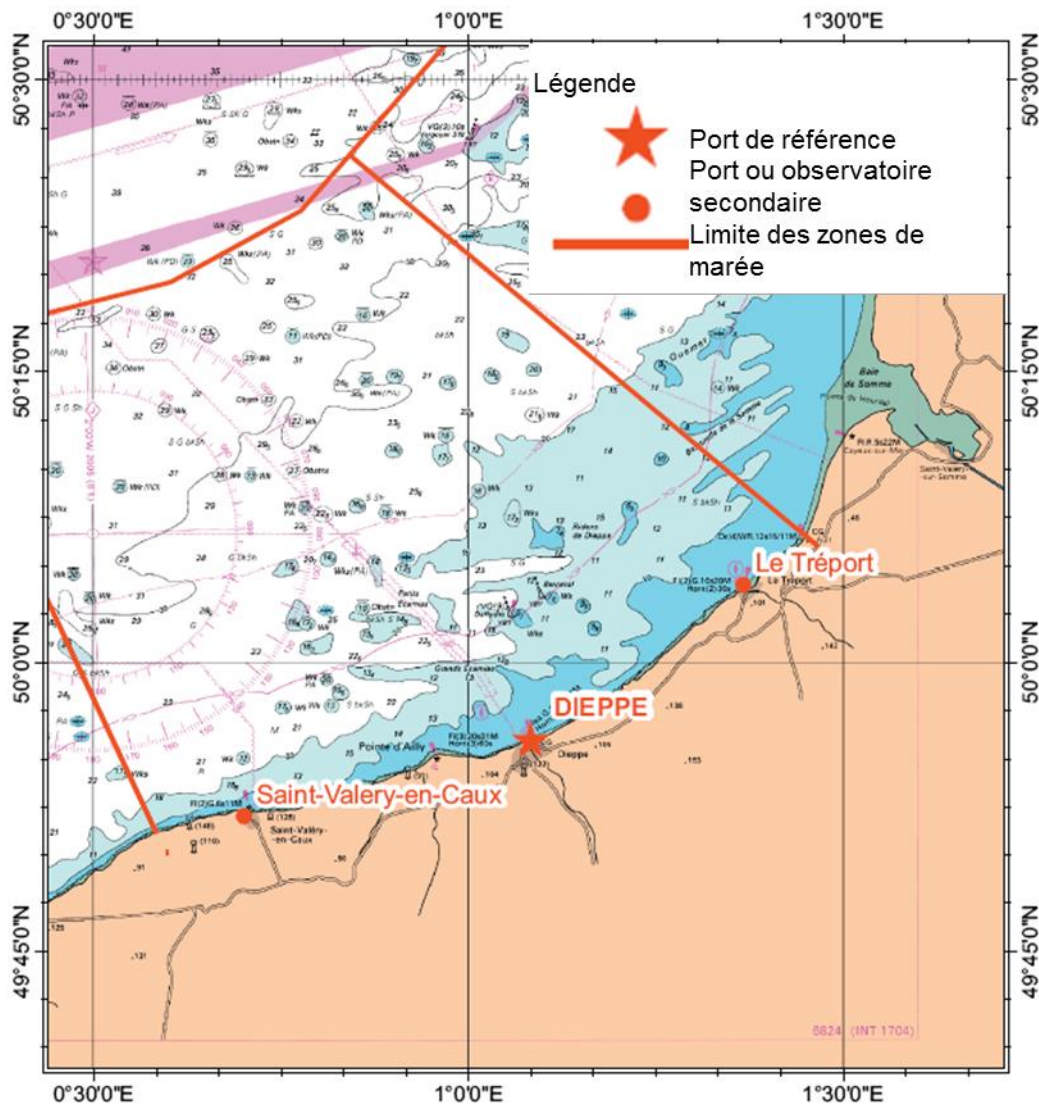
2.3 Les niveaux d'eau

2.3.1 Niveau de référence

Les « références Altimétriques Maritimes » (RAM) sont publiées chaque année par le SHOM pour les ports principaux et secondaires sur le territoire français (métropole et outre-mer). L'ouvrage renseigne notamment sur les correspondances entre le zéro hydrographique (en mètre cote marine – m C.M), qui correspond approximativement au niveau des plus basses mers astronomiques, et le zéro du système altimétrique légal IGN96 (m NGF) proche du niveau moyen de la mer.

Compte tenu de la localisation du parc, c'est le référentiel de Dieppe (cf. Figure 5), port de référence, qui a été considéré. Pour ce port le zéro hydrographique se situe à -4.448m en dessous du zéro mètre NGF.

Figure 5 – Cartes des sites de la zone de marée



(Source : SHOM)

2.3.2 Niveaux de marée astronomique

La marée est sur le secteur d'étude est de type semi-diurne, c'est-à-dire que deux cycles de marée (alternance pleine mer - basse mer) s'observent par jour.

Le tableau ci-après fait la synthèse des niveaux de pleine mer et de basse mer au port de Dieppe pour différents coefficients de marée. La zone est caractérisée par un marnage relativement important, de l'ordre de 8m lors des marées de vive-eau.

Tableau 1 – Niveaux d'eau pour Dieppe

	PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA
M CM	10.11	09.35	07.40	04.94	02.55	00.80	-0.07

(Source : SHOM)

2.3.3 Conditions de surcote/décote

Aux variations de niveau d'eau induites par la marée peuvent se superposer des variations liées aux conditions météorologiques :

- ▶ L'influence du vent peut être appréhendée en première approche comme suit :
 - Un vent de mer tendra préférentiellement à un basculement du plan d'eau vers la côte. Ce qui aura pour principale effet d'augmenter le niveau d'eau,
 - A l'inverse un vent de terre « poussera » la masse d'eau vers le large tendant ainsi à abaisser le plan d'eau au niveau de la côte.
- ▶ La pression atmosphérique (phénomène de baromètre inverse) :
 - Lors du passage d'une dépression, la pression atmosphérique au-dessus du plan d'eau aura tendance à diminuer. De ce fait mécaniquement le plan étant moins contraint par le poids de la colonne d'air aura tendance à remonter.
 - A l'inverse lors du passage d'un anticyclone, la pression atmosphérique va augmenter. Le poids de la colonne d'air augmentant le niveau d'eau va tout simplement diminuer.
 - En moyenne, une diminution de la pression atmosphérique d'environ 1Hpa engendrera une augmentation du niveau de la mer d'environ 1cm.

2.3.4 Niveaux d'eau extrêmes

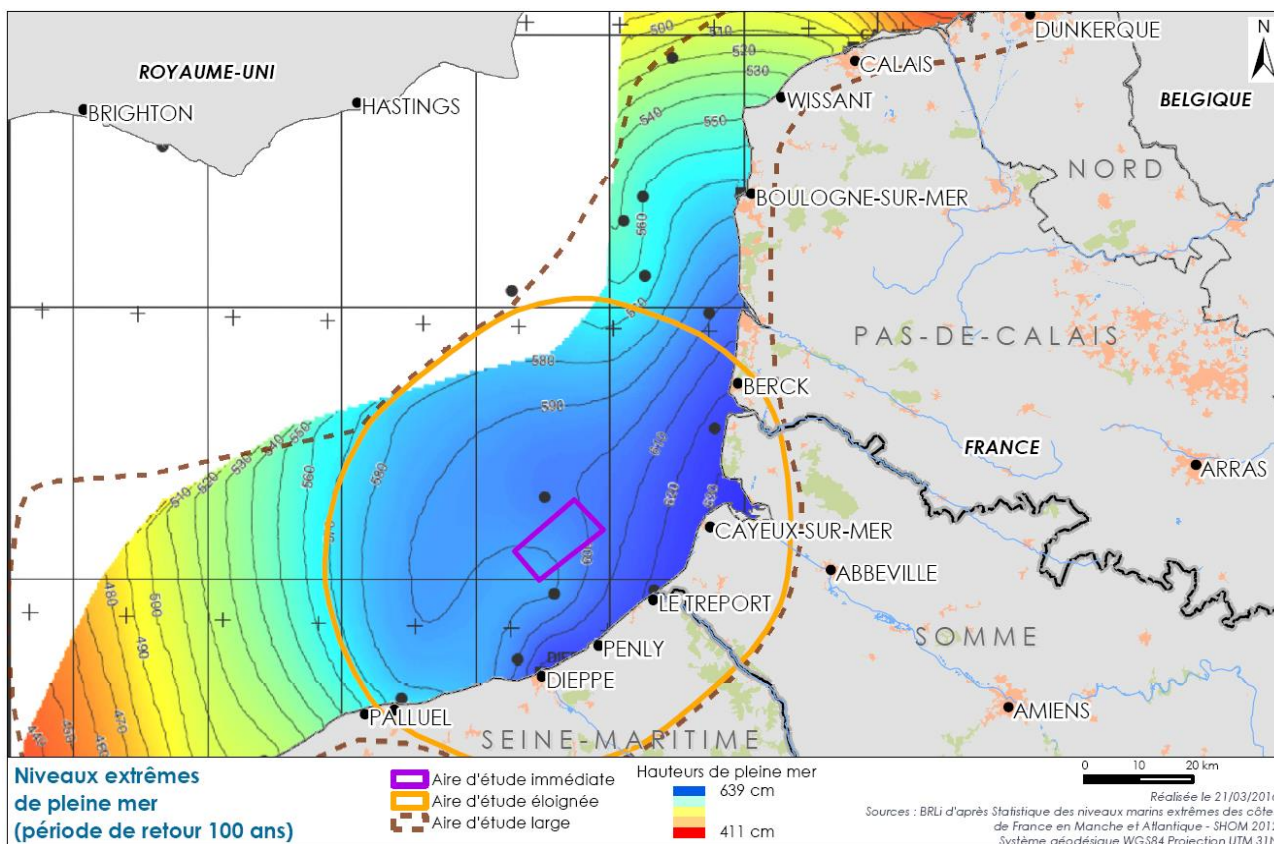
Le SHOM a publié en 2012 les « Statistiques des niveaux marins extrêmes des côtes de France en Manche et Atlantique ». Cet ouvrage représente sous forme de cartographies les niveaux d'eau extrêmes (incluant marée astronomique et surcote/décote atmosphérique) calculés le long des côtes françaises selon différentes périodes de retour.

Les niveaux présentés ci-après ont été déduits des cartes au niveau de l'aire d'étude :

- ▶ 10 ans : 6.00 m NGF soit 10.448 m CM,
- ▶ 50 ans : 6.15 m NGF, soit 10.598 m CM,
- ▶ 100 ans : 6.20 m NGF soit 10.648m CM.

Il est important de noter la limitation de ce type de cartes dès qu'on s'éloigne de la côte et des sites de mesure marégraphique.

Figure 6 - Niveaux extrêmes de pleine mer (période de retour 100ans)



(Source : SHOM)

Dans le cas spécifique des modélisations 3D, un niveau d'eau moyen fixé à la cote + 4,94 m CM (Références altimétriques maritimes(RAM) à Dieppe) a été retenu. Cette cote correspond aux maximums de courants relevés pour le flot ou le jusant en coefficient 95.

2.4 Courantologie

Les courants sur la zone d'étude sont principalement forcés par la marée astronomique.²

L'ouvrage *Les courants de marée*³ proposé par le SHOM représente les courants de marée de morte eau (coefficient 45) et de vive eau (coefficient 95) issus de résultats d'une modélisation hydrodynamique en deux dimensions. Les résultats couvrent l'ensemble de la Manche, avec des zooms opérés sur plusieurs secteurs côtiers. Au droit de Dieppe le Tréport, aucun zoom n'est disponible et la discrétisation spatiale de la donnée ne permet pas d'avoir une bonne idée des champs de courant.

Les prévisions du programme Previmer ont donc été utilisées pour avoir une répartition des champs de courants plus précise au niveau de notre zone d'étude. Les cartes ci-après montrent les conditions de courant aux environs des maxima de flot (Figure 7) et de jusant (Figure 8).

Les cartes ci-après montrent les conditions de courant aux environs des maxima de flot (Figure 7, 3h avant la pleine mer) et de jusant (Figure 8, 3h après la basse mer). Les illustrations sont renseignées pour le port de Cherbourg. Entre le port de Cherbourg et de Dieppe, la marée a un décalage de 3h. Ainsi les deux planches doivent être lues comme suit :

- ▶ Pleine mer au niveau du port de Cherbourg, ce qui correspond au moment du maximum de flot au droit de Dieppe,
- ▶ 5h avant Pleine Mer (PM) au port de Cherbourg correspond au maximum de Flot au droit de Dieppe

Même si la résolution spatiale manque de finesse sur notre zone d'étude, il est possible de sortir une tendance globale :

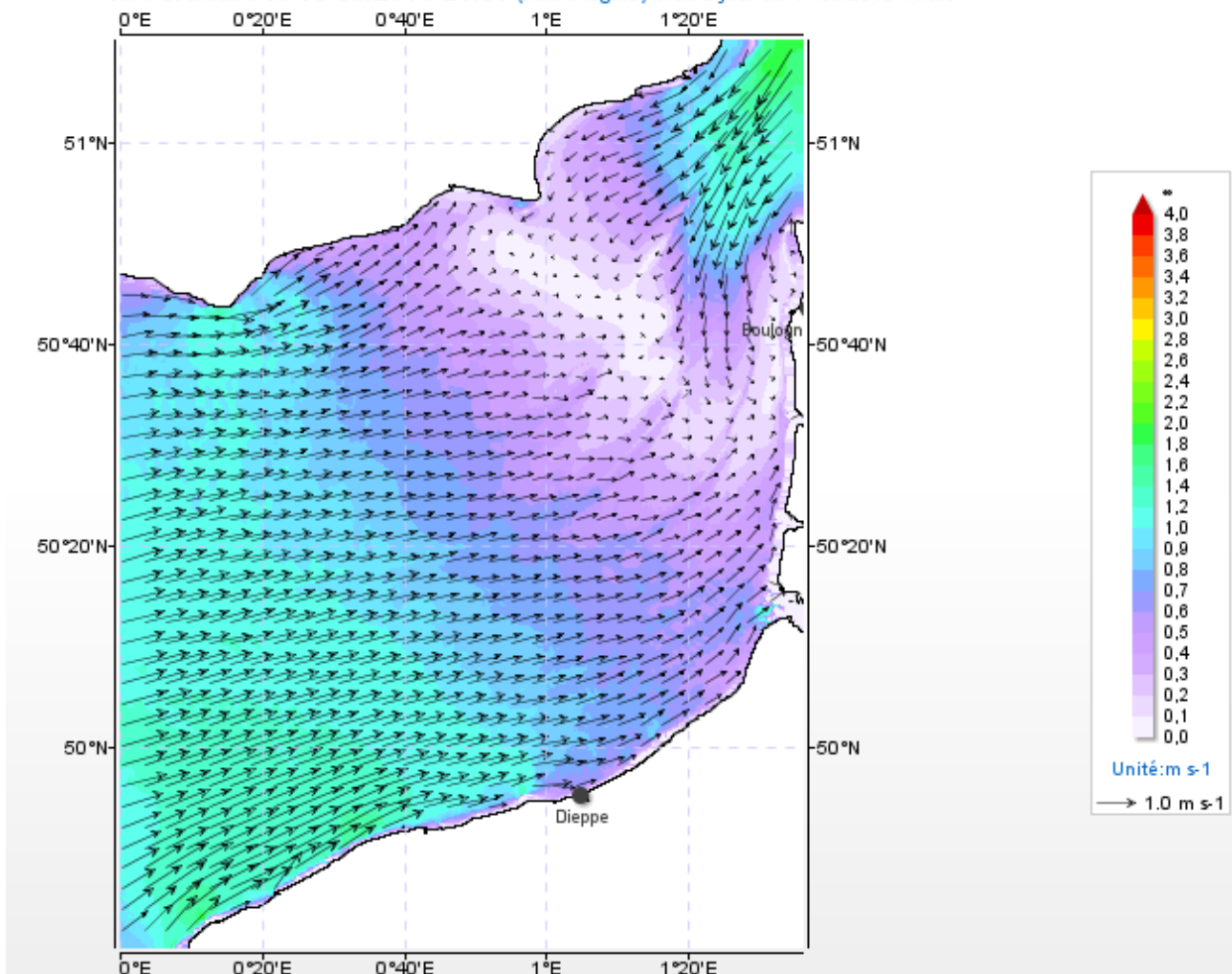
- ▶ Lors du flot, au large les courants vont s'orienter sur un axe Ouest-Sud-Ouest à Est-Nord-Est. Au niveau de Dieppe et du Tréport, les courants vont longer le littoral et remonter vers le Nord. Des maxima de 1m.s^{-1} sont observés à l'Ouest de la zone d'intérêt.
- ▶ Lors du jusant, l'inverse est observé, les courants au large tendent vers une direction Ouest-Sud-Ouest. Les courants qui longent la côte se déplacent vers l'ouest. Des maxima de 0.8m.s^{-1} sont observés.
- ▶ Un déséquilibre est noté en faveur du flot concernant les intensités des courants.

² Au courant de marée se superpose un courant général à très faible vitesse issu du Gulf Stream qui conduit les eaux de la Manche à s'écouler vers la mer du Nord. Selon les travaux de Bailly du Bois P. et al., (1995), il faut de 110 à 150 jours selon la saison pour que ce courant général parcoure les 280 km séparant la Hague au Pas-de-Calais, soit environ 2km/jour .

³ Courants de marée – La Manche – De Dunkerque à Brest – SHOM – 564-UJA

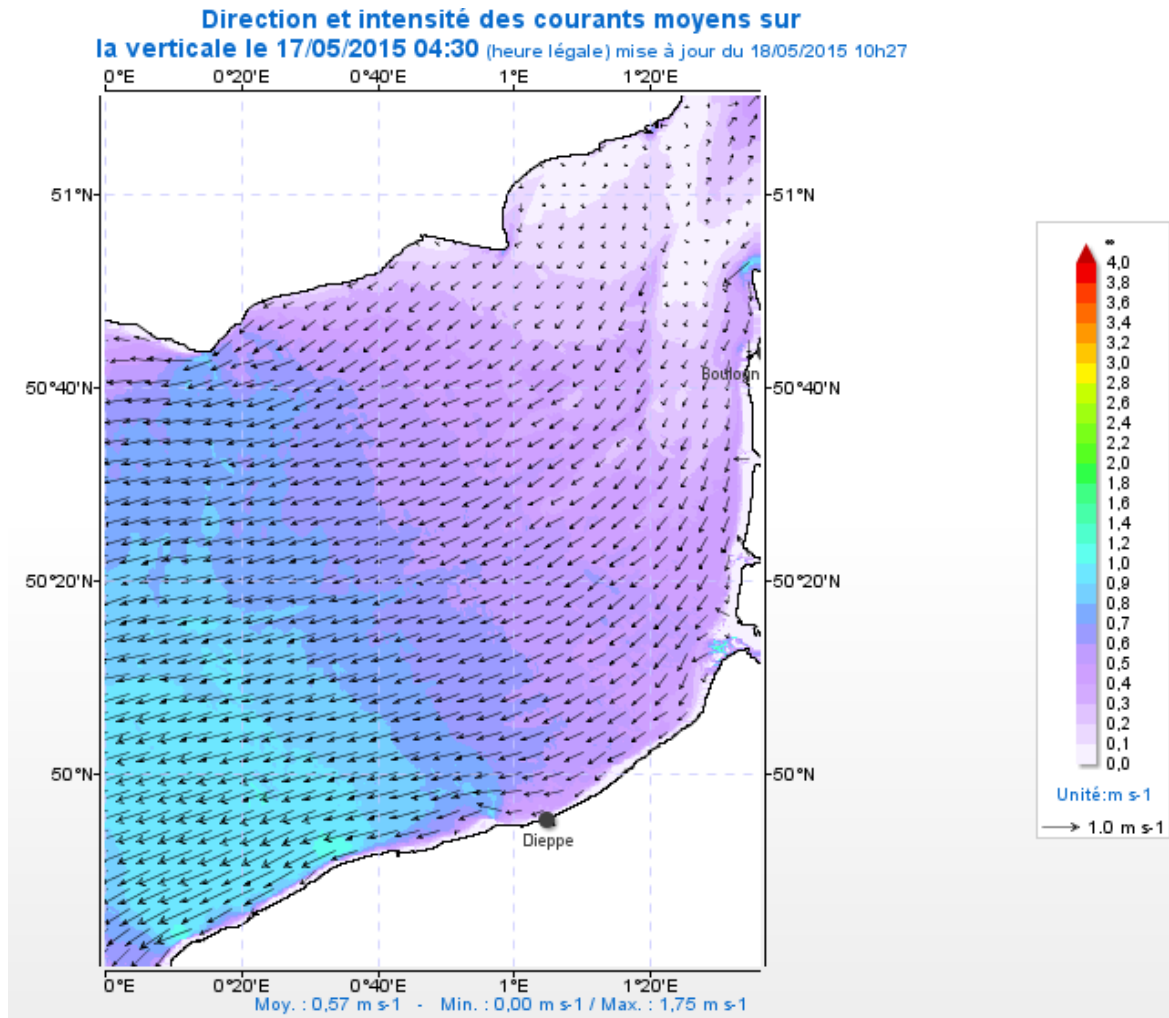
Figure 7 – Courants de marée – Maximum de flot à Dieppe

**Direction et intensité des courants moyens sur
la verticale le 16/05/2015 21:00 (heure légale) mise à jour du 17/05/2015 11h03**



(Source : SHOM)

Figure 8 - Courants de marée – Maximum de jusant à Dieppe



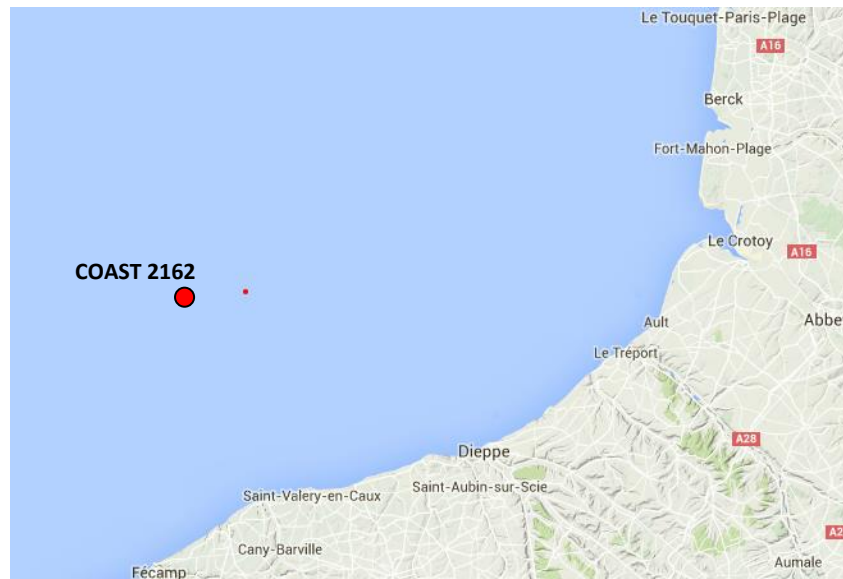
(Source : SHOM)

Dans le cas spécifique des modélisations 3D, et dans une approche conservative nous avons retenu un courant de fond permanent de 1 m/s. De plus, l'orientation des courants a été supposée perpendiculaire à un côté de la structure.

2.5 Etat de mer

La base de données ANEMOC propose une analyse statistique réalisée à partir des résultats de modélisations rétrospectives sur la période 1979 à 2002. Le point COAST 2162 (Lat : 59°8.580'N – Long : 0°33.960'W, cf. Figure 9) est localisé à proximité du site d'étude et permet une synthèse des caractéristiques des états de mer.

Figure 9 – Localisation du point ANEMOC COAST 2162



(Source : ANEMOC)

2.5.1 Statistiques générales

Les éléments fournis par la base de données ANEMOC nous renseignent sur les caractéristiques de houles incidentes au niveau du site.

La Figure 10 représente le corrélogramme des hauteurs significatives en fonction de la direction de provenance. Les houles du large proviennent majoritairement du secteur Ouest (270°N) à Ouest Nord-Ouest (300°N). On peut également noter des vagues incidents de secteur Nord (360°N à 30°N), environ 10% du temps ; ce sont des états de mer levés localement (en Manche orientale) par des vents de secteur Nord soufflant depuis les côtes anglaises.

Pour le paramètre de hauteur significative des vagues on peut retenir les ordres de grandeur suivants :

- ▶ valeur médiane : $H_s \sim 0.5$ à 1 m.
- ▶ percentile 90 (dépassement ~ 3 jours cumulés par mois) : $H_s \sim 4$ m
- ▶ percentile 99 (dépassement ~ 3 jours cumulés par an) : $H_s \sim 5$ m

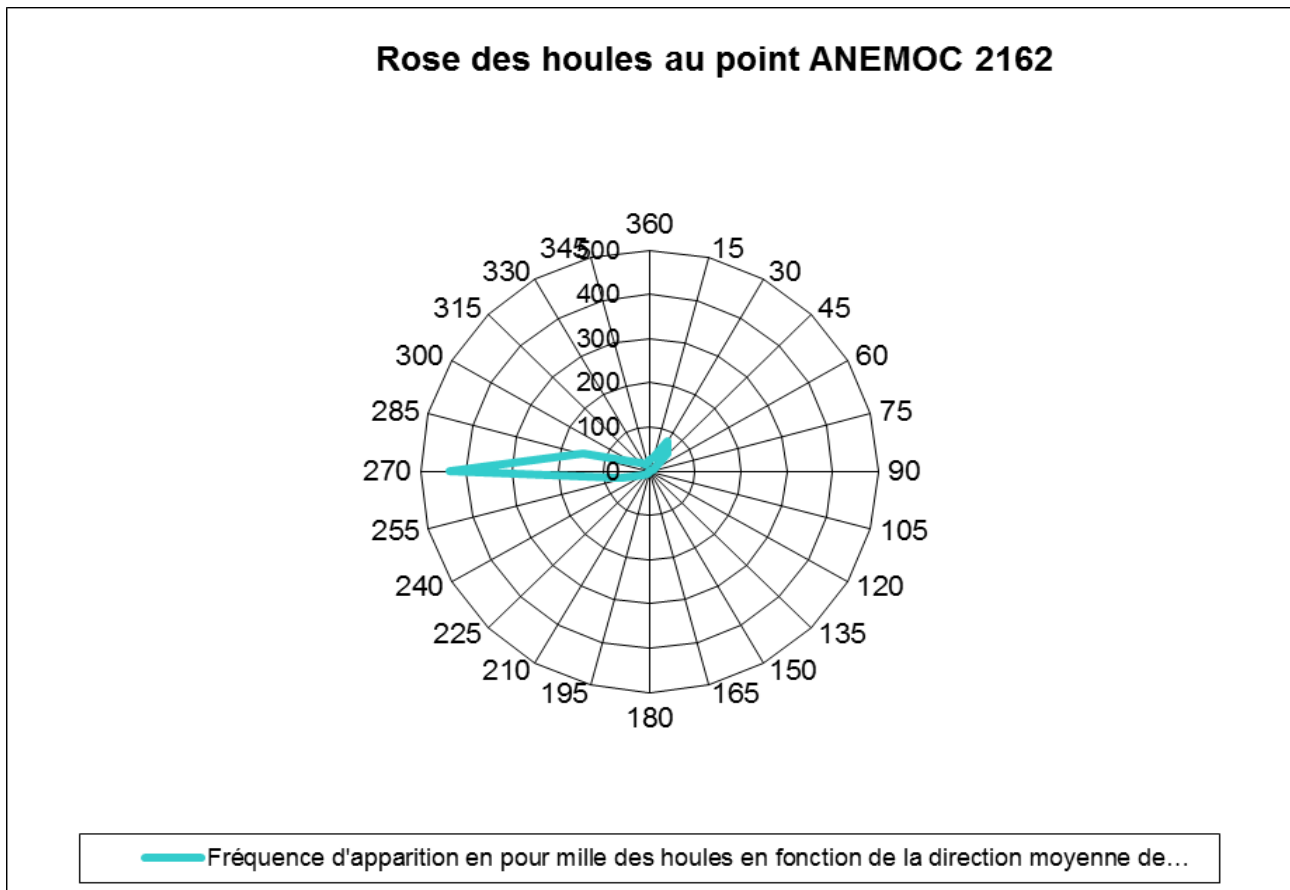
La Figure 11, représentant la rose des houles sur le même point ANEMOC, donne un aperçu plus direct de la provenance des vagues incidentes au cours d'une année.

Figure 10 – Corrélogramme hauteur significative / direction de provenance – Point ANEMOC COAST n°2162

Hm0 (m)	DirMoy (degrés)																				Total				
	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180	195	210	225	240	255	270	285	300	315	330	345	360	
0	18.37	36.03	14.26	0.86	0.45	0.32	0.2	0.08	0.11	0.1	0.08	0.14	0.11	0.13	0.13	0.22	0.91	127.04	64.79	24.00	15.08	11.68	11.85	13.52	340.45
1	10.56	31.71	26.58	4.46	2.04	1.37	0.71	0.53	0.38	0.25	0.24	0.34	0.5	1.05	1.3	3.08	8.31	165.99	40.06	10.33	6.33	5.24	6.24	7.65	335.25
1.5	2.86	7.98	11.31	2.29	1	0.42	0.18	0.08	0.02	0.08	0.08	0.21	0.49	1.11	1.97	4.86	17.69	68.72	19.37	3.77	2.26	1.68	1.5	2.09	152.03
2	1.08	2.54	3.9	0.81	0.12	0.04		0.01			0.01	0.04	0.24	0.77	1.87	5.02	16.09	33.91	11.37	2.46	0.81	0.53	0.62	0.63	82.9
2.5	0.25	1.04	0.51	0.07		0.01							0.04	0.16	0.92	3.19	10.27	17.78	6.34	0.92	0.25	0.24	0.27	0.32	42.58
3	0.05	0.11	0.13										0.01	0.05	0.43	1.82	5.37	10.17	3.85	0.48	0.14	0.05	0.07	0.07	22.79
3.5		0.13												0.02	0.1	0.7	2.87	6.18	2.26	0.05	0.01				12.34
4		0.02												0	0.05	0.42	1.22	3.08	0.89	0.01					5.69
4.5														0.01	0.01	0.22	0.37	1.34	0.45						2.4
5															0	0.02	0.13	0.68	0.28						1.13
5.5																0	0.06	0.29	0.06						0.43
6																	0.01	0.11	0.02						0.15
6.5																		0.02	0.11	0.01					0.14
7																			0.05						0.05
Total	33.17	79.55	56.69	8.49	3.61	2.16	1.1	0.7	0.51	0.43	0.43	0.73	1.4	3.31	6.79	19.57	63.32	435.47	149.76	42.01	24.88	19.42	20.54	24.28	

(Source : ANEMOC)

Figure 11 – Roses des houles au point ANEMOC 2162



(Source : ANEMOC)

Dans le cadre spécifique des modélisations 3D, l'orientation de la houle a été supposée perpendiculaire à un côté de la structure.

2.5.2 Conditions de tempêtes exceptionnelles

Dans le cadre d'une étude d'impact, il est nécessaire de bien appréhender les conditions d'agitation les plus énergétiques.

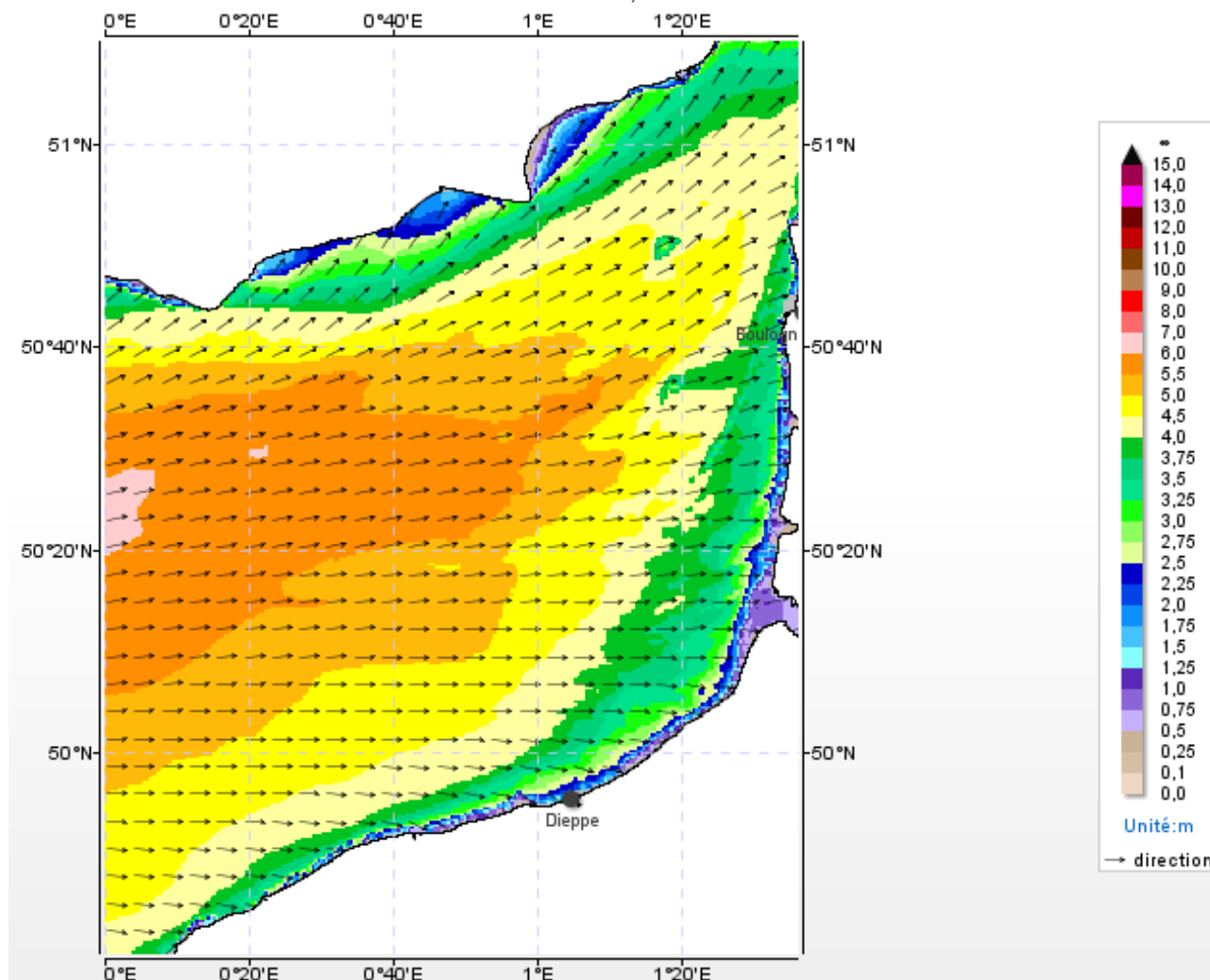
Les houles les plus énergétiques proviennent généralement du secteur Ouest, et moins fréquemment du secteur Nord-Nord-Est. Ce dernier secteur de provenance est cependant essentiel pour notre étude d'impact puisque la côte à l'ouest de Dieppe se situe en amont du parc par rapport à la direction de propagation des vagues. Au vu des données collectées, ces événements sont d'un point vu énergétique moins important que les événements d'Ouest.

La tempête Ruzica (08/02/2016) a été considérée pour évaluer les impacts des fondations sur la propagation des vagues. Cette tempête a généré des conditions de vagues relativement exceptionnelles sur le site d'étude avec une direction de provenance Ouest et des Hs de l'ordre de 5 m au niveau du point ANNEMOC COAST_2162 à proximité (cf. paragraphe 2.5.1).

La carte de hauteurs significatives de cet événement (Previmer/lfremmer) est présentée au moment du pic de la tempête (cf. Figure 12), aux environs de la basse mer en début de soirée.

Les vagues atteignent 3,5 à 4m sur la zone du parc.

Figure 12 – Hauteur significative et direction des vagues le 08/02/2016 à 18:00 (Du Cap d'Antifer au Cap Gris-Nez)



(Source : Previmer)

2.6 Nature de la couverture sédimentaire

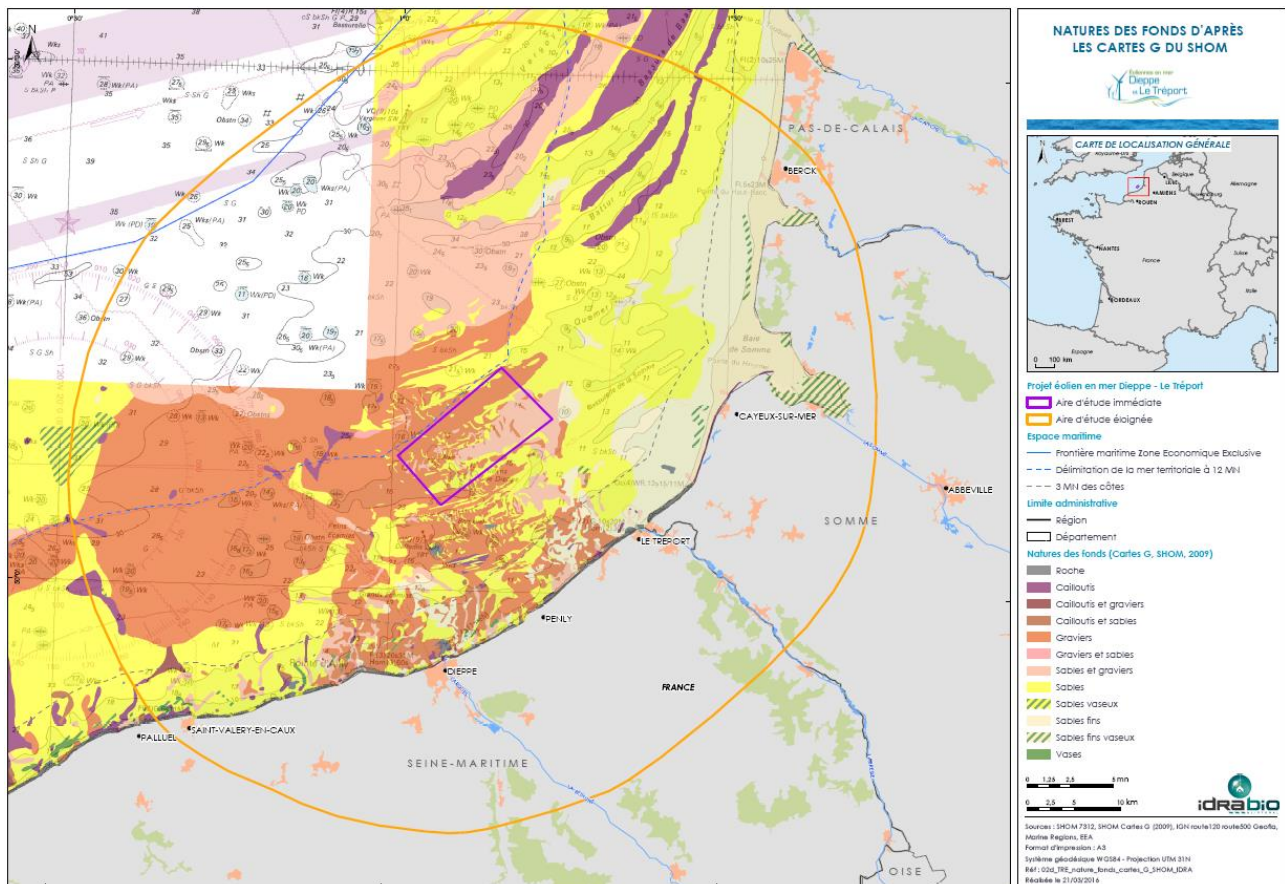
A l'échelle de l'aire d'étude éloignée, deux secteurs se distinguent du point de vue de la nature des fonds (Cf. Figure 13). A l'Est du parc la zone est sableuse, avec des ables fins en bordure côtière. A l'ouest, les sédiments sont plus grossiers, globalement sablo-graveleux.

Au niveau de l'aire d'étude immédiate (Cf. Figure 14), la répartition des sédiments provient des travaux de Creocan (2011). Les sédiments superficiels du secteur Nord du parc sont globalement des graviers et des sables grossiers. On retrouve ce type de couverture sédimentaire dans le coin Sud du parc. La bande Nord-Est du parc est couverte en grande partie de sables coquilliers moyens à grossiers.

En outre, une série de campagnes de mesure de la granulométrie a été effectuée au cours de l'année 2016 (Figure 15), confirmant les informations issues de la bibliographie.

En conséquence, trois classes granulométriques ont été considérées pour appréhender la dynamique sédimentaire sur une gamme assez large (sables aux graviers) : 2 mm, 500 µm et 315 µm (cette dernière valeur correspond au **D₅₀⁴** de la station B15i - Figure 15).

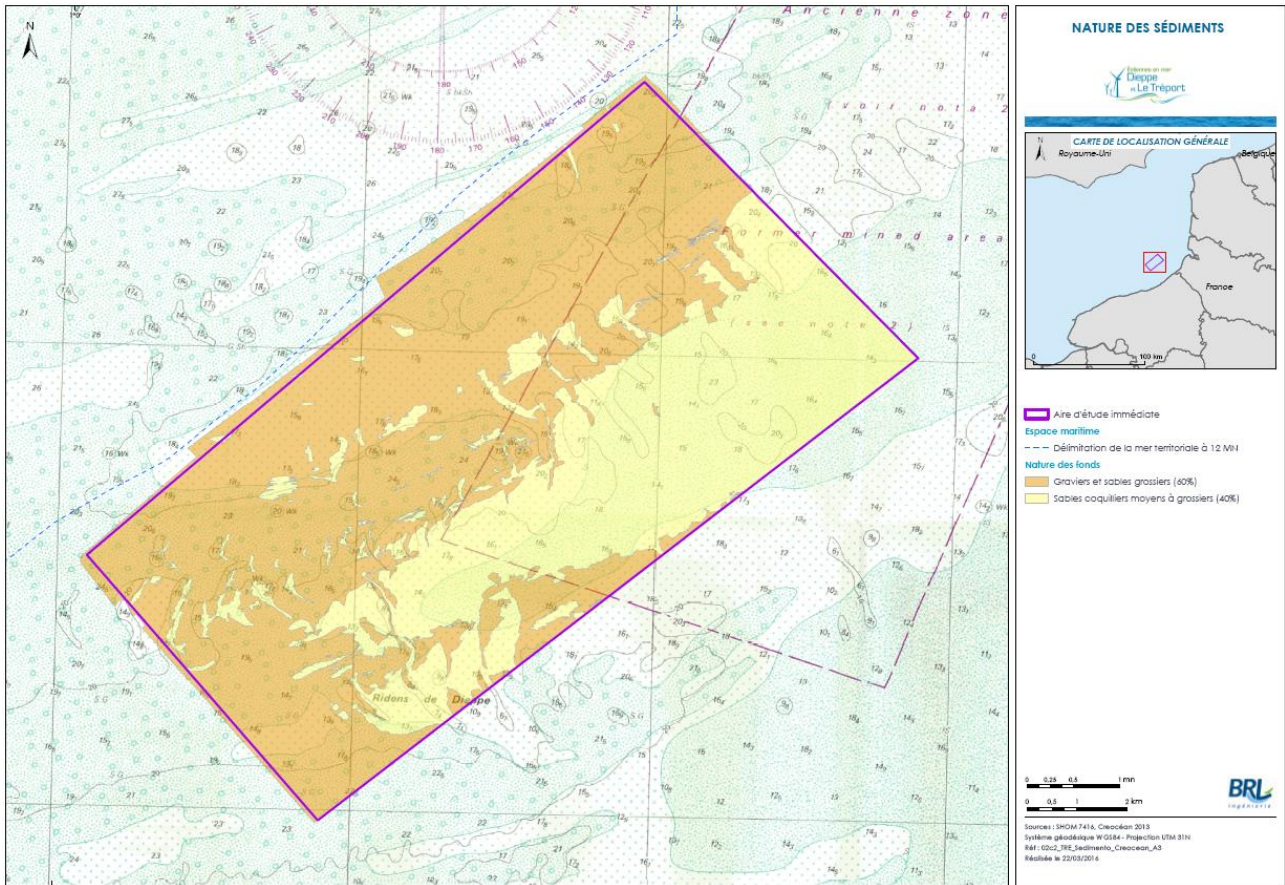
Figure 13 – Nature des fonds



(Source : SHOM)

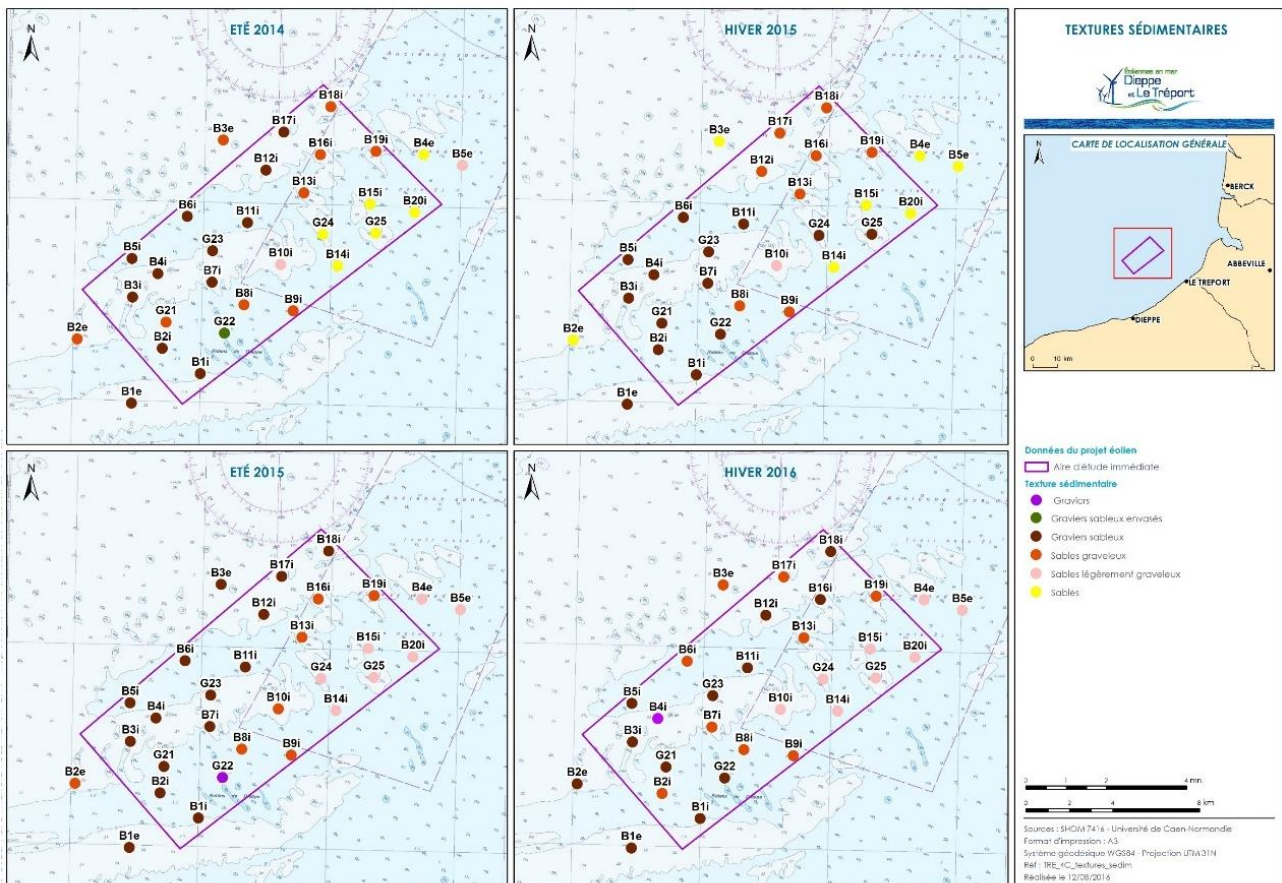
⁴ Diamètre pour lequel 50% des grains en nombre sont plus petit, il représente la taille moyenne des grains

Figure 14 – Nature des fonds au niveau de l'air immédiate



(Source : CREOCEAN 2011)

Figure 15 – Textures sédimentaires révélées par les campagnes in situ



(Source : Idra, 2016)

Dans le cadre spécifique des modélisations 3D, les caractéristiques granulométriques retenues sont celles de la station B15i : 315 μm . Une fois de plus, cette hypothèse est conservatrice dans la mesure où cette valeur de D_{50} se situe dans la fourchette basse des granulométries réalisées dans le domaine d'étude.

2.7 Structure 3D fondation jacket

La structure 3D modélisée est présentée ci-dessous. Il s'agit d'un jacket et de ses fondations.

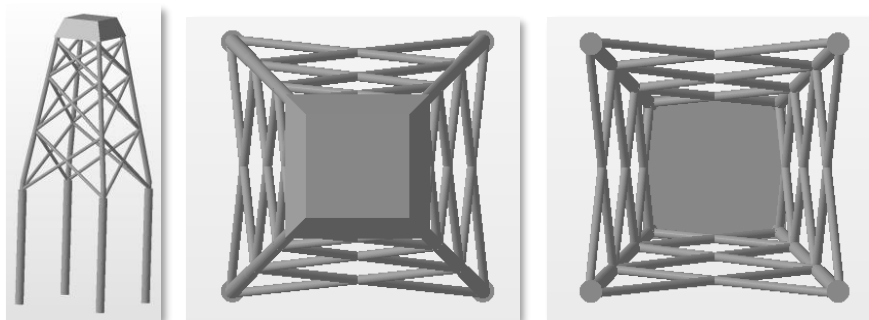
La structure est caractérisée par une hauteur au-dessus du fond de l'ordre de 47 m.

Elle repose sur 4 pieux dont le diamètre extérieur est de 2,2 m. Ces pieux sont fichés à des profondeurs de l'ordre de 70 m au-dessous du fond. Enfin, l'écart inter-pieux est de 24 m.

Cette structure a fait l'objet d'une modélisation en 3 dimensions afin de pouvoir l'intégrer dans le modèle Flow-3D®.

Les figures insérées dans les pages suivantes illustrent la géométrie 3D réalisée.

Figure 16 : Géométrie 3D du jacket et de ses fondations



3 Évaluation des impacts hydrodynamiques et hydrosédimentaires



SOMMAIRE

3.1 Courants de marée	26
3.1.1 Méthodologie	26
3.1.2 Logiciel utilisé	26
3.1.3 Mise en œuvre du modèle	27
3.1.3.1 Emprise	27
3.1.3.2 Maillage	28
3.1.4 Forçages et paramétrage du modèle	30
3.1.4.1 Modèle global TPXO	30
3.1.4.2 Fermeture turbulente	30
3.1.5 Calage et validation du modèle	30
3.1.5.1 Niveaux de marée	30
3.1.5.2 Courants de marée	32
3.1.6 Analyse des résultats (modifications des conditions de courant)	34
3.1.6.1 Échelle régionale	34
3.1.6.2 Échelle locale	35
3.1.7 Synthèse des impacts sur les courants de marée	37
3.2 États de mer	38
3.2.1 Méthodologie	38
3.2.2 Logiciel utilisé	38
3.2.3 Emprise et maillage	38
3.2.4 Scénarii des états de mer retenus	38
3.2.5 Analyse des résultats (modifications de la propagation des vagues vers la côte)	41
3.2.6 Synthèse des impacts sur les états de mer	44
3.3 Dynamique sédimentaire à l'échelle régionale	45
3.3.1 Méthodologie	45
3.3.2 Modèle de transport sédimentaire	45
3.3.3 Emprise et maillage	45
3.3.4 Scénarii retenus	45
3.3.5 Analyse des résultats	46
3.3.6 Synthèse des impacts sur les flux sédimentaire à l'échelle régionale	53
3.4 Dynamique sédimentaire à l'échelle d'une fondation	54
3.4.1 Estimations préliminaires des affouillements en pied de fondation, sur la base de formules empiriques	54
3.4.1.1 Estimation des profondeurs maximales d'affouillement	54
3.4.1.2 Extension des figures d'affouillement	54
3.4.1.3 Affouillement d'ensemble pour une fondation jacket	54
3.4.2 Présentation générale de Flow-3D©	55
3.4.3 Emprise du modèle et maillage	57
3.4.4 Conditions limites et hypothèses de modélisation	58
3.4.5 Résultats	59

3.4.6	Synthèse des impacts sur la dynamique sédimentaire à l'échelle d'une fondation	64
3.5	Qualité des eaux	65
3.5.1	Turbidité naturelle du site	65
3.5.2	Méthodologie pour évaluer les turbidités induites par les activités de chantier	66
3.5.3	Modèle utilisé	68
3.5.4	Emprise et maillage	68
3.5.5	Scénarii océaniques retenus	68
3.5.6	Configuration du relargage des fines dans le milieu naturel	68
3.5.7	Analyse des résultats de dispersion des turbidités induites	69
3.5.8	Synthèse des impacts sur la qualité de l'eau	89

3.1 Courants de marée

3.1.1 Méthodologie

L'analyse des impacts potentiels du parc éolien sur les conditions hydrodynamiques de la zone d'étude est basée sur une modélisation numérique. Les variations de niveaux et les courants induits par une marée de vive-eau (coefficient 95) sont calculés en tous points pour les 2 configurations : état initial et état aménagé (qui prend en compte explicitement les fondations, jacket, des 62 éoliennes en tant qu'obstacle aux écoulements). A noter qu'une condition de vive-eau représente un forçage énergétique des courants tout en se produisant régulièrement. Bien entendu l'action du vent local peut moduler les courants de marée sur la zone mais nous ne cherchons pas à reproduire toute la variabilité des conditions sur la zone. L'objectif est bien d'apprécier les ordres de grandeurs des modifications des conditions de courant appréhendés selon leurs principales caractéristiques en intensité et en direction. A noter également que les fondations du poste électrique en mer et du mât de mesures sont prises en compte dans l'évaluation de l'impact sur les conditions hydrodynamiques et hydrosédimentaires par extrapolation des résultats.

3.1.2 Logiciel utilisé

Dans le cadre de l'étude, la version V7P0 du modèle numérique TELEMAC, développée par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la Direction des Recherches et Développements d'EDF, a été utilisée en configuration bidimensionnelle (grandeurs physiques intégrées sur la hauteur d'eau) TELEMAC-2D.

Le modèle TELEMAC-2D résout les équations de Barré de Saint-Venant à deux dimensions d'espace horizontale. Ses résultats principaux sont, en chaque point du maillage de résolution, la hauteur d'eau et l'intensité des courants moyennés sur la verticale.

TELEMAC-2D trouve ses applications en hydraulique à surface libre, maritime ou fluviale et est capable de prendre en compte les phénomènes physiques suivants :

- ▶ propagation des ondes longues avec prise en compte des effets non linéaires,
- ▶ frottement sur le fond,
- ▶ turbulence,
- ▶ zones sèches dans le domaine de calcul : bancs découvrant,
- ▶ entraînement par le courant et diffusion d'un traceur, avec des termes de création ou de disparition,
- ▶ suivi de flotteurs et dérives lagrangiennes,

Validé sur un ensemble de tests de référence, et déjà utilisé lors de nombreuses études, TELEMAC-2D a montré ses capacités à estimer de façon fiable les courants de marée à l'approche des côtes, et derrière des obstacles maritimes. La mise en place d'un modèle bidimensionnelle est justifiée par un forçage des courants (par la marée) principalement barotrope.

3.1.3 Mise en œuvre du modèle

Un premier modèle a été mis en place sans prendre en compte les éoliennes dans le maillage, afin d'optimiser les temps de calcul dans une première phase de calage/validation du modèle

Dans une deuxième phase, le maillage du modèle a été raffiné au niveau de chaque éolienne et deux configurations ont été considérées :

- ▶ Un état initial sans aucune modification de la bathymétrie à la localisation des éoliennes
- ▶ Un état dit « aménagé » pour lequel les éléments des fondations jacket, sont spécifiés en tant qu'obstacle aux écoulements.

3.1.3.1 Emprise

Pour bien représenter les courants sur la zone d'étude, et notamment s'affranchir des effets de bord, le modèle a été mis en place à une échelle relativement large. Les limites marines du modèle doivent également être cohérentes avec la résolution spatiale de la base de donnée TPXO (de résolution $1/30^\circ$) qui permet de spécifier les variations (spatiales et temporelles) de niveau d'eau et de courant le long de ces limites. Les limites marines du modèle (cf. Figure 17) sont les suivantes :

- ▶ Au Sud-Ouest du domaine, une frontière orientée Sud-Nord sur une distance d'environ 40km depuis la côte à Fécamp,
- ▶ Au Nord-Est du domaine, une limite Ouest-Est d'environ 40km prend appui sur le trait de côte du côté de Boulogne-sur-Mer,
- ▶ Une limite d'environ 70km sur un axe Sud-Ouest/Nord-Est.

Figure 17 – Emprise du modèle numérique



3.1.3.2 Maillage

Le code TELEMAC discrétise les calculs selon un maillage à éléments finis, ou mailles triangulaires, du domaine de calcul. Cette discrétisation de l'espace permet à l'utilisateur de moduler la taille de la maille suivant les zones d'intérêt. Dans notre cas, le maillage a été construit en plusieurs étapes permettant de préciser la résolution depuis le large, avec des mailles d'environ 1000m de côté, vers la zone d'intérêt. Sur la zone du parc, les mailles les plus grandes sont de 300m et s'affinent en s'approchant des fondations où elles sont inférieures au mètre pour pouvoir intégrer les éléments tubulaires de la structure jacket en tant qu'obstacles aux écoulements.

Les fondations de type jacket, dont toute la complexité géométrique de structures en treillis (jambes inclinés, croisillons...) ne peut être prise en compte dans le modèle, ont été spécifiées selon un principe d'équivalence qui respecte la surface totale d'obstacle à l'écoulement. En pratique, les 4 piliers (jambes) porteurs sont intégrés et entre ces derniers des pylônes secondaires verticaux permettent de prendre en compte les surfaces d'obstacle des croisillons. Ainsi pour notre cas d'étude 3 pilonnes de diamètre 0.87m seront positionnés entre deux piliers porteurs, soit un total de 12 pieux secondaires positionnés verticalement.

Le modèle comporte 219 607 nœuds de calcul.

Les figures suivantes permettent de visualiser le maillage global et zoomé sur les éoliennes en état aménagé (jacket).

Figure 18 – Maillage global

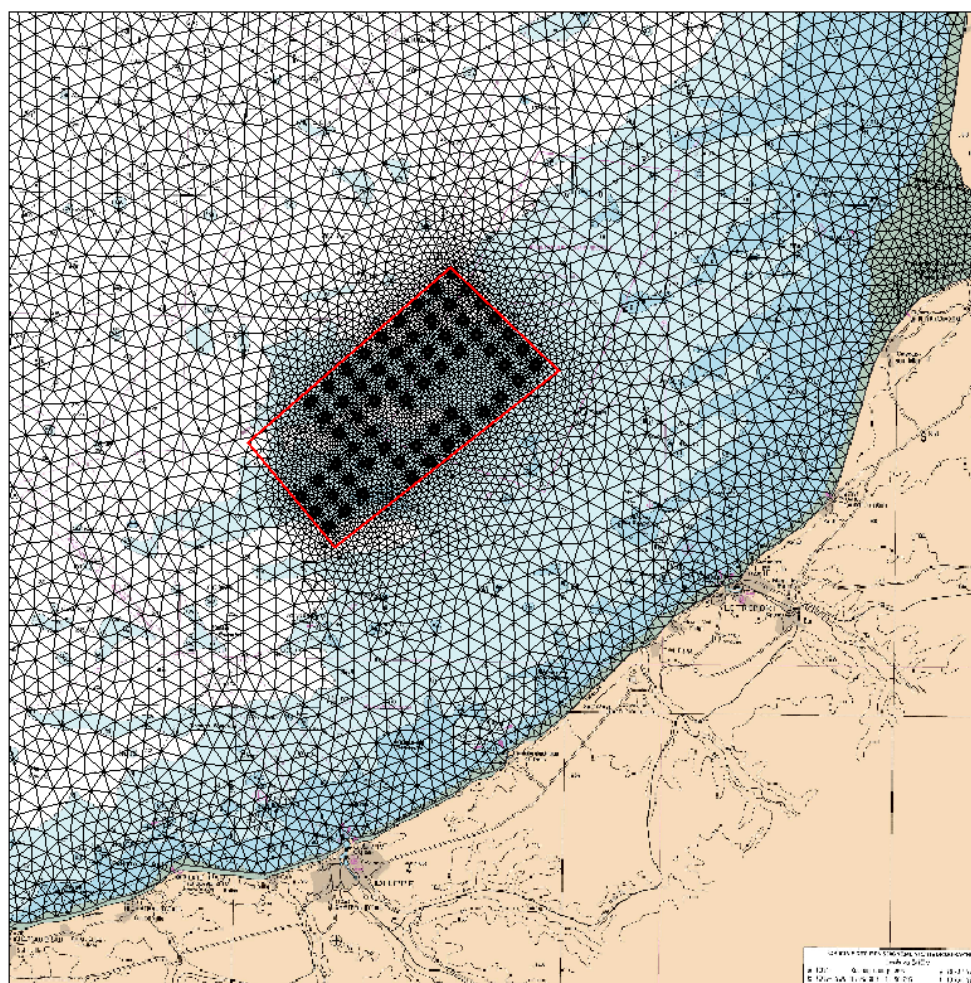


Figure 19 – Détail du maillage au niveau du parc

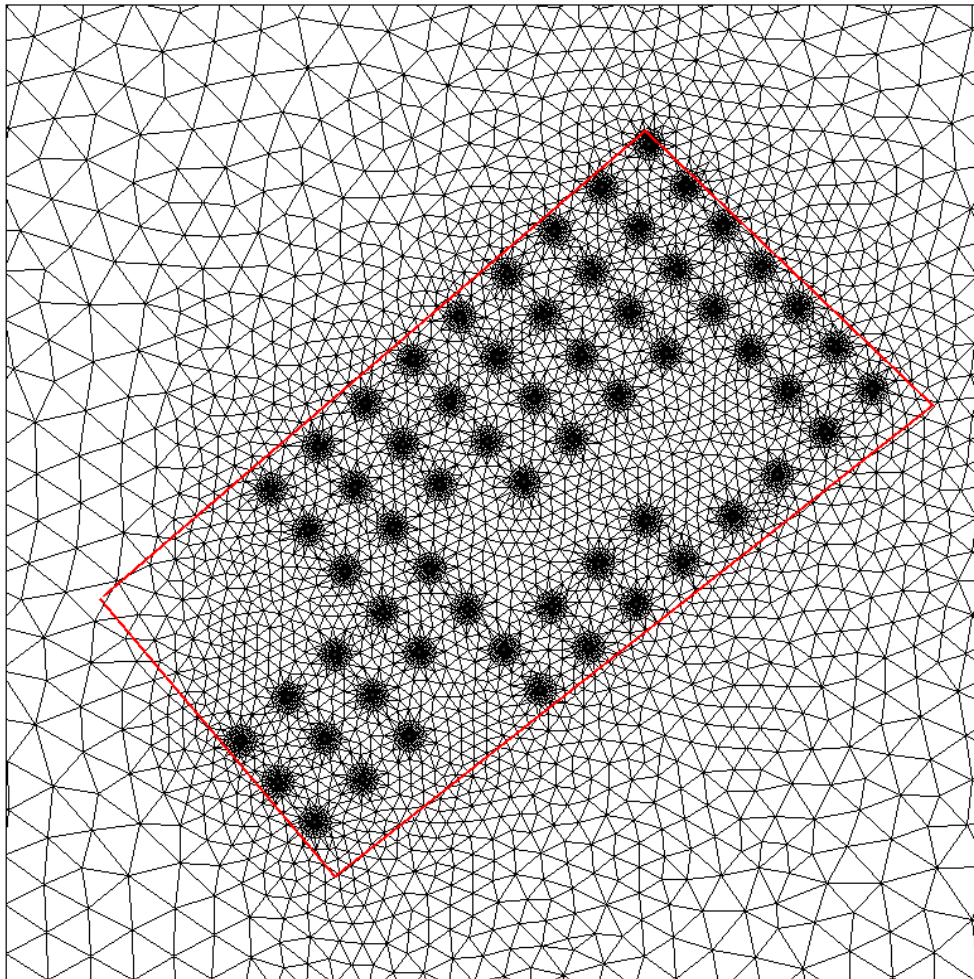
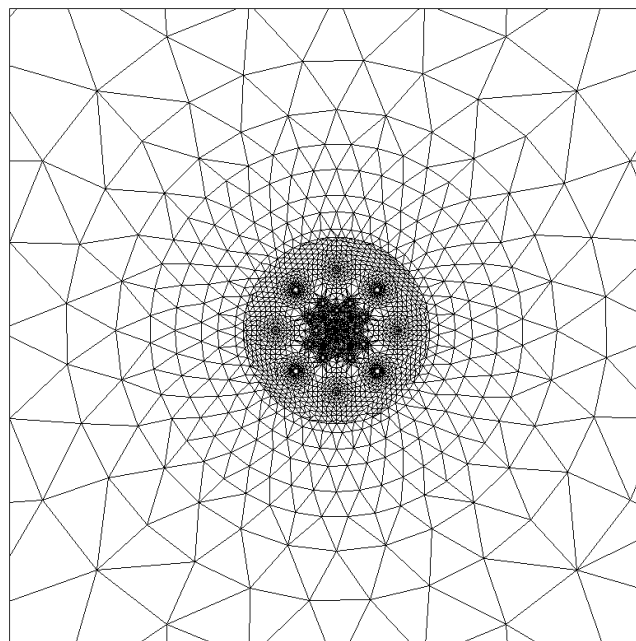


Figure 20 – Maillage pour une éolienne fondation jacket



3.1.4 Forçages et paramétrage du modèle

3.1.4.1 Modèle global TPXO

Les conditions aux limites du modèle TELEMAC-2D sont spécifiées à l'aide d'un module interne dédié qui prédit des variations de niveau d'eau et de courants à partir d'un signal de marée décomposé en 13 harmoniques. Sur la façade Atlantique la discrétisation spatiale du modèle TPXO est d'environ $1/12^\circ$.

Les 13 harmoniques de la base de données sont les suivantes :

- ▶ 8 primaires : M2, S2, N2, K2, K1, O1, P1 et Q1,
- ▶ 2 longues périodes : Mf et Mm,
- ▶ 3 non linéaires : M4, MS4 et MN4.

3.1.4.2 Fermeture turbulente

La fermeture turbulente horizontale du modèle est basée sur la formulation de Smagorinsky.

3.1.5 Calage et validation du modèle

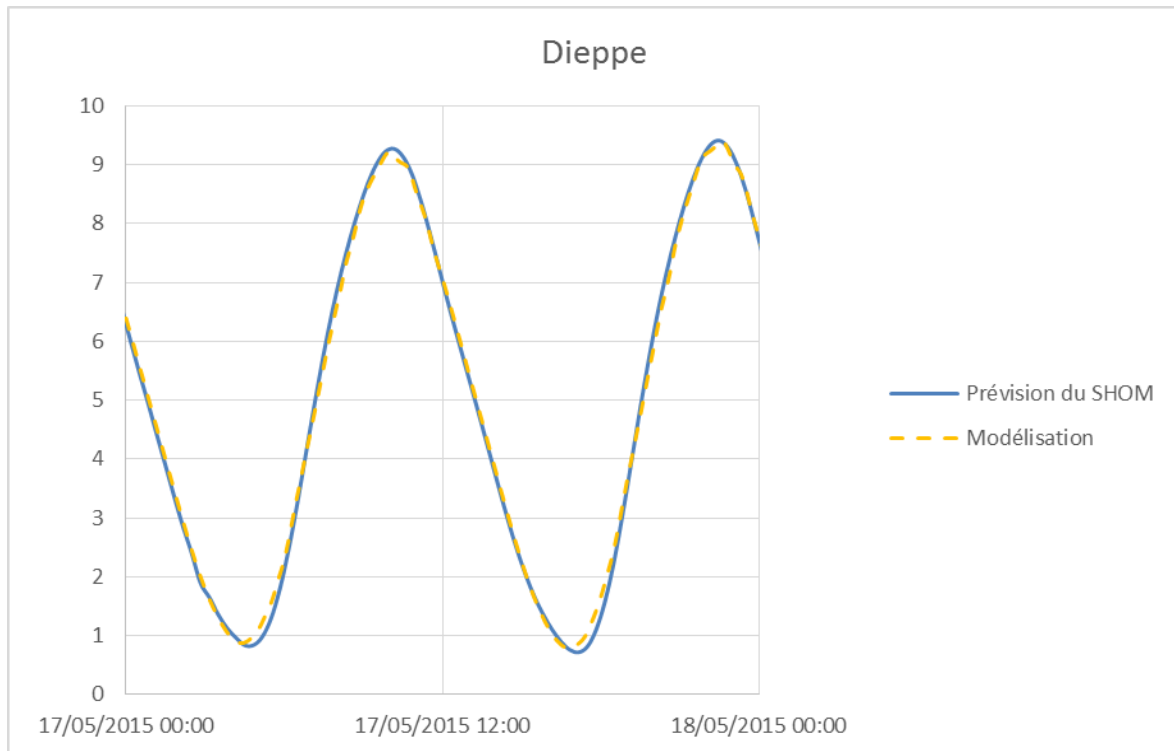
Différents jeux de données ont été utilisés dans le but de valider le modèle hydrodynamique.

- ▶ SHOM : Prédiction des niveaux de marée au port de Dieppe (REFMAR),
- ▶ Previmer : champs de courant (direction et intensité),
- ▶ Campagne de mesures des conditions hydrodynamiques réalisée par le bureau d'étude Fugro en 2015.

3.1.5.1 Niveaux de marée

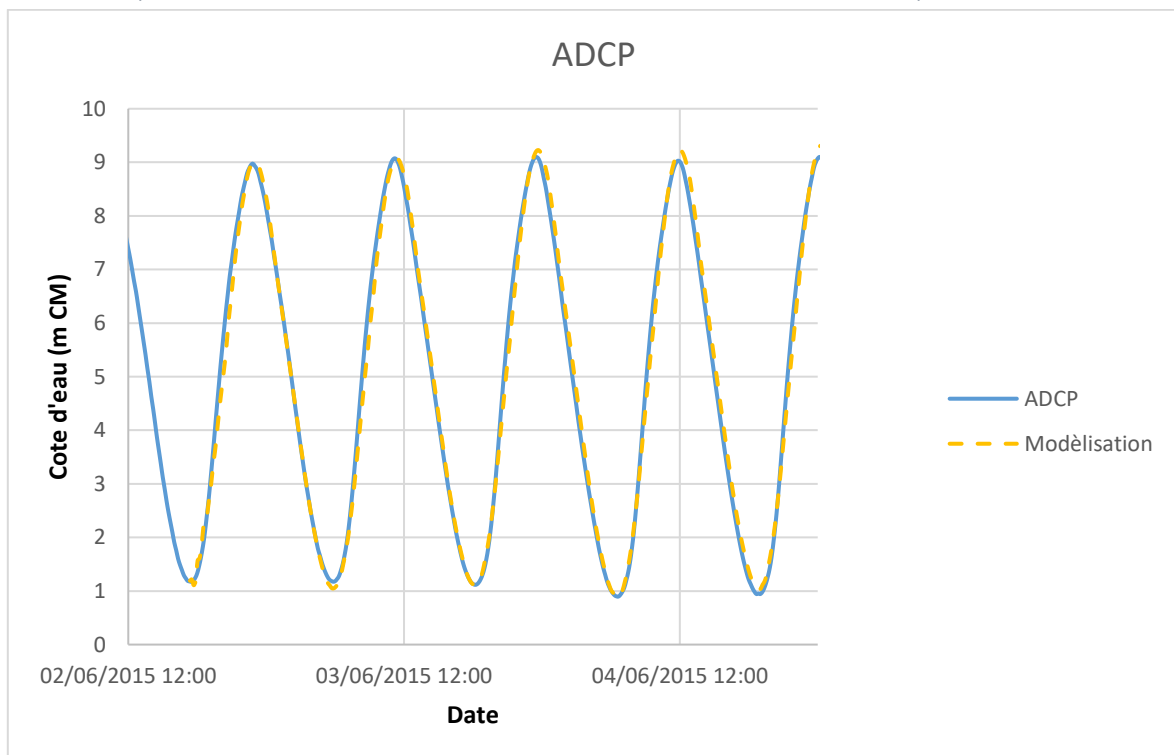
Les niveaux d'eau calculés par le modèle TELEMAC-2D ont été comparés aux niveaux d'eau prédits par le SHOM au port de Dieppe pour une marée de vive eau (coefficient 95) et au niveau de l'ADCP pour les données disponibles (01/06/2015 au 10/06/2015). Les graphiques ci-dessous permettent d'apprécier la bonne représentation des niveaux de marée simulés par le modèle.

Figure 21 – Comparaison des cotes d'eau calculées et prédites au niveau du port de Dieppe



(Source : REFMAR)

Figure 22 – Comparaison des cotes d'eau mesurées au droit de l'ADCP et calculés par le modèle TELEMAC-2D



3.1.5.2 Courants de marée

Les champs de courants (vitesse et direction) simulés ont été comparés dans un premier temps avec ceux prédits par le programme Previmer.

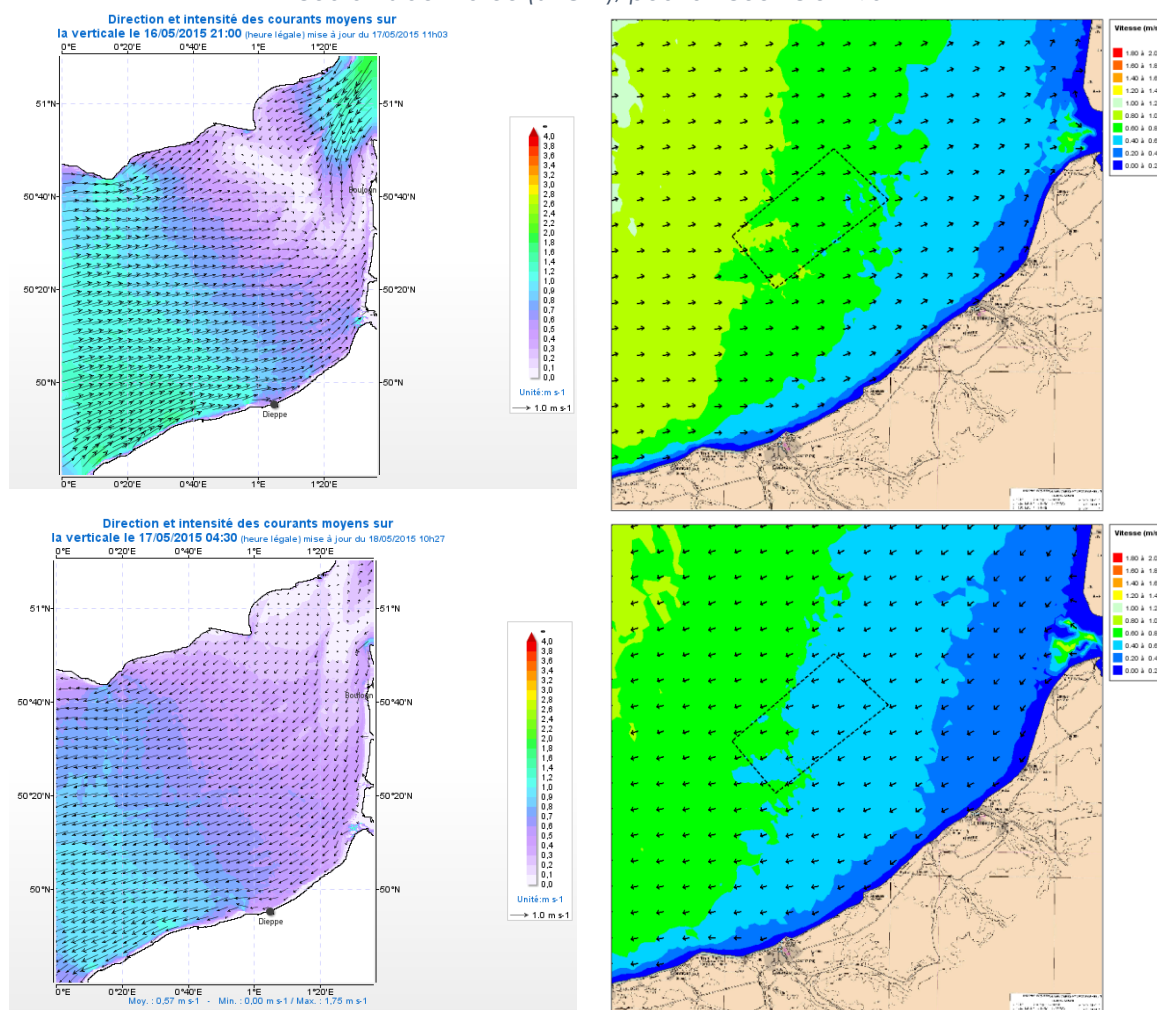
Les modèles mis en place dans ce programme rendent compte d'une précision relativement fine à proximité de Dieppe-le Tréport.

Les comparaisons sont présentées (Figure 23) aux environs des maxima de flot et de jusant.

On peut retenir principalement de ces comparaisons que :

- ▶ L'orientation des champs de courants est très satisfaisante à l'échelle régionale et à l'échelle locale du parc,
- ▶ Les ordres de grandeur pour les intensités de courants sont satisfaisants au niveau de l'aire immédiate (0.8 à 0.9 m.s⁻¹) et sur l'ensemble du domaine de calcul.
- ▶ Le modèle mis en place présente un bon niveau de validation et les modifications induites par les fondations des éoliennes pourront être analysées directement à partir des cartes de comparaison des champs de courant pour les deux configurations envisagées (état initial et état aménagé).

Figure 23 – Comparaison des champs de courants calculés par le modèle TELEMAC-2D et issus de l'atlas des courants de marée (SHOM), pour un coefficient 95



Un deuxième niveau de vérification a été opéré en se basant sur les mesures issues de la campagne de Fugro de 2015. Une partie des données brutes ont été transmises à BRLi, soit du 01/06/2015 au 10/06/2015.

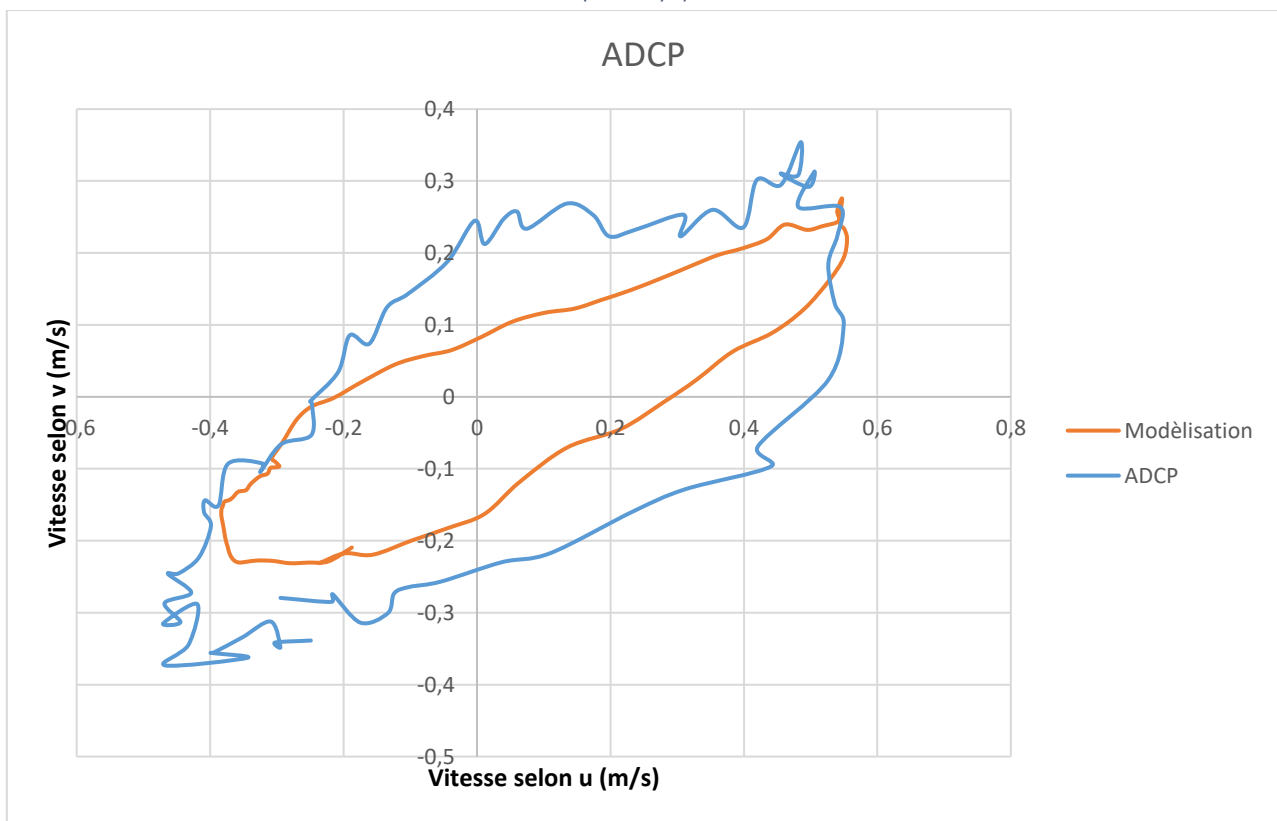
La Figure 24 détaille la répartition des courants à chaque moment pour un cycle de marée complet. Les données issues de l'ADCP ont été moyennées sur la verticale.

D'après l'analyse de ces résultats, nous pouvons donc dire :

- ▶ L'orientation des courants, notamment au maximum de flot et de jusant, est satisfaisante,
- ▶ Les ordres de grandeur pour les maxima de flot et de jusant sont respectés,
- ▶ L'asymétrie flot/jusant est bien reproduite
- ▶ Une sous-estimation des courants en dehors des maxima est à noter, en particulier pour le jusant.

Le modèle présente un bon niveau de calibration.

Figure 24 – Comparaison des champs de courants calculés par le modèle et indiqués dans l'atlas des courants de marée (SHOM), pour un coefficient 95



3.1.6 Analyse des résultats (modifications des conditions de courant)

Pour analyser les modifications induites par les éoliennes des cartes de différentiel d'intensité de vitesse entre les deux configurations (état initial et état aménagé), pour les deux fondations, ont été produites aux moments des maxima de flot et de jusant, à différentes échelles spatiales :

- ▶ Une échelle globale qui permet d'apprécier les modifications induites par l'ensemble du parc (Figure 25 à Figure 26) et des secteurs côtiers alentours,
- ▶ Une échelle locale, regroupant 4 éoliennes qui permet notamment d'appréhender l'effet cumulatif de plusieurs éoliennes (Figure 27 et Figure 28).

3.1.6.1 Échelle régionale

La cartographie des modifications des conditions de courant à une échelle régionale ne montre pas d'impact, que ce soit en flot ou en jusant. On entrevoit uniquement des modifications des conditions de courant localisées autour de chacune des fondations.

Figure 25 – Différentiel des vitesses au maximum de flot – fondation jacket

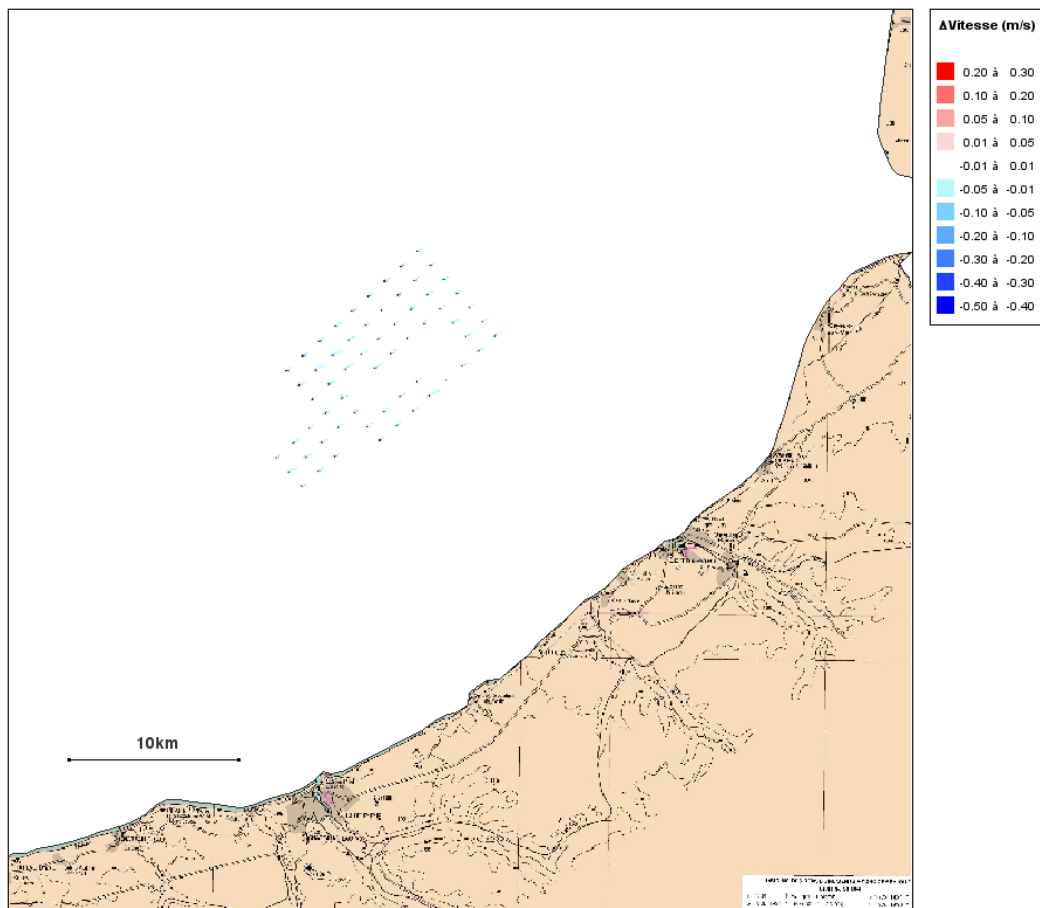
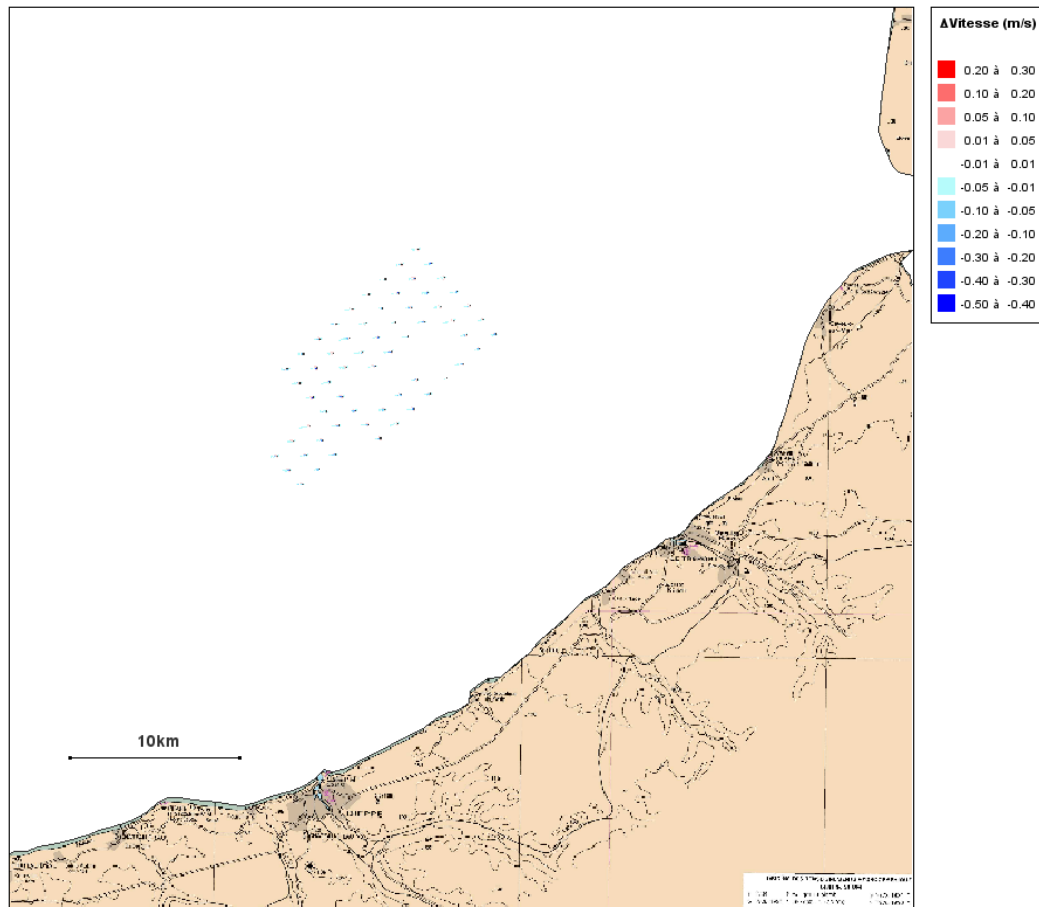


Figure 26 – Différentiel des vitesses au maximum de jusant – fondation jacket



3.1.6.2 Échelle locale

A une échelle plus locale, comme le montrent les figures ci-après, les modifications des conditions de courant par les fondations (jacket) peuvent être synthétisées comme suit :

- ▶ L'impact le plus notable est une décélération en aval de chacune des fondations qui font obstacle à l'écoulement,
- ▶ Les ordres de grandeur de cette décélération sont les suivants : -30% à 30m de l'éolienne, -10% à 120m et -1% à 400 m de l'éolienne.

Il est à noter une zone d'accélération de part et d'autre de l'éolienne. Cette augmentation est de l'ordre de +1% à 130m.

Il est important de noter que les modifications ont été analysées lors des maxima de flot et de jusant, donc selon une approche plutôt maximaliste. Pour les autres instants de la marée, les courants étant plus faibles, les pertes de quantité de mouvement (pertes de charge) seront plus faibles. En effet ces pertes de charge sont une fonction quadratique de l'intensité du courant.

Figure 27 – Différentiel des vitesses au maximum de flot zoomé sur les fondations jacket

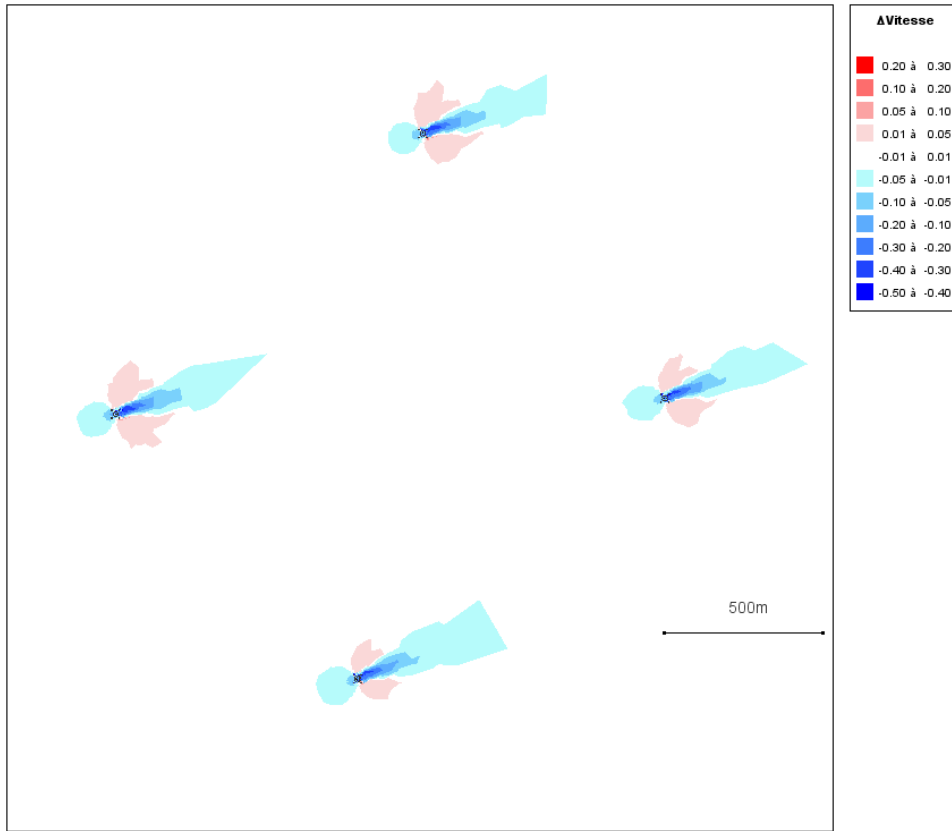
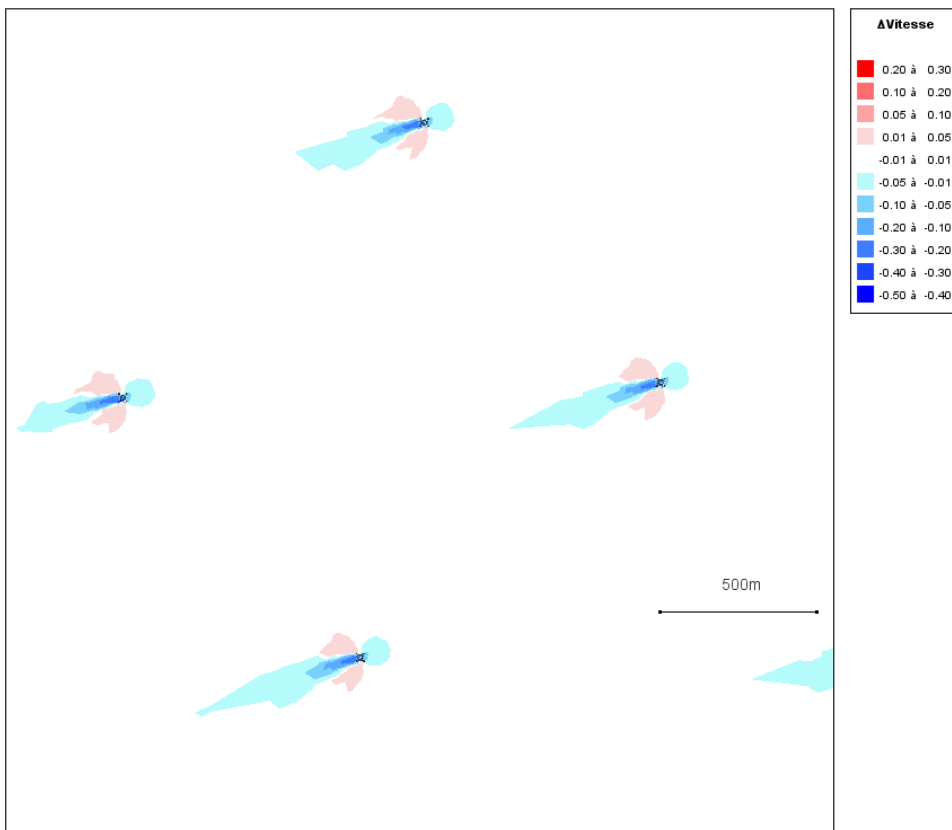


Figure 28 – Différentiel des vitesses au maximum de jusant zoomé sur les fondations jacket



3.1.7 Synthèse des impacts sur les courants de marée

L'impact des fondations, jacket, sur les surfaces libres est nul.

Les impacts des fondations jacket sur les conditions de courant restent localisés à l'intérieur du parc et ne sont significatifs qu'à proximité immédiate des structures qui font obstacle à l'écoulement. La modification la plus étendue est une décélération à l'aval de chaque fondation avec des diminutions de : 10% à 120m et 1% à 400m.

Les augmentations de courant sont localisées à proximité des éoliennes, 130m. Ces dernières ne dépassent pas +1% de la vitesse initiale du courant, soit environ 0.01 m/s.

Nous pouvons donc retenir que les impacts sont considérés comme négligeables quand on s'éloigne des fondations à partir d'une distance de 120m. Au-delà de ces distances, les impacts sont nuls.

Le fait que ces modifications sont locales et restent d'un ordre de grandeur très inférieur à la distance interéolienne permet d'affirmer l'absence d' « effet de groupe » ou effet cumulatif d'une éolienne avec l'autre.

3.2 États de mer

3.2.1 Méthodologie

L'impact potentiel des fondations jacket sur les états de mer à l'échelle régionale a été analysé par la mise en œuvre d'un modèle numérique de propagation de la houle du large à la côte. La modélisation a été réalisée pour des houles de tempêtes et permettra un comparatif entre l'état aménagé (avec l'ensemble des éoliennes munies de fondation jacket) et l'état initial.

3.2.2 Logiciel utilisé

La chaîne de calcul TELEMAR contient un module permettant de propager du large à la côte des états de mer. Le module TOMAWAC s'appuie sur un maillage aux éléments finis, il modélise en chaque point du modèle l'évolution en espace et en temps du spectre directionnel des états de mer. Les principaux processus physiques pris en compte par le modèle sont :

- ▶ Réfraction,
- ▶ Génération des vagues par le vent,
- ▶ Dissipation d'énergie par déferlement (déferlement bathymétrique et moutonnement),
- ▶ Dissipation d'énergie par frottement sur le fond.

3.2.3 Emprise et maillage

Le module TOMAWAC s'appuie sur les deux maillages, initial et aménagé, construits lors de l'étude des courants de marée.

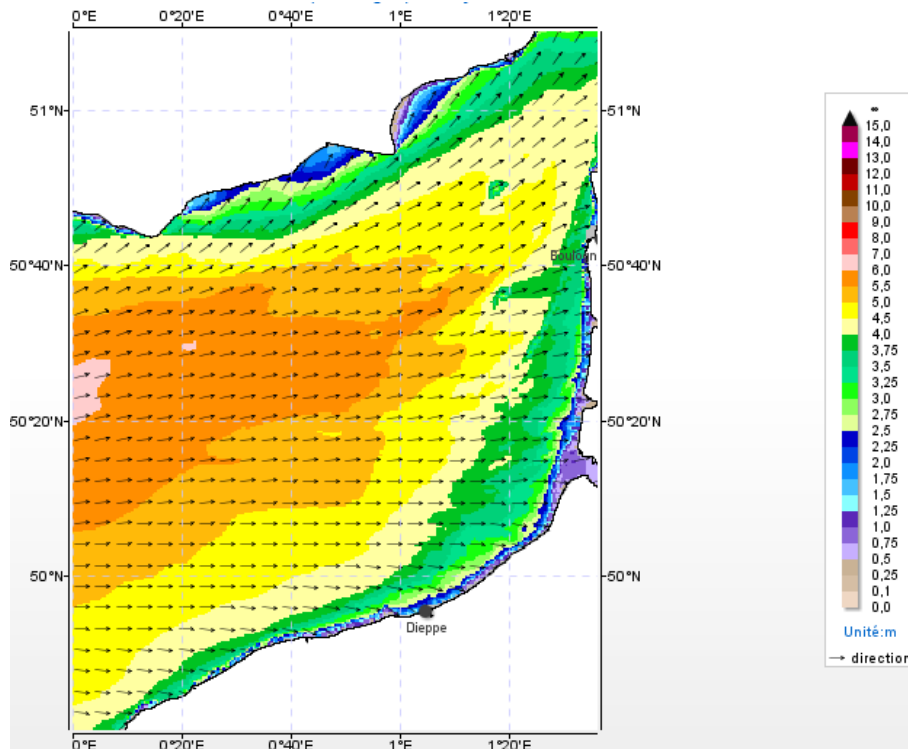
3.2.4 Scénarii des états de mer retenus

Sur la zone d'étude, les tempêtes proviennent préférentiellement du secteur Ouest. Néanmoins des coups de vent de Nord à Nord-Est peuvent être observés. Même si ces derniers induisent des conditions de vague de moindre énergie, nous en avons tenu compte pour appréhender les modifications de conditions de vagues qui se propagent vers la côte de Dieppe. Par conséquent des tempêtes correspondant aux deux secteurs de provenance au large ont été simulées.

- ▶ Tempête Ruzica du 08/02/16 : le pic de tempête est indiqué par le site PREVIMER à 18h. Au large les caractéristiques de la houle sont les suivantes, Hauteur significative 5m, Période pic de l'ordre de 10s, Direction de provenance secteur Ouest. Aux-abords du parc les hauteurs significatives varient de 3.5 à 4m.
- ▶ Coût de vent du 15/02/2016 : le pic est indiqué par le site PREVIMER à 08h du matin. Au large les caractéristiques de la houle sont les suivantes, Hauteur significative de l'ordre de 2m, Période pic 6.5s, Direction de provenance secteur Nord-Est. Aux-abords du parc les hauteurs significatives atteignent quasiment 2m.

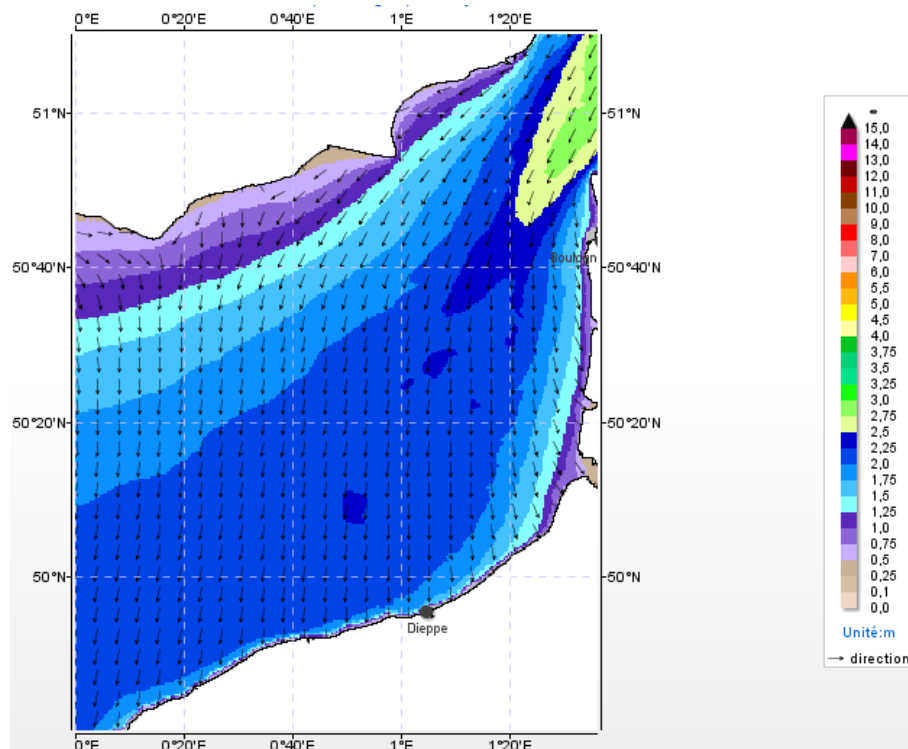
Les figures ci-après montrent les deux évènements et l'évolution spatiale des hauteurs significatives à deux échelles spatiales.

Figure 29 – Variation spatiale de hauteur significative lors de la tempête Ruzica à 18:00 (Du Cap d'Antifer au Cap Gris-Nez)



(Source : Previmer)

Figure 30 – Variation spatiale de hauteur significative lors de la tempête du 15/02/2016 à 08 :00 (Du Cap d'Antifer au Cap Gris-Nez)



(Source : Previmer)

Les modifications de propagation des vagues ont été simulées pour ces 2 conditions de tempêtes et pour deux niveaux de marée, un niveau de pleine mer de vive-eau et un niveau de basse mer de vive-eau.

Pour les simulations à pleine mer comme à basse mer, les états de mer pour ces deux tempêtes sont globalement bien reproduits par le modèle. Au niveau du parc une certaine variabilité spatiale, qu'on n'observe pas sur les résultats Previmer, est simulée par notre modèle ; il se peut que ces différences, qui restent mineures, s'expliquent par une bathymétrie décrite plus finement par le modèle TOMAWAC mis en place.

Figure 31 – Comparatif entre les prévisions PREVIMER et le modèle TOMAWAC – Tempête Ruzica à pleine mer pour l'état initial

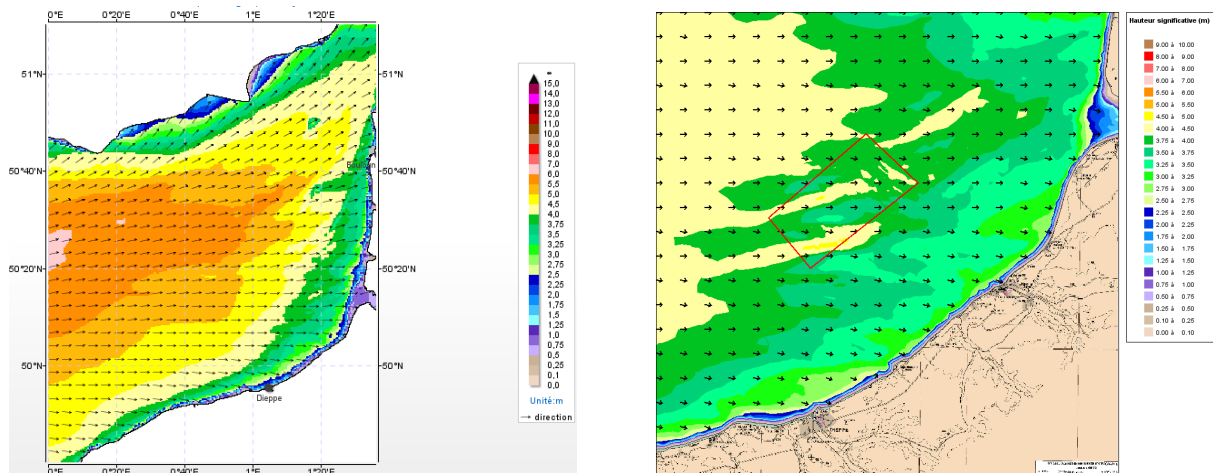
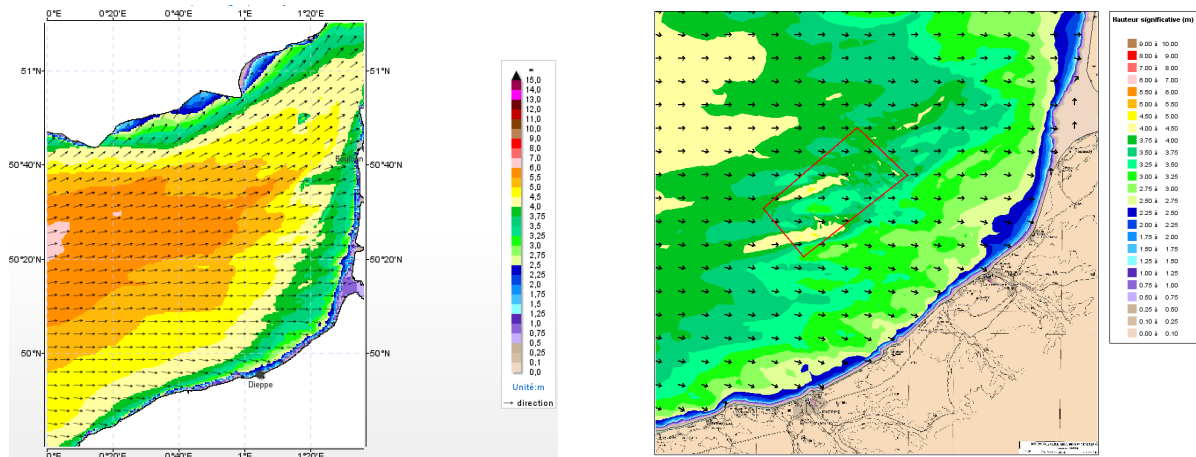


Figure 32 – Comparatif entre les prévisions PREVIMER et le modèle TOMAWAC – Tempête Ruzica à basse mer pour l'état initial



Les figures suivantes présentent les comparaisons TOMAWAC/Previmer pour l'évènement du 15/02/2016. Les remarques précédemment faites pour les tempêtes Ruzica sont également valables pour l'évènement du 15/02/2016 qui est bien reproduit par le modèle TOMAWAC.

Figure 33 – Comparatif entre les prévisions PREVIMER et le modèle TOMAWAC – Le coup de vent de Nord-Est à pleine mer pour l'état initial

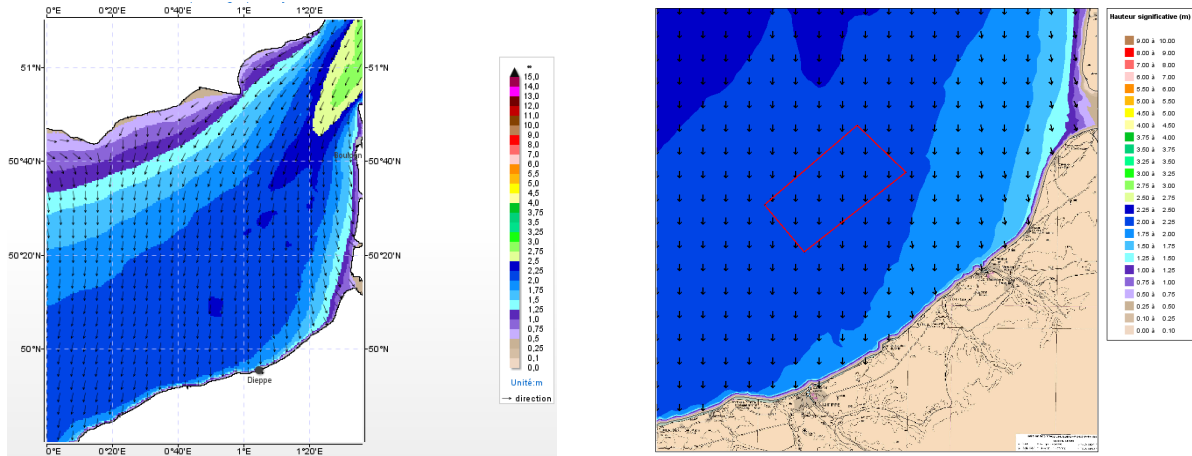
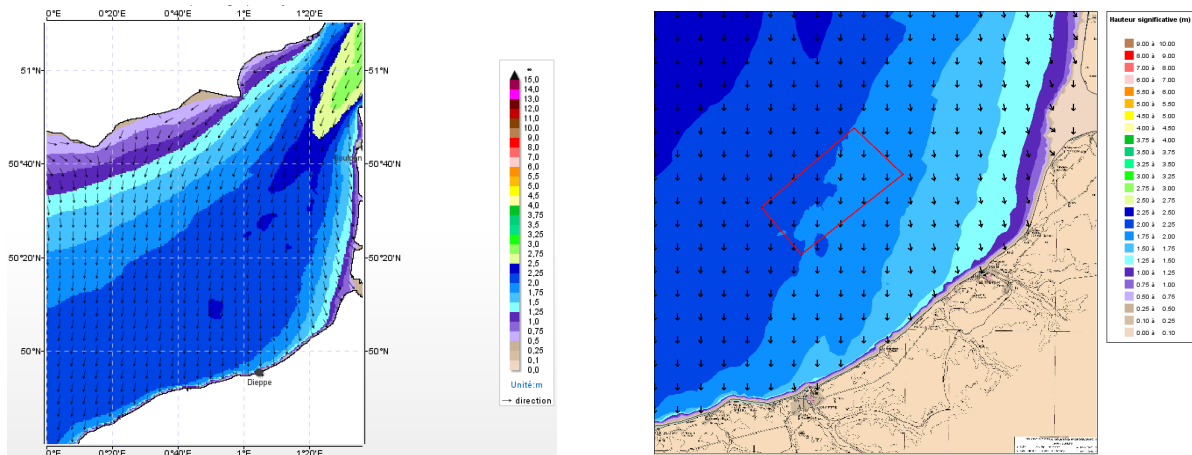


Figure 34 – Comparatif entre les prévisions PREVIMER et le modèle TOMAWAC – Le coup de vent de Nord-Est à basse mer pour l'état initial



3.2.5 Analyse des résultats (modifications de la propagation des vagues vers la côte)

Des cartes de différentiel du paramètre Hs sont analysées pour les conditions de la tempête Ruzica et celle du 15/02/2016 à une échelle globale qui permet d'apprécier une diminution de l'énergie des vagues liée à l'ensemble des éoliennes du parc.

Les diminutions d'énergie des vagues en arrière des éoliennes ont été quantifiées à partir d'un différentiel de Hs de 0.05m, qui correspond à quelques % des hauteurs de vagues qui se propagent sur le parc pour les deux conditions de tempête. On peut noter, pour l'évènement Ruzica, un effet d'accumulation de l'ensemble des éoliennes vis-à-vis des pertes d'énergie simulées. Mais cet effet cumulatif reste négligeable puisqu'il correspond à une valeur absolue de -0.05 m pour des houles d'amplitude de 4 m pour l'évènement. L'effet cumulatif s'étend sur une distance d'environ 16km.

Il n'y a pas de zone de diminution en aval du parc pour l'évènement de provenance Nord.

A l'approche de la côte les champs de vagues se reforment et leur hauteur n'est plus contrôlée que par la bathymétrie locale, diminuant progressivement par frottement au fond et déferlement, jusqu'à la côte.

Figure 35 – Différentiel des hauteurs significatives à pleine mer – Tempête Ruzica – Fondation jacket

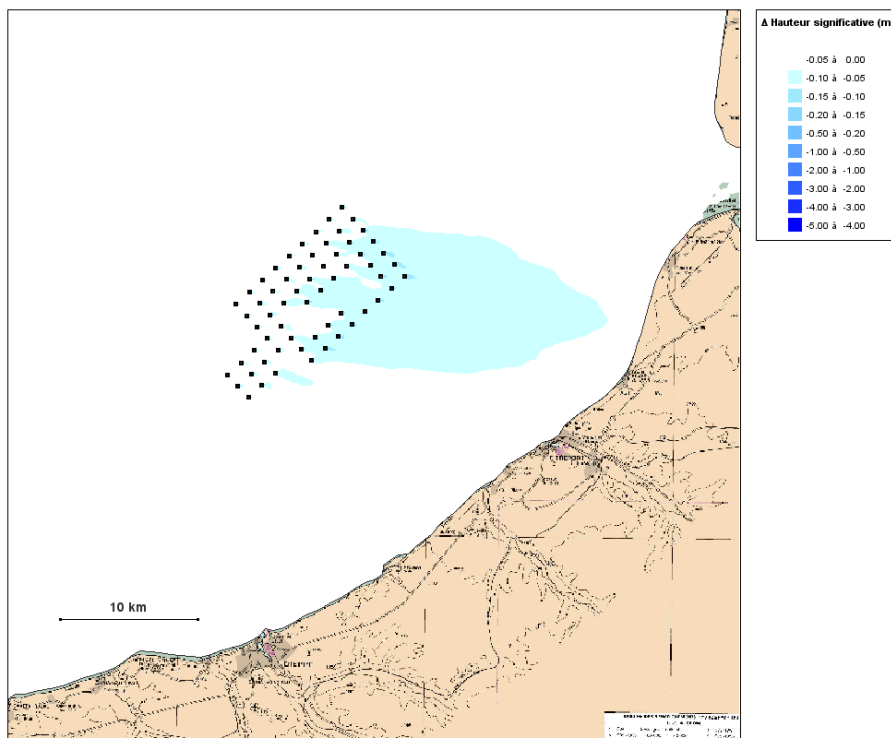


Figure 36 – Différentiel des hauteurs significatives à basse mer – Tempête Ruzica – Fondation jacket

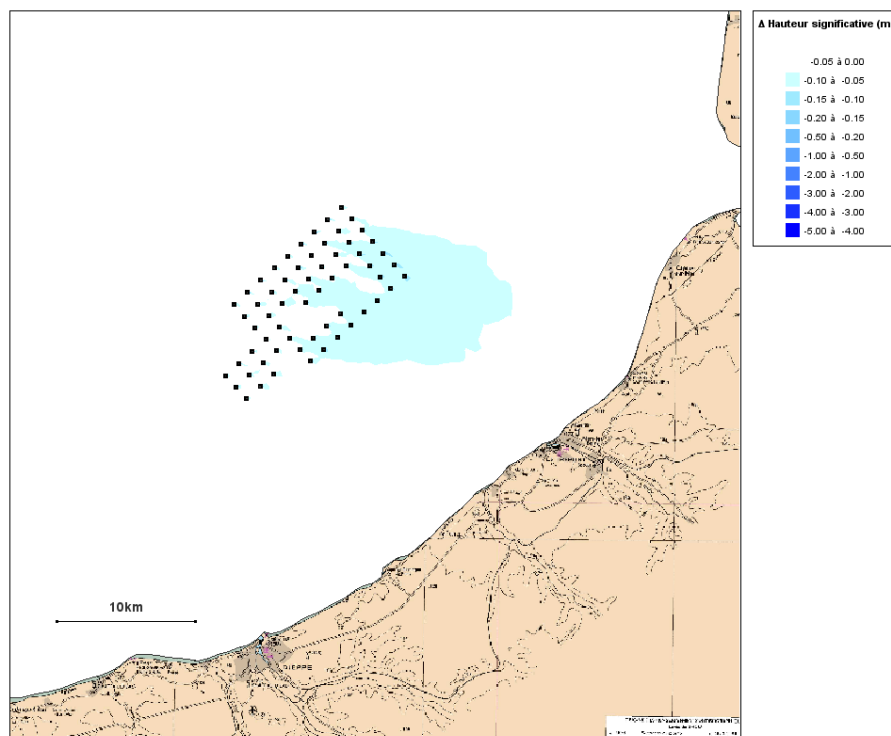


Figure 37 – Différentiel des hauteurs significatives à pleine mer – Evènement de Nord-Ouest – Fondation jacket

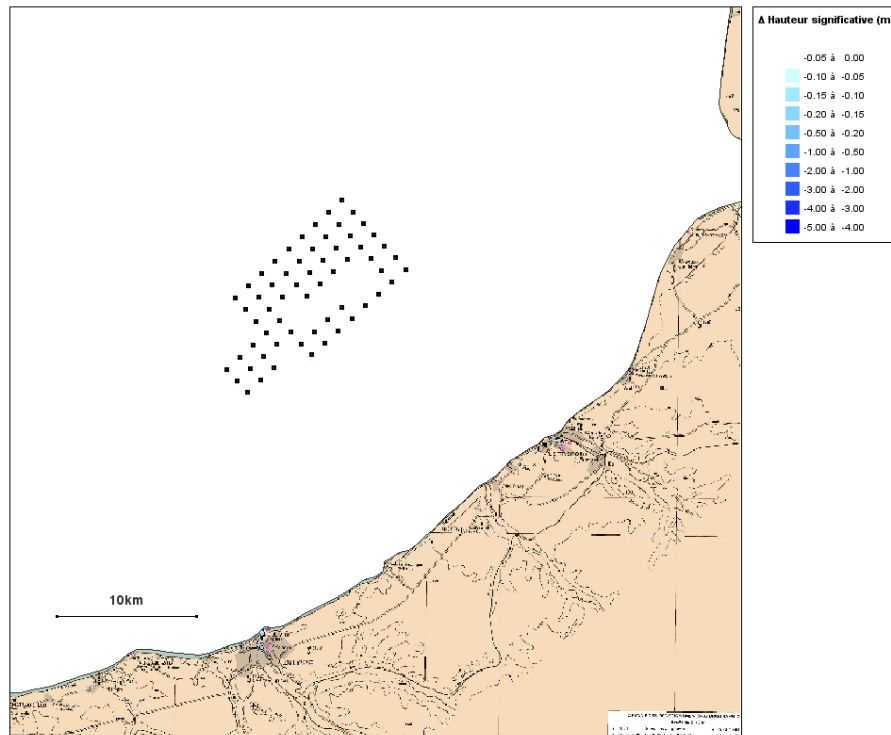
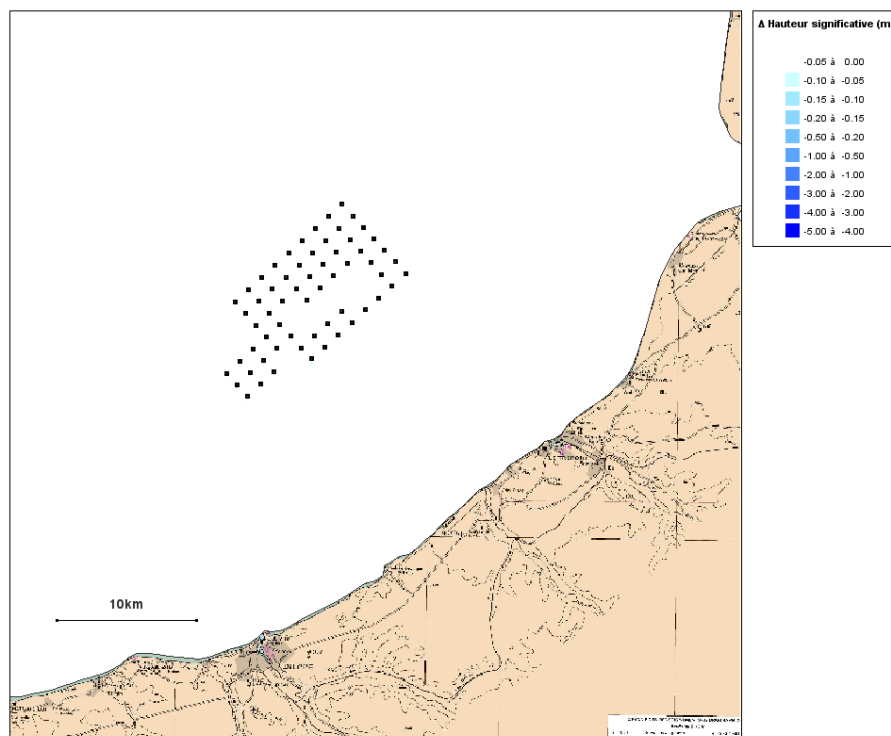


Figure 38 – Différentiel des hauteurs significatives à basse mer – Evènement de Nord-Ouest – Fondation jacket



3.2.6 Synthèse des impacts sur les états de mer

En se propageant à travers le champ éolien, les vagues vont subir localement des pertes d'énergie au niveau de chaque fondation. Un effet cumulatif à l'échelle de l'ensemble des éoliennes est possible et a pu être évalué grâce au modèle mis en place qui intègre explicitement l'ensemble des fondations jackets.

D'après les résultats nous observons que :

- ▶ Pour un évènement de provenance Nord, aucun effet cumulatif n'est observé,
- ▶ Pour l'évènement Ruzica, la zone d'atténuation est observable sur une distance d'environ 16 km. A cette distance la diminution de la hauteur significative n'est que -2% (0.05m) sur des houles dont la hauteur significative est de 3,5 à 4 m, ce qui est négligeable.

Même pour des événements de très forte énergie, les modifications des conditions de vagues par le parc éolien sont très peu sensibles en dehors du parc. Les modifications des vagues incidentes à la côte sont négligeables.

3.3 Dynamique sédimentaire à l'échelle régionale

3.3.1 Méthodologie

Les simulations numériques qui sont réalisées sont basées sur la notion de capacité de transport et les modifications de la dynamique sédimentaire sableuse concernent :

- ▶ La zone de sédiments meubles au sein du parc et ses abords,
- ▶ Les possibles flux solides au travers de cette large zone,
- ▶ Les flux solides qui transitent de part et d'autre du parc et en particulier en se rapprochant de la côte.

Les modifications des transports sableux potentiels sur la zone d'étude ont été évaluées pour une condition de forte énergie, lors de la tempête Ruzica. Considérer un tel événement répond à deux objectifs :

- ▶ Se placer dans une condition pendant laquelle les transports sableux sont très importants et ont une contribution significative aux bilans sédimentaires à l'échelle d'une année. On rappelle la très forte non-linéarité des flux solides en fonction des conditions hydrodynamiques (courants et vagues), un ou plusieurs événements de très forte énergie pouvant contribuer à la dynamique sédimentaire d'un site autant que plusieurs mois ou plusieurs années de conditions faiblement à moyennement énergétiques.
- ▶ Appréhender les impacts potentiels les plus importants.

3.3.2 Modèle de transport sédimentaire

Le module SISYPHE calcule à partir des conditions hydrodynamiques du site (courants et houles), à chaque instant de la marée et en tout point du modèle, la capacité instantanée de transport pour une classe de sédiment donnée. La formulation de Soulsby-Van Rijn (1997) qui a été appliquée permet de prendre en compte les transports par charriage et en suspension sous l'action combinée du courant et des vagues.

3.3.3 Emprise et maillage

Le module SISYPHE s'appuie sur le même maillage que le modèle hydrodynamique.

3.3.4 Scénarii retenus

Les conditions hydrodynamiques résultent d'une combinaison d'une condition de marée et d'une condition de vagues :

- ▶ Marée coefficient 95 (vive-eau),
- ▶ Houle, événement Ruzica (Cf. chapitre 3.2.4).

Trois classes granulométriques ont été considérées 315 μ m, 500 μ m et 2mm, pour appréhender la dynamique sédimentaire sur une gamme assez large (sables aux graviers).

3.3.5 Analyse des résultats

Les transports ont été cartographiés pour les 2 configurations (état initial et état aménagé), aux moments des maxima de flot et de jusant.

Les premiers résultats (Figure 43) sont présentés pour un forçage hydrodynamique d'une marée de vive-eau, sans contribution des vagues, pour des grains de 500 μm . La comparaison des résultats au moment des maxima de flot et de jusant montre bien une asymétrie marquée des transports solides forcés par les courants de marée.

Les résultats suivants (figures suivantes) intègrent la contribution de vagues très énergétiques, caractéristiques de la tempête Ruzica, aux transports solides simulés. Trois classes granulométriques ont été considérées : 315 μm , 500 μm et 2 mm.

Des cartes de différentiel (Etat Initial – Etat aménagé) ont été tracées pour le paramètre d'intensité du transport solide. Les différences visibles sont essentiellement des diminutions de l'intensité du transport solide. Les écarts de transport ne concernent généralement que les abords proches des fondations, avec une diminution sensible du transport en aval du parc (Figure 45 et Figure 47). Cette diminution, qui est en partie liée à une moindre énergie des vagues, reste modérée (-10 %) et est localisée à proximité du parc.

Figure 39 - Transport instantané au maximum de flot pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 315 μm

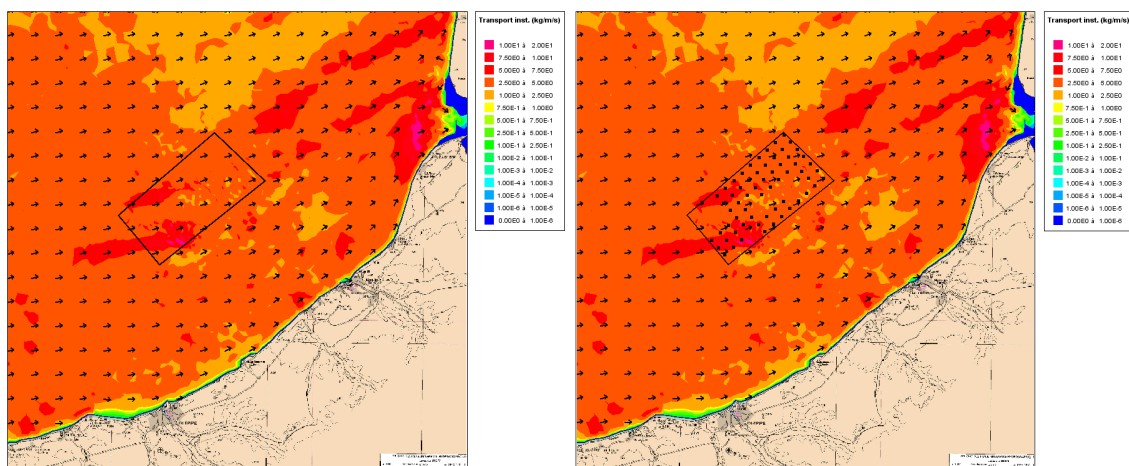


Figure 40 - Différentiel du transport instantané au maximum de flot – jacket – granulométrie 315µm

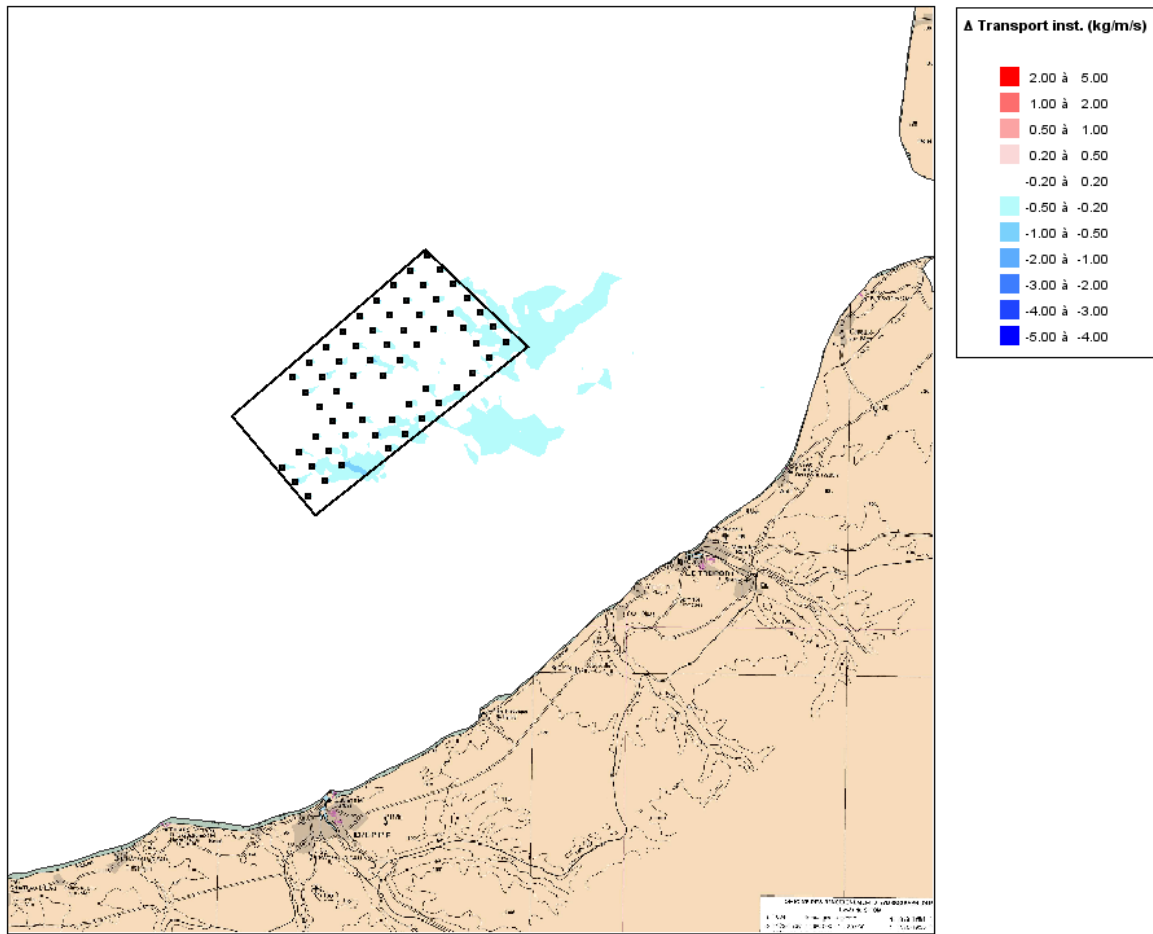


Figure 41 - Transport instantané au maximum de jusant pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 315µm

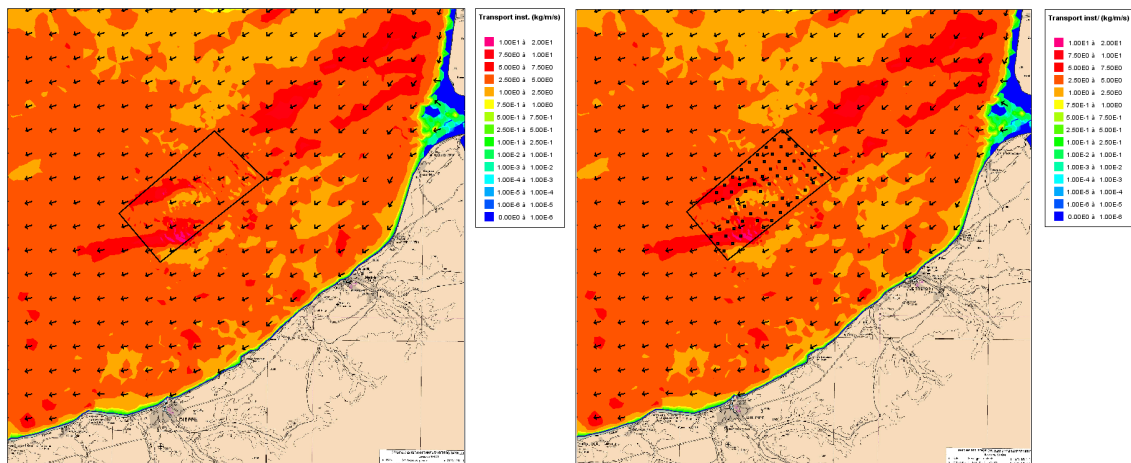


Figure 42 - Différentiel du transport instantané au maximum de jusant – jacket – granulométrie 315µm

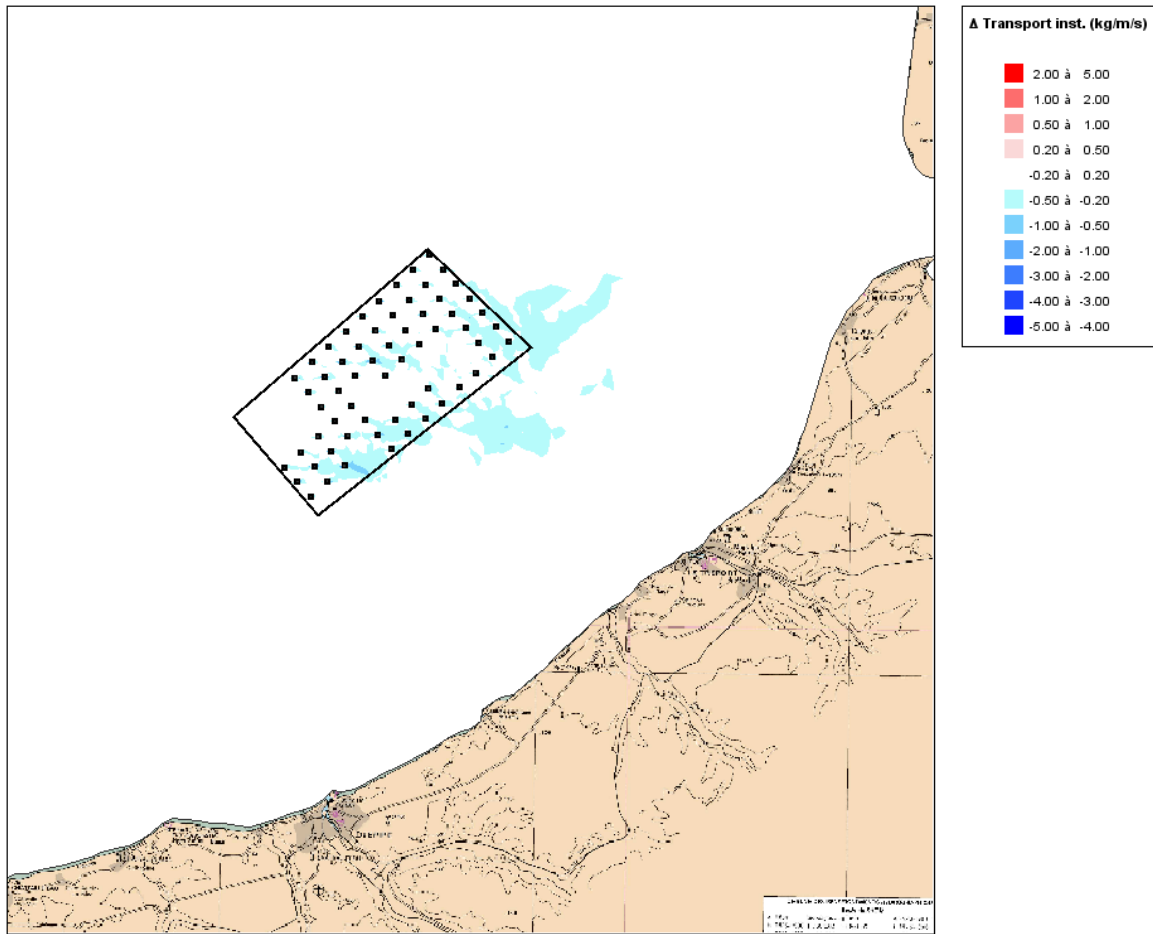


Figure 43 – Transport instantané au maximum de flot et de jusant sans prise en compte de la houle – 500µm

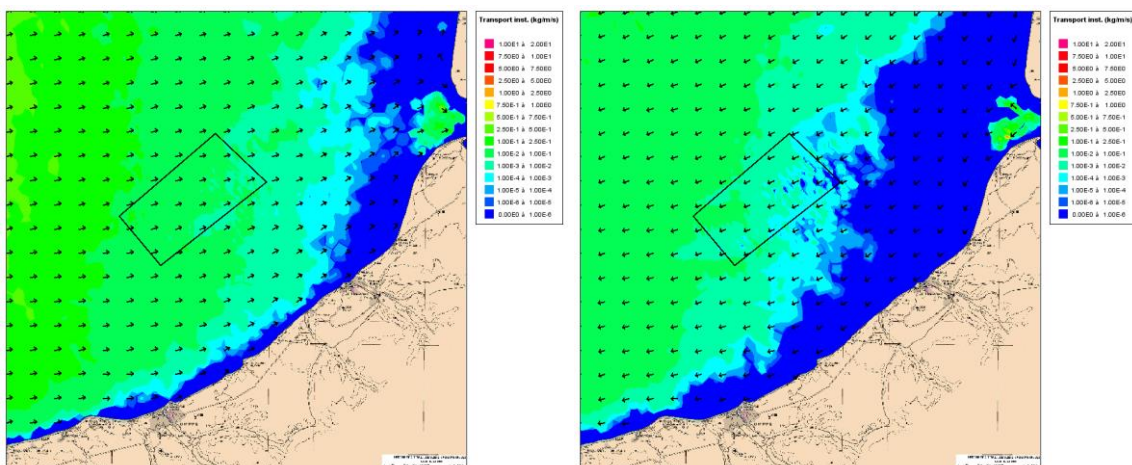


Figure 44 - Transport instantané au maximum de flot pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 500µm

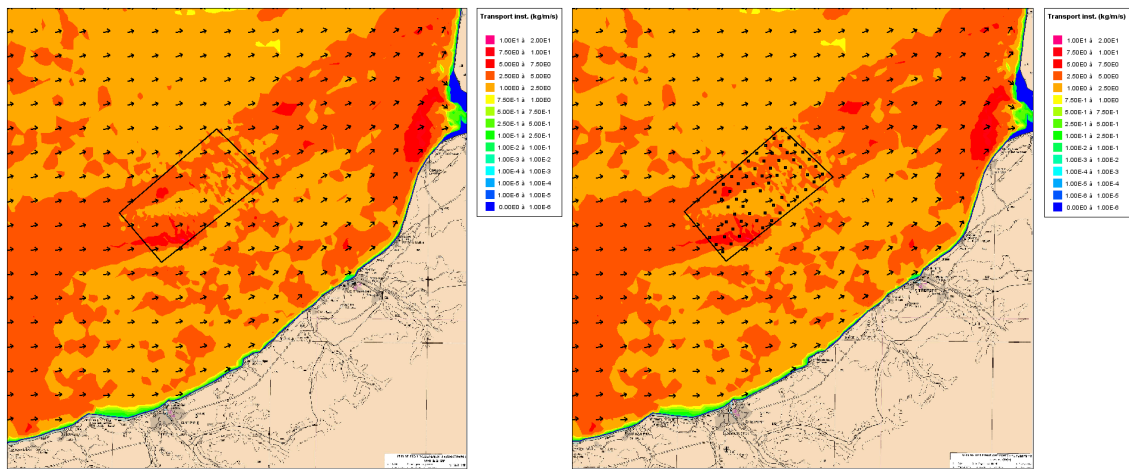


Figure 45 - Différentiel du transport instantané au maximum de flot – jacket – granulométrie 500µm

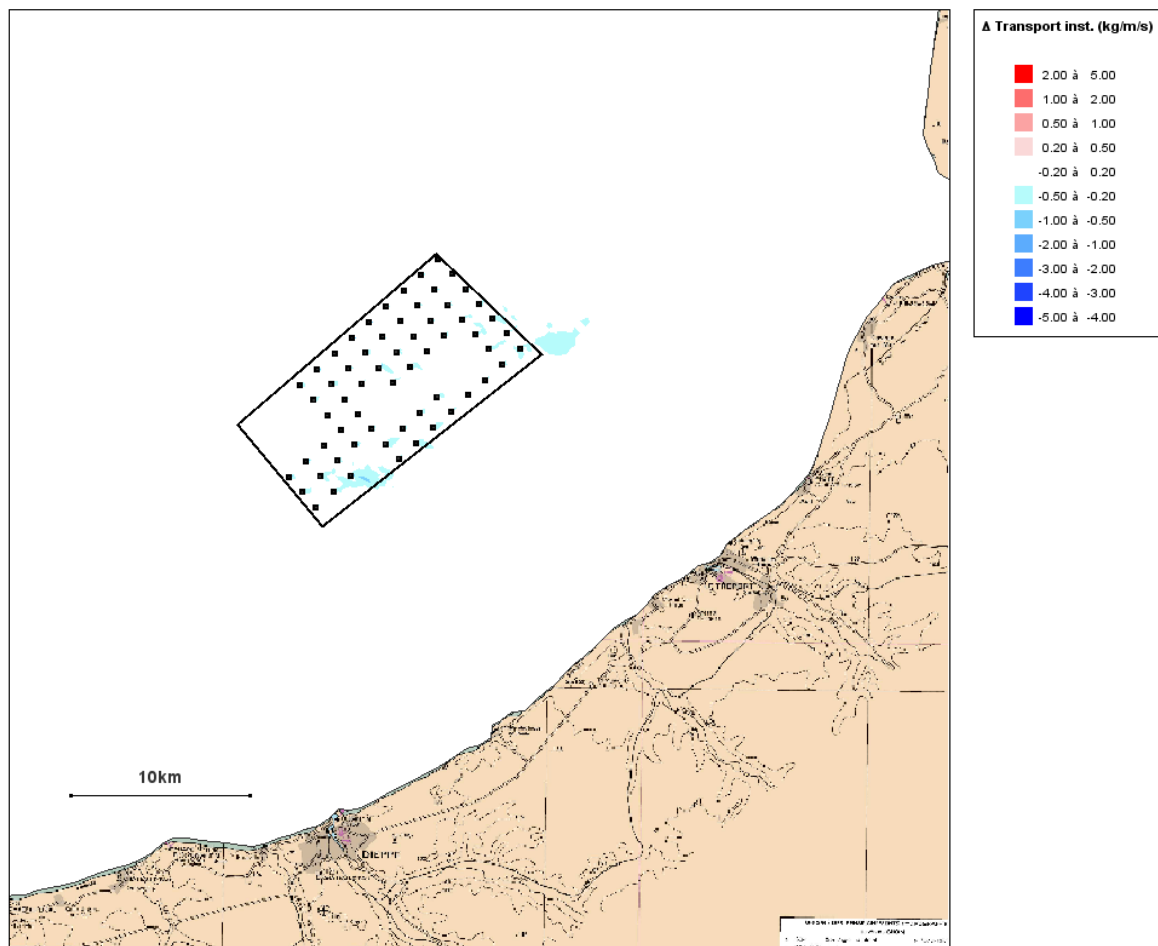


Figure 46 - Transport instantané au maximum de jusant pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 500 μ m

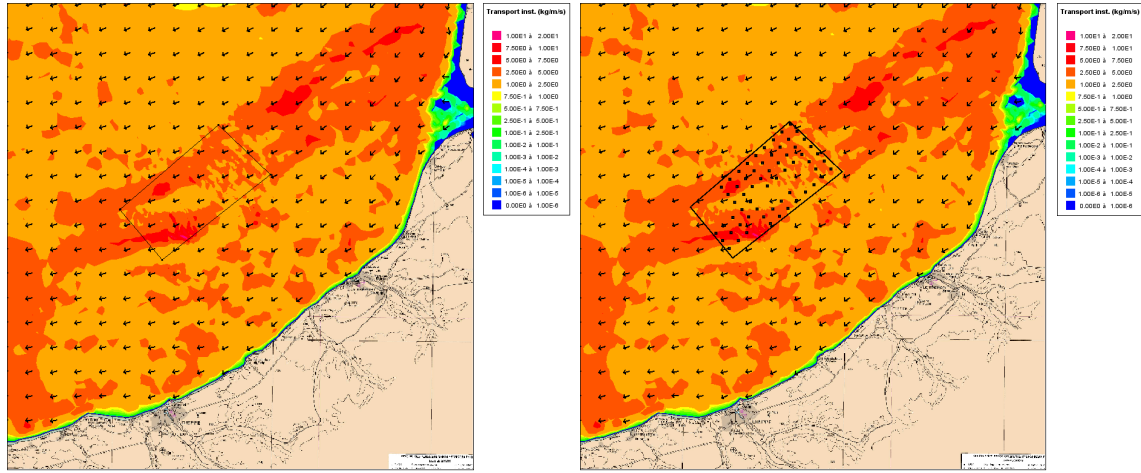


Figure 47 - Différentiel du transport instantané au maximum de jusant – jacket – granulométrie 500 μ m

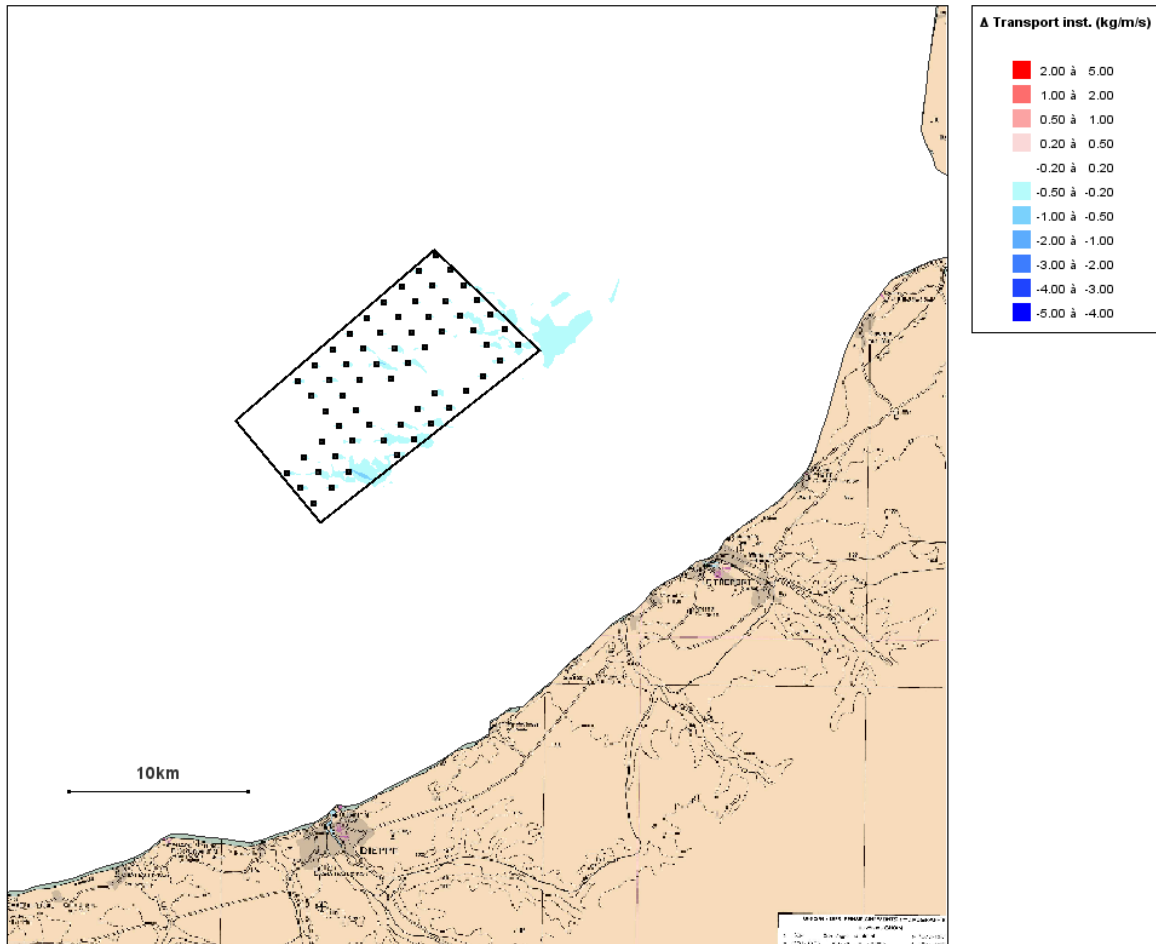


Figure 48 - Transport instantané au maximum de flot pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 2000 μ m

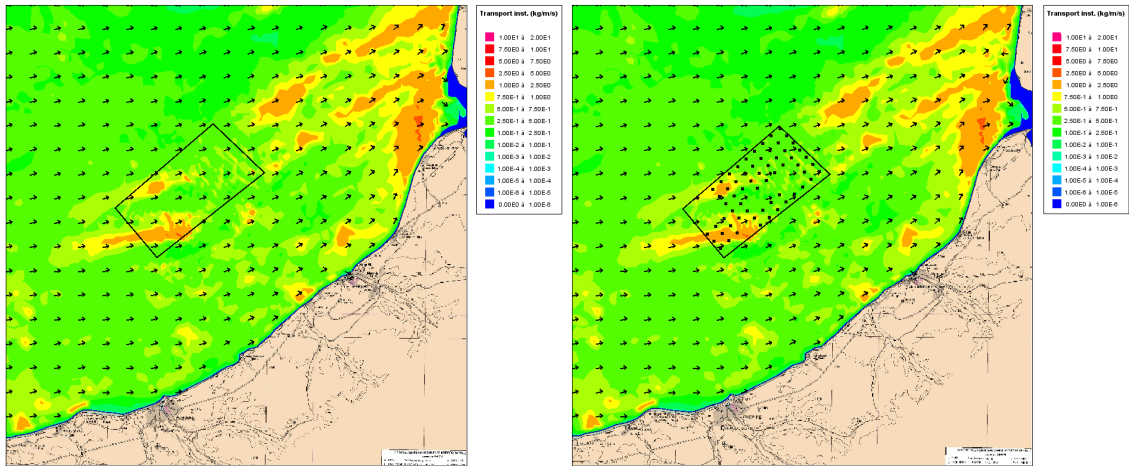


Figure 49 - Différentiel du transport instantané au maximum de flot – jacket – granulométrie 2000 μ m

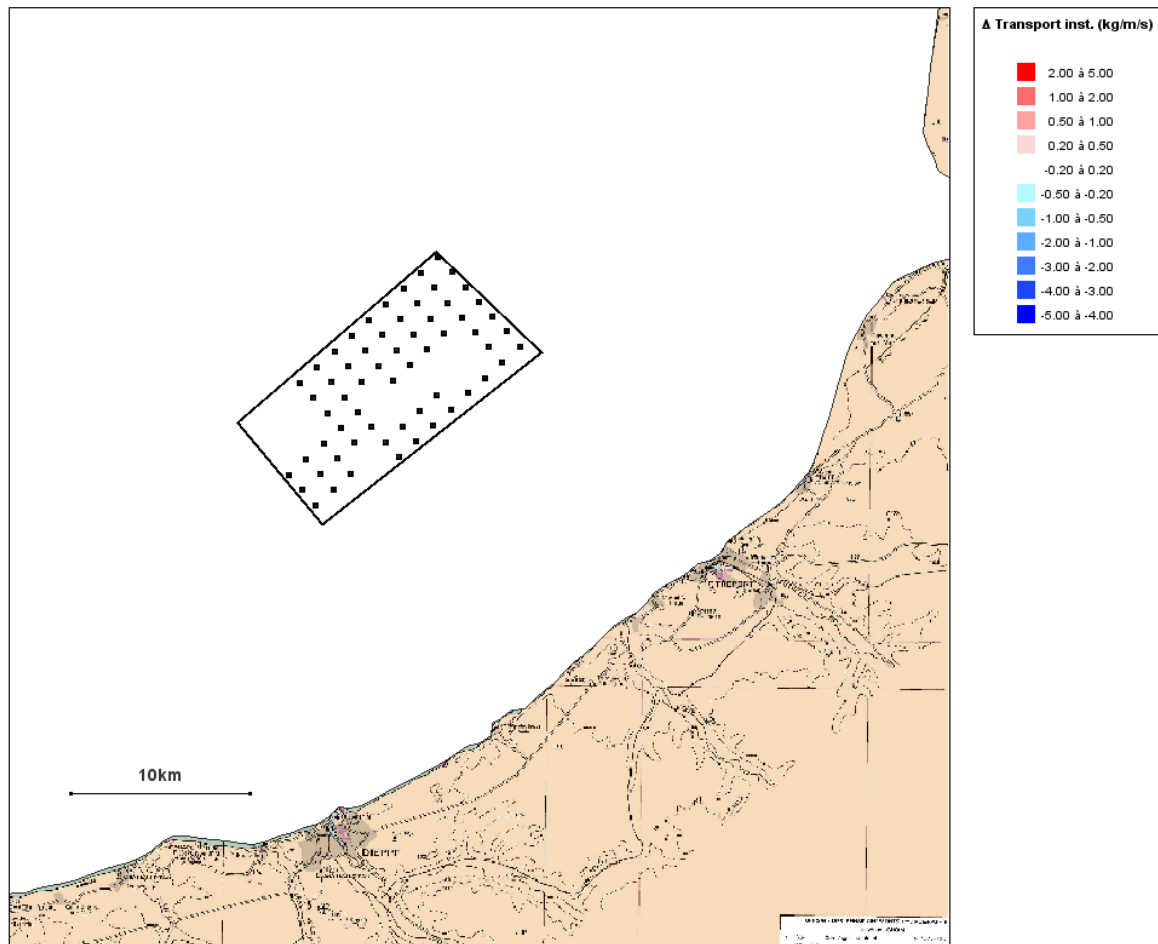


Figure 50 - Transport instantané au maximum de jusant pour l'état initial et aménagé (jacket) – granulométrie 2000 μ m

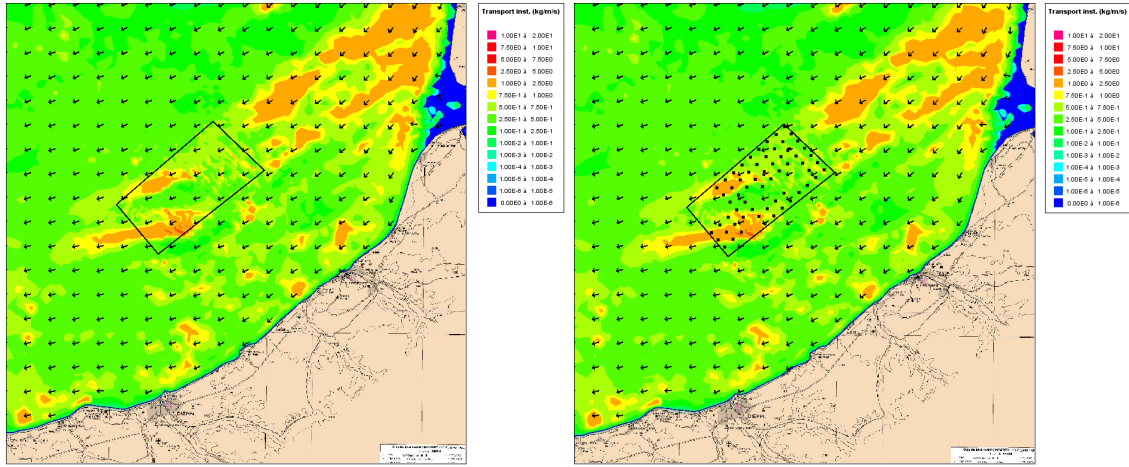
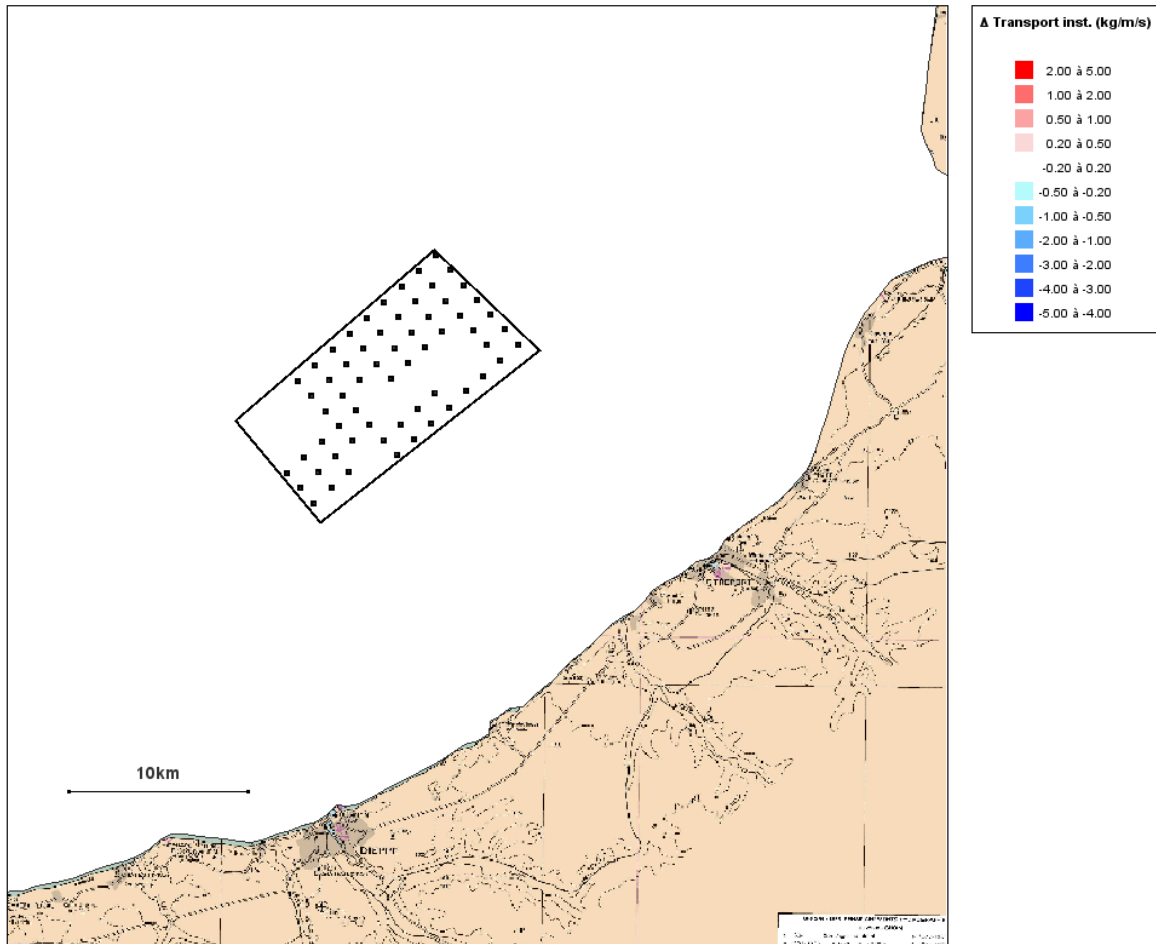


Figure 51 - Différentiel du transport instantané au maximum de jusant – jacket – granulométrie 2000 μ m



3.3.6 Synthèse des impacts sur les flux sédimentaire à l'échelle régionale

Du point de vue de l'effet des fondations sur les flux sédimentaires, on peut retenir de l'analyse des résultats sur les trois classes granulométriques (315 μm , 500 μm et 2000 μm), en flot comme en jusant :

- ▶ Les modifications du transport sédimentaire restent globalement localisées autour des éoliennes ;
- ▶ Les modifications des flux solides en bordure du parc sont à peine sensibles ;
- ▶ Les flux sédimentaires ne sont pas modifiés à l'échelle régionale ;
- ▶ Il n'y a aucune incidence du projet de parc sur la dynamique sédimentaire à la côte et donc aucun impact, positif ou négatif, sur les tendances érosives.

3.4 Dynamique sédimentaire à l'échelle d'une fondation

3.4.1 Estimations préliminaires des affouillements en pied de fondation, sur la base de formules empiriques

3.4.1.1 Estimation des profondeurs maximales d'affouillement

Pour la majorité des sédiments de la zone d'étude, les courants sont suffisamment forts pour atteindre les conditions de mise en mouvement et la profondeur d'affouillement théorique maximale autour d'un pieu cylindrique (Sumer et Fredsoe, 2002) :

- ▶ $S_{max}/D = 1.3$, D étant le diamètre de la pile et S la profondeur du cône d'affouillement

Soit **2,9 m** autour de chacune des 4 jambes des structures jacket.

A noter que ces estimations sont des valeurs maximales et que leur géométrie, dynamique, est soumise à l'alternance des courants de marée et à leur modulation astronomique.

3.4.1.2 Extension des figures d'affouillement

L'extension des figures d'affouillement peut être évaluée en première approche à partir des pentes extérieures des cônes d'affouillement (e.g. Sumer et Fredsoe, 2002). On peut considérer une pente de 15° pour calculer le rayon d'affouillement depuis la périphérie des fondations :

$$\text{Rayon} = S_{max}/\tan(15^\circ)$$

Soit une extension des figures d'affouillement caractérisée par un rayon de près de 4 fois la profondeur maximale du cône et une extension en périphérie de la pile qui est de l'ordre de 5 fois son diamètre.

Pour chacune des jambes des fondations jacket de diamètre 2,2 m, l'estimation est de 11 m.

3.4.1.3 Affouillement d'ensemble pour une fondation jacket

Un effet de groupe des différents éléments du jacket n'est pas à exclure. En particulier, les écoulements turbulents autour de chacune des jambes peuvent interagir et générer des turbulences à l'échelle de l'ensemble de la structure (l'effet sur les affouillements est alors celui de la structure globale et non de chaque élément individuel qui la compose). Un ordre de grandeur en première approche de l'extension de l'affouillement d'ensemble qui peut en résulter est de 1 à 2 fois l'emprise totale de la fondation (Smart Wind, 2013^[2], d'après Sumer et al. 2005).

Soit un affouillement d'ensemble jusqu'à 50 mètres d'extension, l'emprise au sol de la fondation jacket étant équivalente à un carré de 24 m de côté.

[2] Smart Wind, 2013. Hornsea Offshore Wind Farm Project. Environmental statement. Foundation Scour Assessment. July 2013

3.4.2 Présentation générale de Flow-3D®

Flow-3D® est un logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics) développé par Flow Science Inc. Le logiciel approche les solutions numériques des équations différentielles de Navier-Stokes au moyen d'une méthode aux éléments finis et d'une technique VOF (Volume of Fluid) pour calculer la surface libre.



Flow3D® est un des logiciels leader du marché concernant les écoulements à surface libre. Il dispose de nombreux modules et est très utilisé dans l'industrie mécanique (fonderie, peinture, microfluidique...) pour des problématiques complexes faisant appel aux phénomènes de viscosité, de tension superficielle, de gradient thermique, de turbulence, de cavitation, d'entraînement d'air...

Dans ce contexte, les sujets abordés dans le cadre de l'hydraulique traditionnelle à surface libre du monde des ouvrages hydrauliques, apparaissent plus simples : faible influence de la tension superficielle, du facteur thermique ou de la viscosité...

Toutefois, de nombreux modules de calculs ont été spécifiquement implémentés au logiciel pour prendre en compte la problématique liée à l'hydraulique des grands ouvrages (surface libre ou en charge) et notamment pour l'étude des problématiques liées aux contextes maritime et côtier.

Flow-3D® a par ailleurs fait l'objet d'une qualification par le Centre d'Ingénierie Hydraulique d'EDF (CIH-EDF) après dix ans de tests sur modèles physiques et sur le parc d'ouvrages hydrauliques d'EDF.

Flow-3D®, outre le code de calcul diphasique CFD, offre de nombreuses possibilités utiles pour nos métiers :

- ▶ Différents types de vagues disponibles,
- ▶ Prise en compte d'objets mobiles (vannages, embâcles, amarrages...),
- ▶ Possibilité de mettre des maillages de type 2D (résolvant les équations de Barré de Saint-Venant pour éloigner les conditions limite aval sans grever les temps de calculs),
- ▶ Possibilité d'intégrer des pertes de charge singulières au travers de grille,
- ▶ Modules de transport solide et d'érosion,
- ▶ Gestion des interactions fluide/structure...

La suite logicielle Flow-3D® propose enfin un programme de post-traitement très puissant : FlowSight. Ce dernier permet en tous points de la simulation d'extraire un très grand nombre de paramètres dont les champs de vitesse et de pression :

- ▶ isovaleurs de vitesses selon des coupes longitudinales et transversales,
- ▶ isovaleurs de pression sur les ouvrages,
- ▶ isovaleurs d'énergie dissipée, de nombre de Froude, de variation des fonds...
- ▶ animations 3D des écoulements...

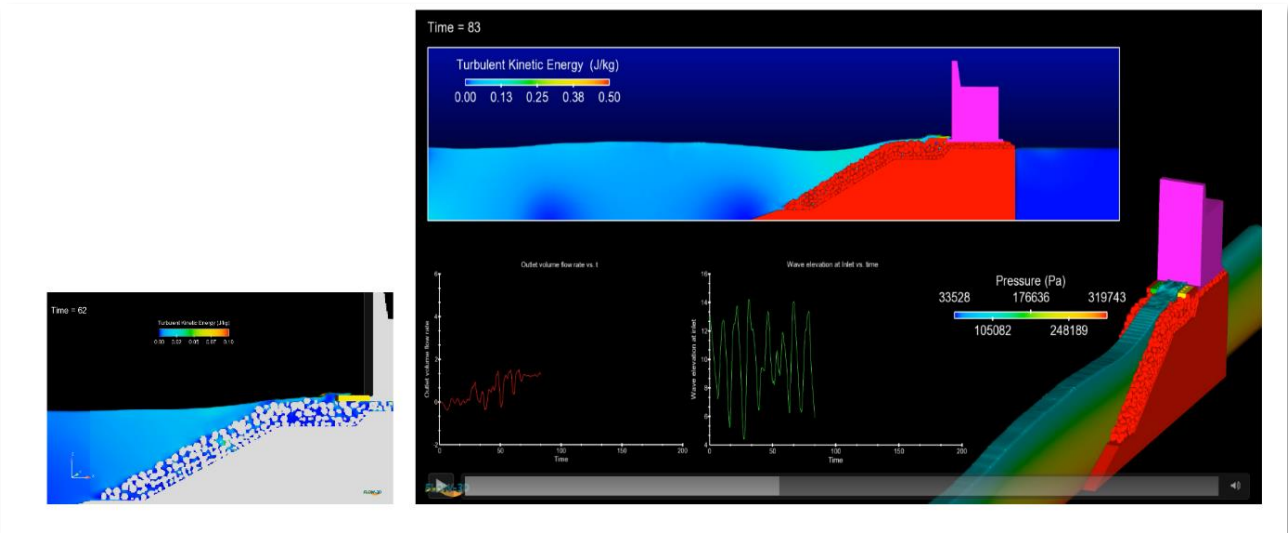
Les illustrations en page suivante présentent des applications de Flow-3D® dans des contextes liés aux problématiques maritimes ou côtiers.

Figure 52 : Mise à l'eau d'un navire



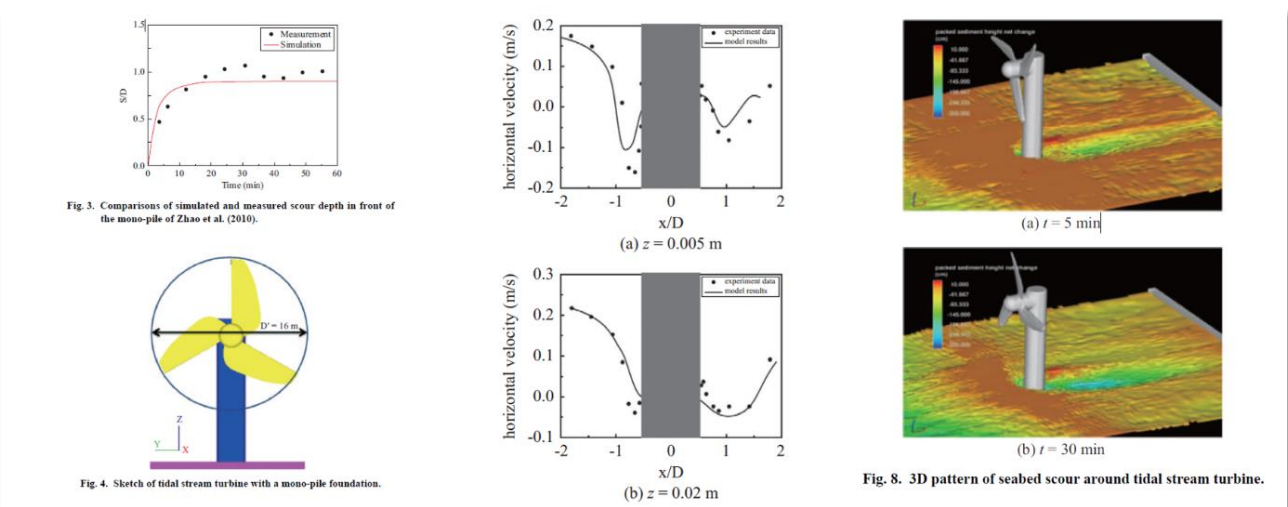
(Source : FLOW3D ©)

Figure 53 : Dimensionnement de protection contre la houle [exemple Flow-3D©]



(Source : FLOW 3D ©)

Figure 54 : Etudes des affouillements en pied d'une hydrolienne [exemple Flow-3D©]



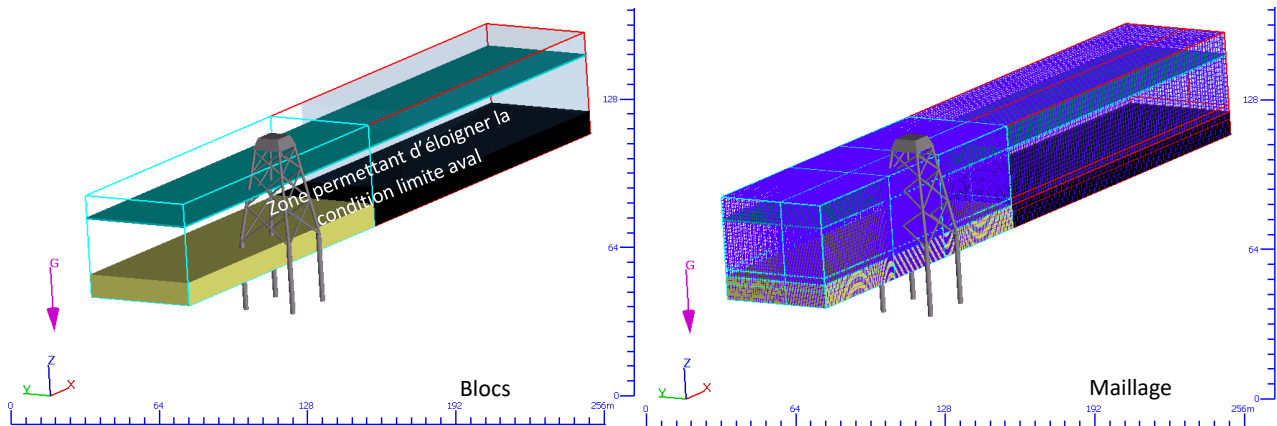
(Source : FLOW3D ©)

3.4.3 Emprise du modèle et maillage

Le modèle est caractérisé par les extensions suivantes (cf. images ci-dessous) :

- **Axe X** : 325 m en longueur (dans l'axe des vagues et du courant) ; les 150 m amont (par rapport au courant) sont composés de matériaux meubles ; les 175 m aval permettent d'éloigner la condition limite aval pour éviter les effets de bord,
- **Axe Y** : 100 m en largeur (perpendiculairement à l'axe des vagues et du courant) ; il est à noter une symétrie des phénomènes selon l'axe Y des vagues et du courant,
- **Axe Z** : de -30 à +15 m CM soit une extension de 45 m dont une épaisseur sédimentaire de 10 m.

Figure 55 : Blocs de maillage du modèle Flow-3D©



La grande particularité de Flow-3D© est que son maillage est structuré sur la base de parallélépipèdes rectangles, contrairement aux autres logiciels de 3D-CFD qui offrent un maillage non structuré qui épouse la géométrie. Cette approche permet de modéliser finement des structures avec des tailles de mailles relativement importantes.

Le maillage mis en œuvre pour la modélisation se compose de 2 blocs dotés de mailles variant de 0,5 à 1,5 m en moyenne. Les blocs peuvent être :

- Jointifs (c'est le cas ici),
- Ou imbriqués afin d'affiner une zone particulière du modèle.

Le modèle compte au final environ 450 000 mailles.

3.4.4 Conditions limites et hypothèses de modélisation

Les principales hypothèses de modélisation ont été présentées dans le chapitre « Données de base ». Elles sont rappelées ci-dessous :

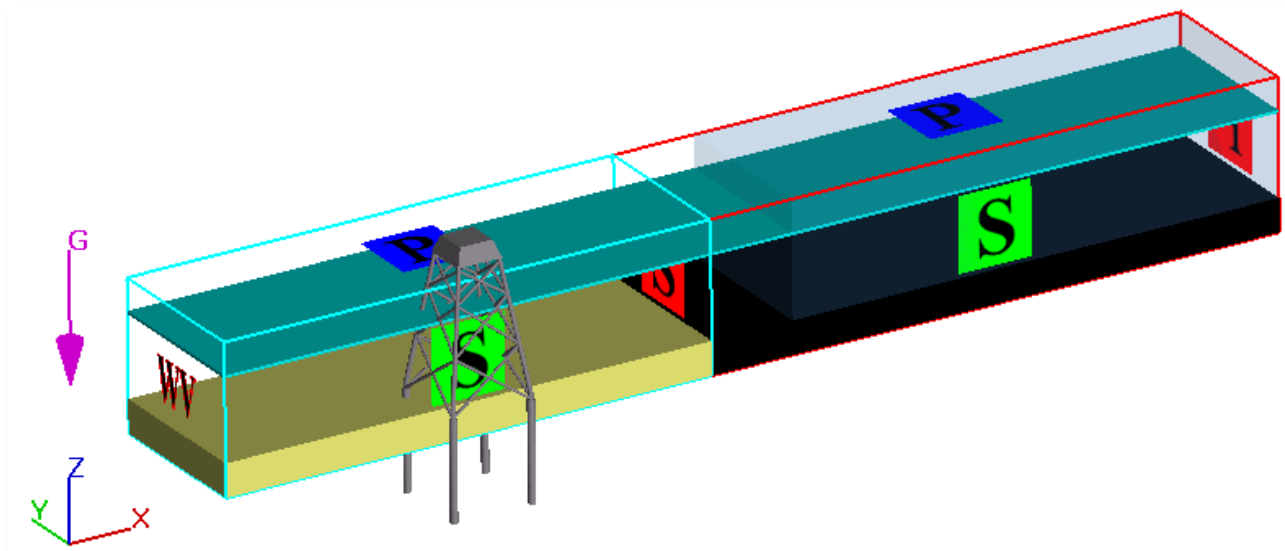


Figure 56 : représentation 3D du modèle utilisé

- ▶ **Xmin** : vagues [$H_s=4,5$ m ; $T=10,5$ s] et courant permanent de 1 m/s,
- ▶ **Xmax** : niveau imposé de + 4,94 m CM,
- ▶ **Ymin** : symétrie,
- ▶ **Ymax** : symétrie,
- ▶ **Zmin** : sédiment ($D_{50} = 375$ μ m) ou paroi solide dans la partie aval,
- ▶ **Zmax** : pression atmosphérique.

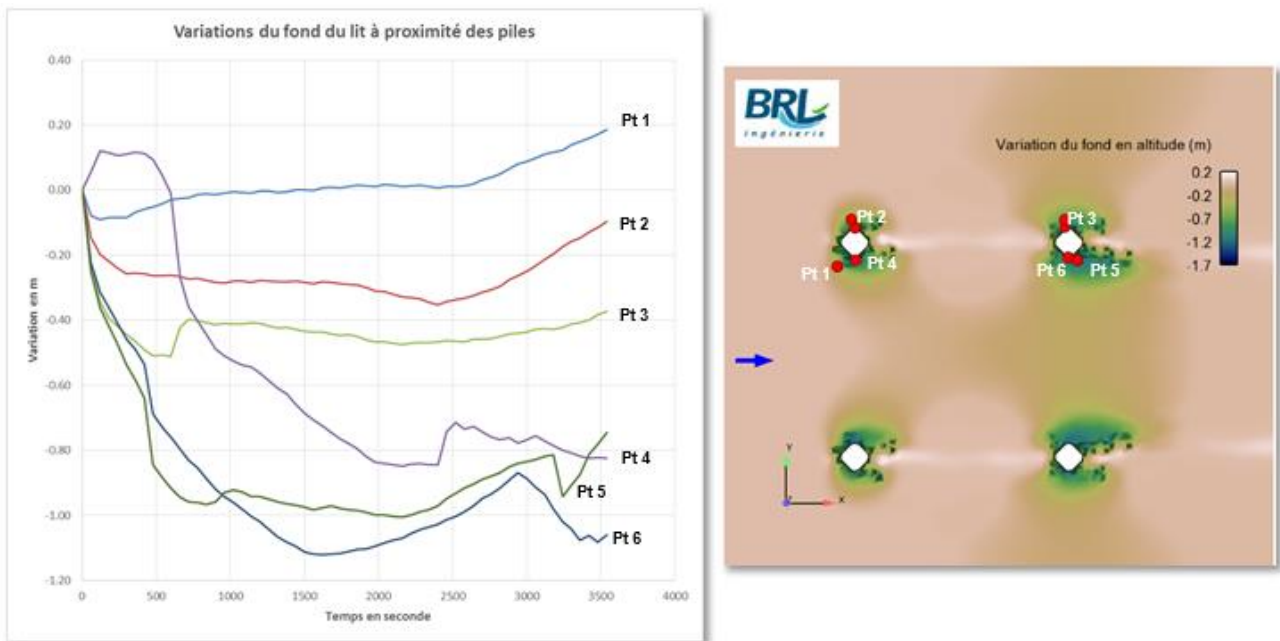
De plus, le transport solide est supposé régi par la loi de Meyer-Peter.

La densité de l'eau a été prise égale à une valeur de 1,03.

3.4.5 Résultats

Les résultats de la modélisation font état d'une figure générale d'affouillement à peu près stable pour une durée de calcul « temps réel » d'un peu moins d'une heure comme en attestent les variations des fonds ci-dessous extraits à proximité des piles de la structure. Il est à noter que les temps de calculs nécessaire pour cette simulation sont de l'ordre de 30 h.

Figure 57 : Variations du fond du lit à proximité des piles en fonction du temps



La figure ci-dessous et celle insérée en page suivante illustrent les résultats de la modélisation et la figure d'affouillement obtenue.

Figure 58 : Figure d'affouillement obtenue à l'aide de Flow-3D© [1/2]

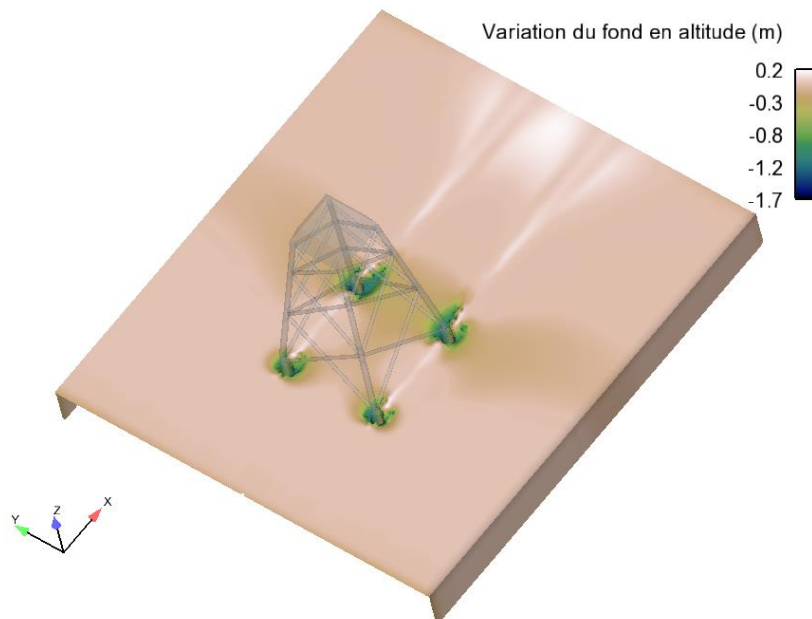
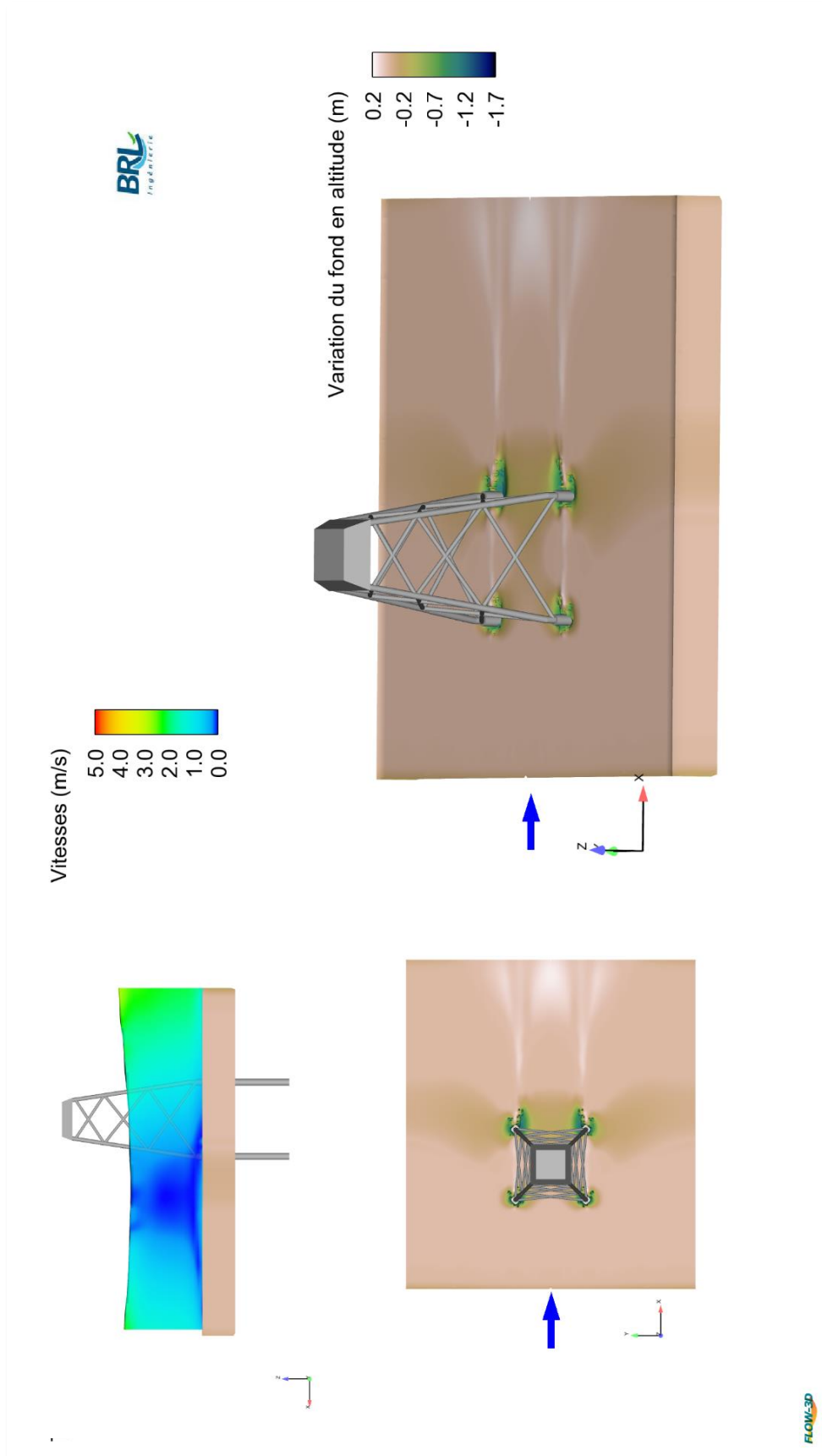
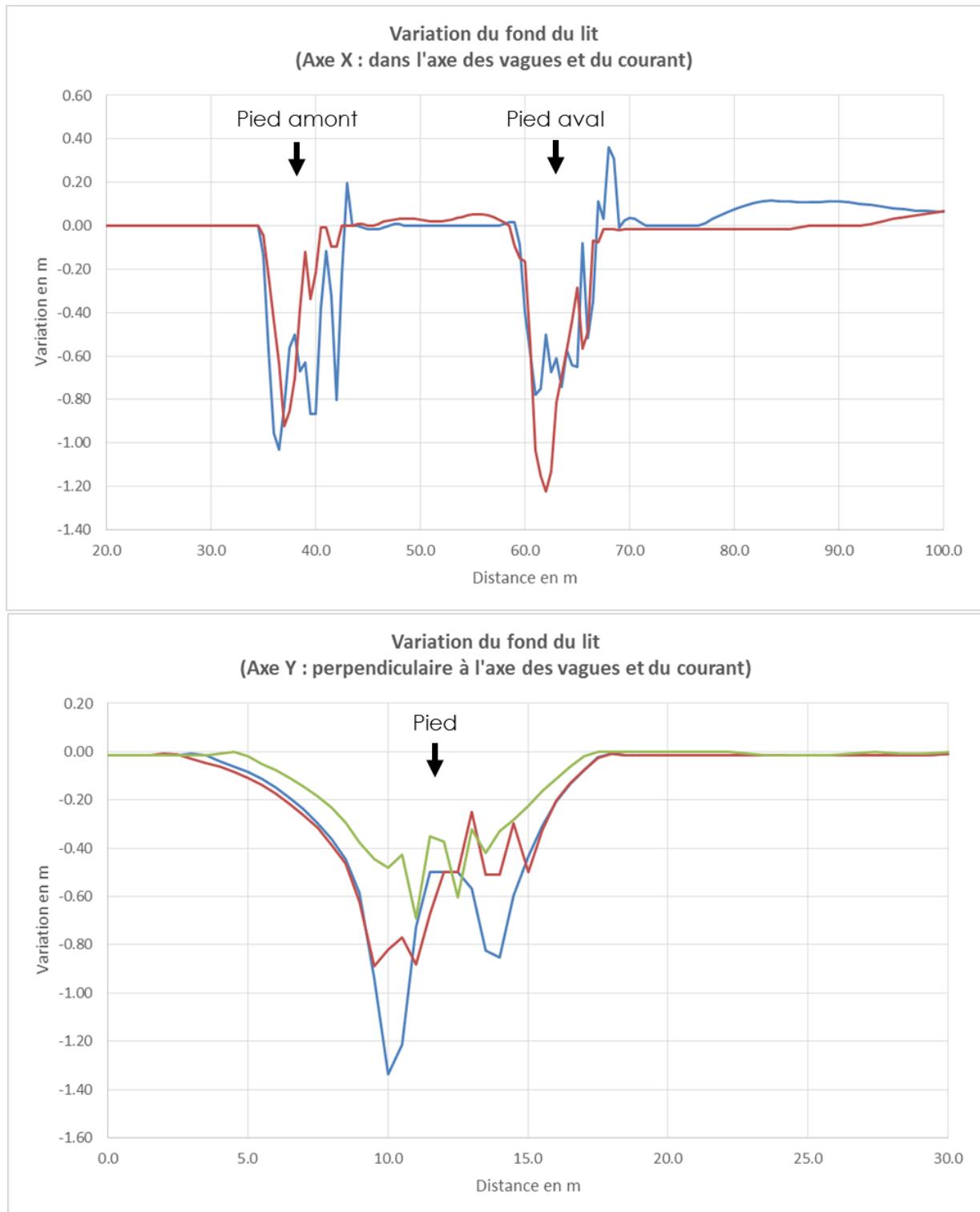


Figure 59 : Figure d'affouillement obtenue à l'aide de Flow-3D© [2/2]



Les graphes ci-dessous extraits selon les axes X et Y, respectivement dans la direction ou perpendiculairement à l'axe des vagues et du courant, illustrent les formes d'affouillement à la fin de la simulation (t=1 h) :

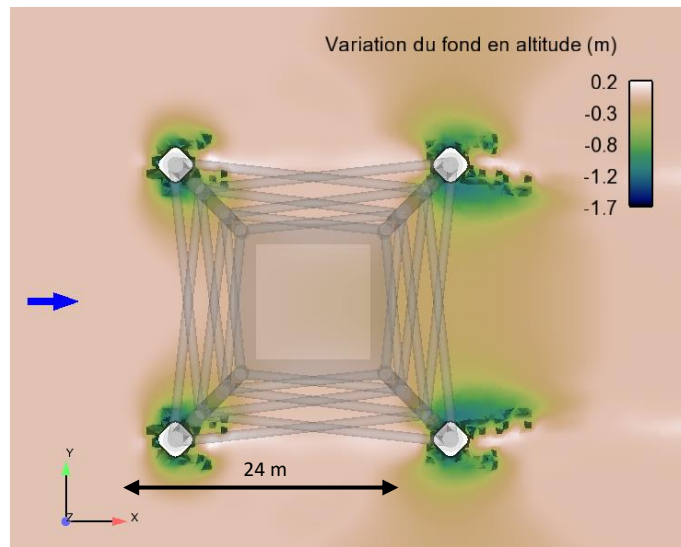
Figure 60 : Variations du fond selon les axes X et Y (à t = 1 h)



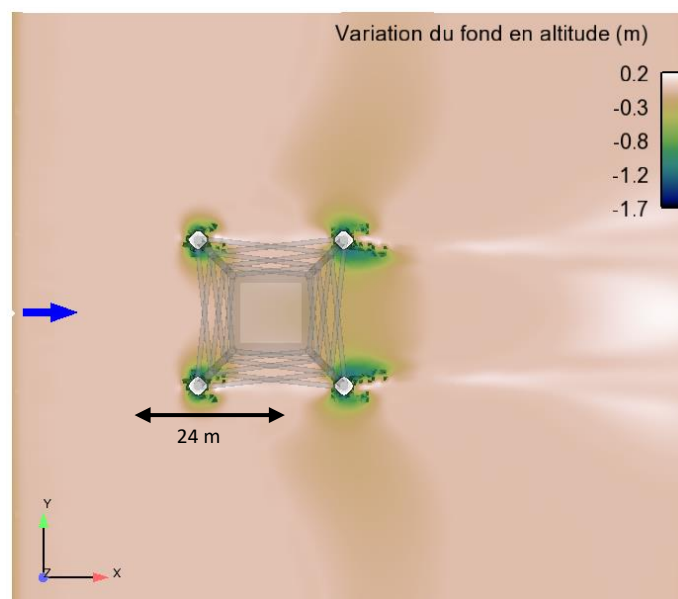
Légende : les courbes représentent l'évolution (en vue de profil) de la profondeur le long de l'axe X ou Y (Figure 57) en considérant deux pieds de la fondation (en haut) ou un seul (en bas)

Ces différentes figures appellent les commentaires suivants :

- ▶ La profondeur maximale d'affouillement calculée est de l'ordre de 1,5 m,
- ▶ L'extension des figures d'affouillement est de l'ordre de :
 - Selon l'axe X du courant et des vagues :
 - Pied amont : environ **8 m**,
 - Pied aval : environ **12 m**,
 - Selon l'axe Y perpendiculaire au courant et aux vagues :
 - Pied amont : environ **12 m**,
 - Pied aval : environ **14 m**,

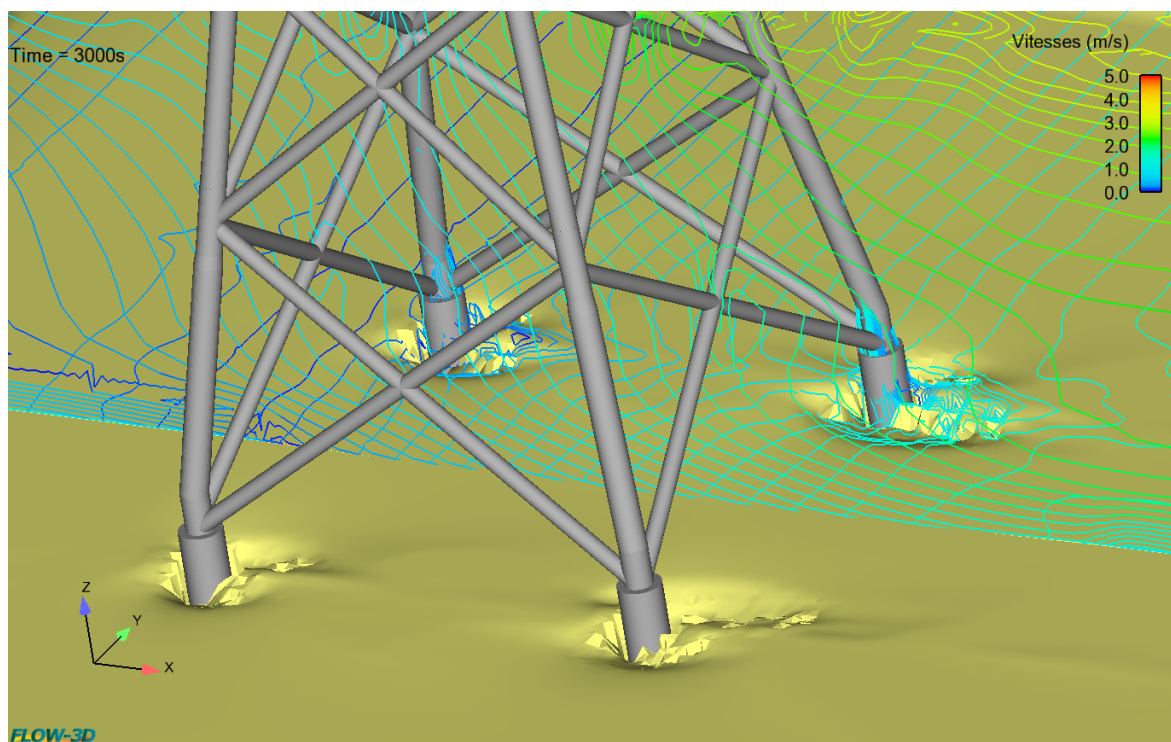
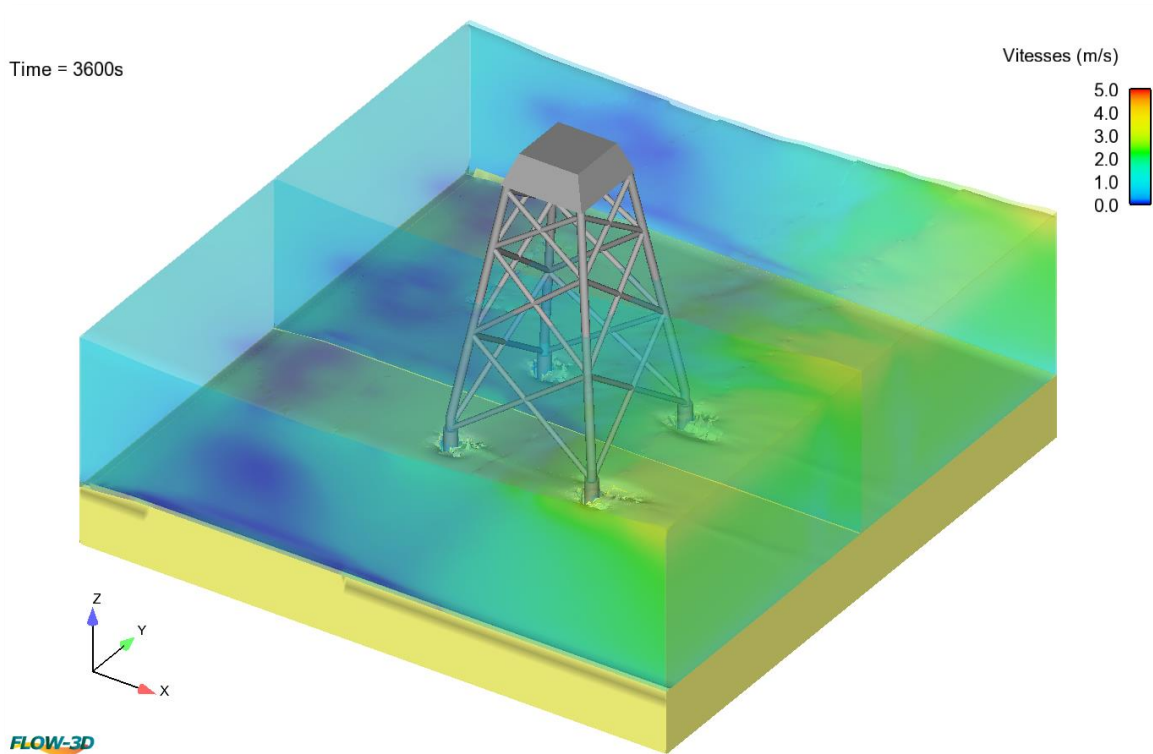


- ▶ L'influence d'ensemble pour une fondation jacket semble être de l'ordre de 50 m ; même si l'on est proche de la limite érodable du modèle, l'influence du jacket semble s'atténuer fortement à l'approche de cette distance. A noter qu'il s'agit plutôt d'un faible dépôt décimétrique que d'une érosion.



Les figures ci-dessous illustrent de plus les conditions hydrauliques calculées dans le domaine d'étude et aux abords des pieds du jacket. Compte tenu des conditions de houle, ces illustrations ne sont représentatives que pour un temps donné.

Figure 61 : Conditions hydrodynamiques aux abords de pieds du jacket



3.4.6 Synthèse des impacts sur la dynamique sédimentaire à l'échelle d'une fondation

La modélisation Flow-3D© menée dans cette approche qui se voulait conservative (hypothèses de houles et de courants forts, faible granulométrie...) a abouti à des résultats assez proches au final des approches empiriques :

- ▶ **La profondeur maximale d'affouillement calculée à l'aide de Flow-3D© est de l'ordre de 1,5 m pour une estimation de l'ordre de 2,9 m avec les approches empiriques** : même si l'évaluation de Flow-3D© est en retrait, elle est du même ordre de grandeur ; compte tenu de l'extrême complexité des phénomènes mis en jeu, cette fourchette de **1,5 à 3,0 m demeure relativement étroite**,
- ▶ En termes d'extension de la figure d'affouillement, les deux approches sont en revanche parfaitement concordantes avec respectivement des emprises approximatives de **8 à 14 m** pour Flow-3D© et estimée de l'ordre de **11 m** pour l'approche empirique,
- ▶ Enfin, pour l'influence d'ensemble pour une fondation jacket, les deux approches sont proches également en concluant à une zone d'influence d'environ **50 m** d'extension.

Les estimations ici conduites ont permis de caractériser les affouillements instantanés maximum probables autour d'une fondation lors d'un événement exceptionnel cumulant houle de tempête et courant de marée maximal (coefficient 120).

Le fonctionnement hydrodynamique de l'aire d'étude immédiate est très marqué par l'alternance cyclique des courants de marée. La figure maximale d'affouillement ici définie par modélisation n'est donc pas stable et son extension et sa profondeur sont progressivement résorbés, puis reformés à l'opposé de la fondation de façon proportionnelle au coefficient de marée lors de l'inversion du courant. Ce caractère alternatif et opposé des effets des courants de marée conduit à un phénomène de cicatrisation cyclique des figures d'affouillement.

3.5 Qualité des eaux

3.5.1 Turbidité naturelle du site

La turbidité de la zone d'étude a deux origines :

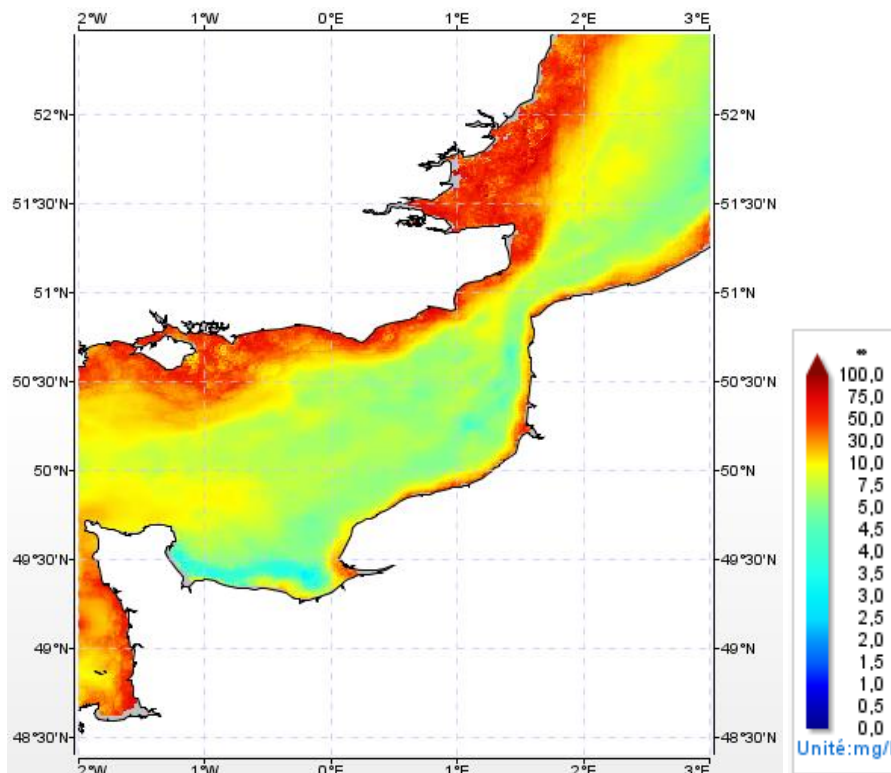
- ▶ Des apports de la Seine : en effet le fleuve apporte une quantité importante de matériaux terrigènes estimés de 0.4 à 1.35 Million T/an suivant les différents régimes fluviaux⁵ ;
- ▶ Les remises en suspensions par les conditions hydrodynamiques (courants et vagues).

Les mesures de qualité d'eau réalisées au sein du parc et sur les stations de référence indiquent une concentration de 3mg/l (Eurofins 2015).

Les cartes établies par l'Ifremer à partir de l'exploitation d'images satellites permettent de compléter la synthèse des conditions de turbidité du site d'étude. En première approche les ordres de grandeur des concentrations de MES peuvent être synthétisées par les valeurs suivantes :

- ▶ Quelques mg/l pour les mois (d'été) les moins turbides ;
- ▶ [5-10] mg/l pour les mois (d'hiver) les plus turbides.

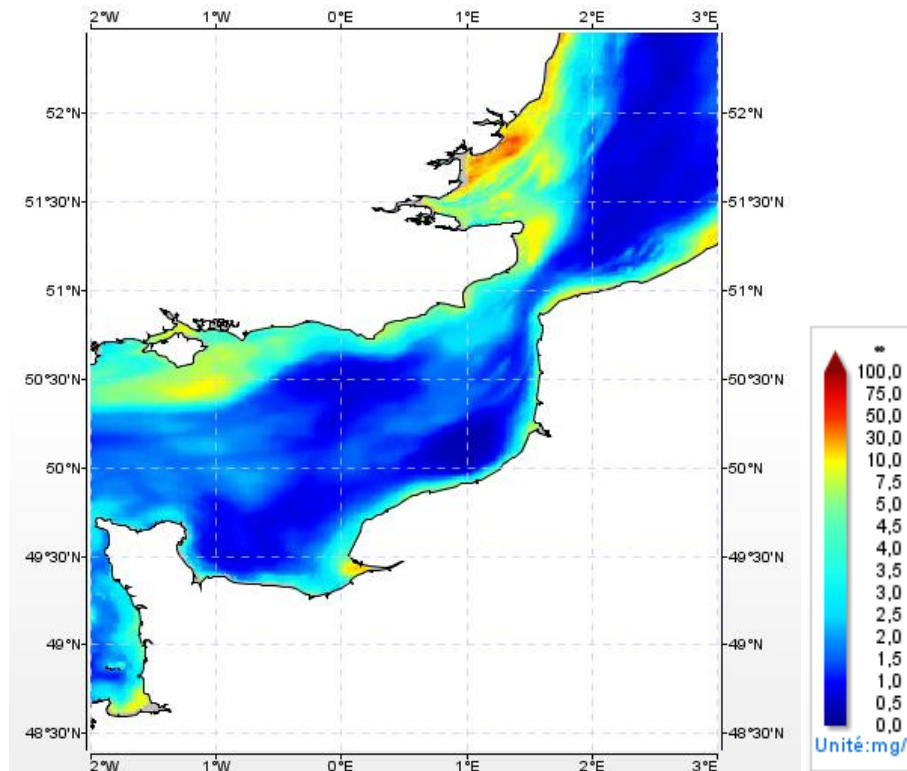
Figure 62 – Carte de turbidités moyennes mensuelles, pour le mois de Février 2014 établie à partir d'observations satellitaires



(Source : Previmer)

⁵ Document d'accompagnement n°1.1 du SDAGE Seine Normandie

Figure 63 – Carte de turbidités moyennes mensuelles, pour le mois de Juin 2014 établie à partir d'observations satellitaires



(Source : Previmer)

3.5.2 Méthodologie pour évaluer les turbidités induites par les activités de chantier

Deux méthodologies de forage et de gestion des débris de forage (cuttings) ont été étudiées à savoir :

- ▶ Une remise en suspension directe dans la colonne d'eau. Cette situation est possible, par exemple, dans le cas de forage avec circulation d'eau de mer et rejet direct au pied du forage.
- ▶ La récupération des produits issus du forage et leur dispersion ultérieure dans une zone dédiée. Deux capacités de stockage temporaire ont été prises en compte, 350m³ et 1000m³.

Quels que soient les procédés de forage, ces derniers vont générer des résidus de désagrégation des roches forées qui peuvent être de très petites dimensions (quelques dizaines de microns) qui sont mis en suspension dans la colonne d'eau et vont être dispersés comme peuvent l'être des sédiments fins marins (vases). La dispersion des résidus de forage est simulée par le modèle TELEMAC-2D selon une approche maximaliste (dispersive) pour laquelle on néglige leur vitesse de chute dans la colonne d'eau. De tels résultats sont schématiques mais ils permettent d'apprécier les niveaux de turbidité induite et de les comparer au bruit de fond. Les impacts peuvent alors être appréciés selon une approche majorante.

Les flux solides sont spécifiés comme des termes sources ponctuels dans la modélisation en prenant en compte les deux hypothèses de procédés de forage :

- ▶ Pour une remise en suspension directe, avec une hypothèse que 15% de la distribution granulométrique des résidus peuvent être considérés comme des éléments fins qui sont transportés en suspension ; les 85% restants étant supposés comme suffisamment grossiers pour chuter rapidement et être déposés dans le champ proche de la fondation.
- ▶ Pour une dispersion ultérieure, avec une hypothèse que 20% de la distribution granulométrique des résidus peuvent être considérés comme des éléments fins qui sont transportés en suspension ; les 80% restants étant supposés comme suffisamment grossiers pour chuter rapidement et être déposés au droit du point de dispersion. Cette valeur augmentée par rapport au procédé précédemment décrit tient compte de la présence potentielle de boues de forage.

Les cartes de résultats qui sont produites permettent de visualiser les niveaux de turbidité induits ainsi que l'emprise et la rémanence du panache, qui évolue rapidement sous l'action des processus d'advection et de diffusion.

Les simulations ont été réalisées pour 5 localisations d'éoliennes (Figure 64), une au centre et une à proximité de chacun des 4 coins du périmètre du parc, pour les deux types de fondations.

Il est à noter que les méthodes envisagées pour les travaux conduiront à une mise en œuvre successive des fondations, avec un temps de latence significatif entre deux éoliennes, correspondant au déplacement des engins et matériels.

Figure 64 – Localisation des 5 éoliennes



(Source : Googleearth)

3.5.3 Modèle utilisé

Comme indiqué dans le chapitre 3.1.2, le module TELEMAC-2D permet d'appliquer en différents points du modèle des sources (flux) pour un traceur donné. En chacun des 5 points définis pour l'étude de dispersion, des flux sont spécifiés en fonction des caractéristiques des travaux : volume à forer et durée de forage. Les mêmes points seront modélisés pour le second scénario.

3.5.4 Emprise et maillage

L'emprise et la discrétisation du maillage correspondent au modèle développé pour la première phase de l'étude hydrodynamique. En effet cette étude de dispersion ne requiert pas de maillage fin autour des éoliennes. L'objectif est simplement d'apprécier la dispersion des turbidités induites à l'échelle de la zone d'étude, et de comparer ces niveaux induits avec la turbidité naturelle.

3.5.5 Scénarii océaniques retenus

Le début de la procédure de forage a été supposé à une étale de basse mer (coefficient 95) avec la prise en compte des quatre jours suivant.

3.5.6 Configuration du relargage des fines dans le milieu naturel

Les flux de résidus de forage vers la colonne d'eau sont calculés à partir des hypothèses suivantes :

- ▶ Pour une remise en suspension directe dans la colonne d'eau :
 - 15% des résidus « cuttings » sont considérés comme des éléments fins qui peuvent être transportés en suspension, les 85% restants sont supposés se déposer dans le champ proche de la fondation,
 - Jacket : durée des travaux effectifs de 19h sans interruption pour une fondation (4 jambes du jacket),
 - Densité du substratum foré : 2 T.m^{-3} . après désagrégation par l'action de forage.
- ▶ Pour un relargage des cuttings :
 - 20% des résidus « cuttings » sont considérés comme des éléments fins qui peuvent être transportés en suspension, les 80% restants sont supposés se déposer dans le champ proche de la fondation. Les volumes suivant de cutting seront considérés 350m^3 et 1000m^3 .
 - Densité du substratum foré : 2 T.m^{-3} . après désagrégation par l'action de forage.

3.5.7 Analyse des résultats de dispersion des turbidités induites

Les résultats sont cartographiés ci-après pour le maximum de concentration en MES pendant la durée de la simulation. Il s'agit donc d'une analyse très maximaliste des impacts à partir des résultats de simulation.

Les panaches ont été tracés à partir d'une concentration de MES de 0.5 mg/l, qui représente une valeur faible par rapport aux conditions de turbidité naturelle même en condition estivale. Même pour cette valeur, l'extension du panache reste limitée à un champ assez proche de la fondation. Les contours de concentration (maximale) de MES qui sont représentés ont une forme d'ellipsoïde, dont les caractéristiques (grand axe, petit axe) varient selon la localisation de l'éolienne. Le tableau ci-dessous fait la synthèse de ces dimensions, pour chaque type de fondation, pour les contours à 0.5 mg/l. Les dimensions sont mesurées pour les mêmes conditions océaniques, avec les fondations jacket.

Tableau 2 – Dimensions générales des ellipsoïdes suivant les éoliennes et leur fondation

Eolienne	Fondation	Grand-axe (m)	Petit-axe (m)
1	Jacket	4 300	2 000
2	Jacket	8 600	2 300
3	Jacket	6 000	1 300
4	Jacket	6 000	1 800
5	Jacket	7 100	2 200

Les résultats des simulations nous indiquent principalement que :

- ▶ le maximum de concentration se situe au niveau du point de forage ;
- ▶ La concentration la plus forte estimée est de 5 mg/l ;
- ▶ Pour un niveau de turbidité de 1 mg/l, l'emprise, les concentrations maximales simulées ne vont pas au-delà de 1 500m ;
- ▶ A la fin des travaux, les concentrations de MES supérieures à 2mg/l ne sont déjà plus visibles 30 mn après la fin du forage ;
- ▶ Il n'y a aucun impact sur les niveaux de turbidité à proximité du trait de côte.

Tableau 3 – Dimensions générales des ellipsoïdes suivant les éoliennes pour la dispersion avec un volume de cutting de 350m³

Eolienne	Grand-axe (m)	Petit-axe (m)
1	7 700	2 000
2	7 800	2 000
3	9 500	1 700
4	10 900	1 800
5	9 700	2 000

Tableau 4 – Dimensions générales des ellipsoïdes suivant les éoliennes pour la dispersion avec un volume de cutting de 1000m³

Eolienne	Grand-axe (m)	Petit-axe (m)
1	12 500	4 000
2	13 000	3 600
3	13 600	4 300
4	14 500	4 500
5	14 000	4 600

Les procédures de dispersion libèrent une quantité de fines importantes sur des durées très courtes, c'est pourquoi les panaches sont plus étendus et les concentrations maximales sont plus élevées.

Quel que soit le point de dispersion pour les deux hypothèses de volume de stockage données, au-delà de 4km les concentrations sont inférieures à 3mg/l.

En complément des cartes de concentrations maximales, des cartes ont été tracées (Figure 80 et Figure 81) à différents instants après la fin d'une opération de forage et de dispersion. On peut voir que la dispersion du panache est très rapide : un peu plus d'une heure après la fin du forage, même une valeur à 0,5 mg/l n'est plus détectée. Pour la dispersion, moins de 3h après le relargage, les concentrations tendent vers le bruit de fond de la zone.

Figure 65 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 1 – Fondation jacket

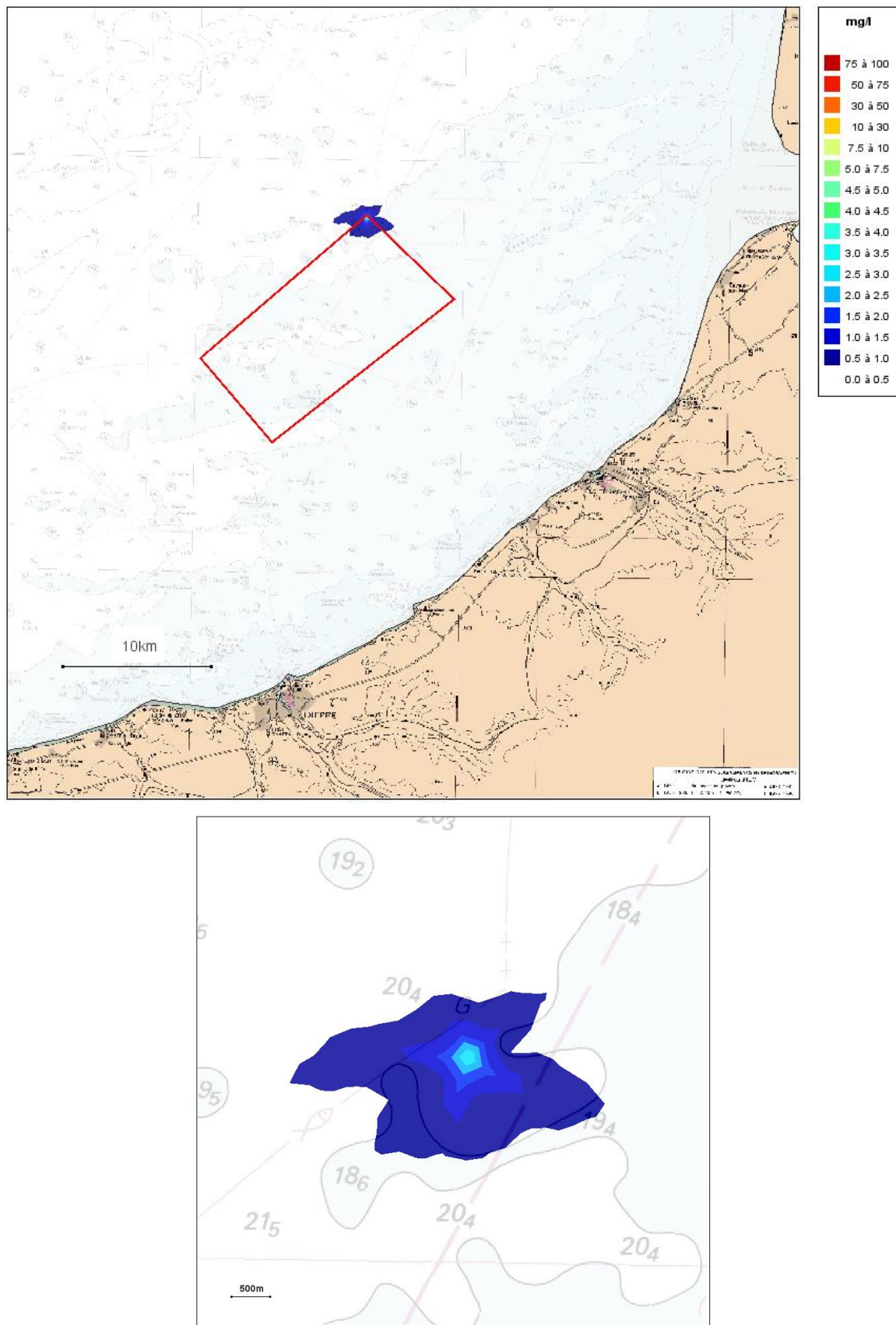


Figure 66 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 2 – Fondation jacket

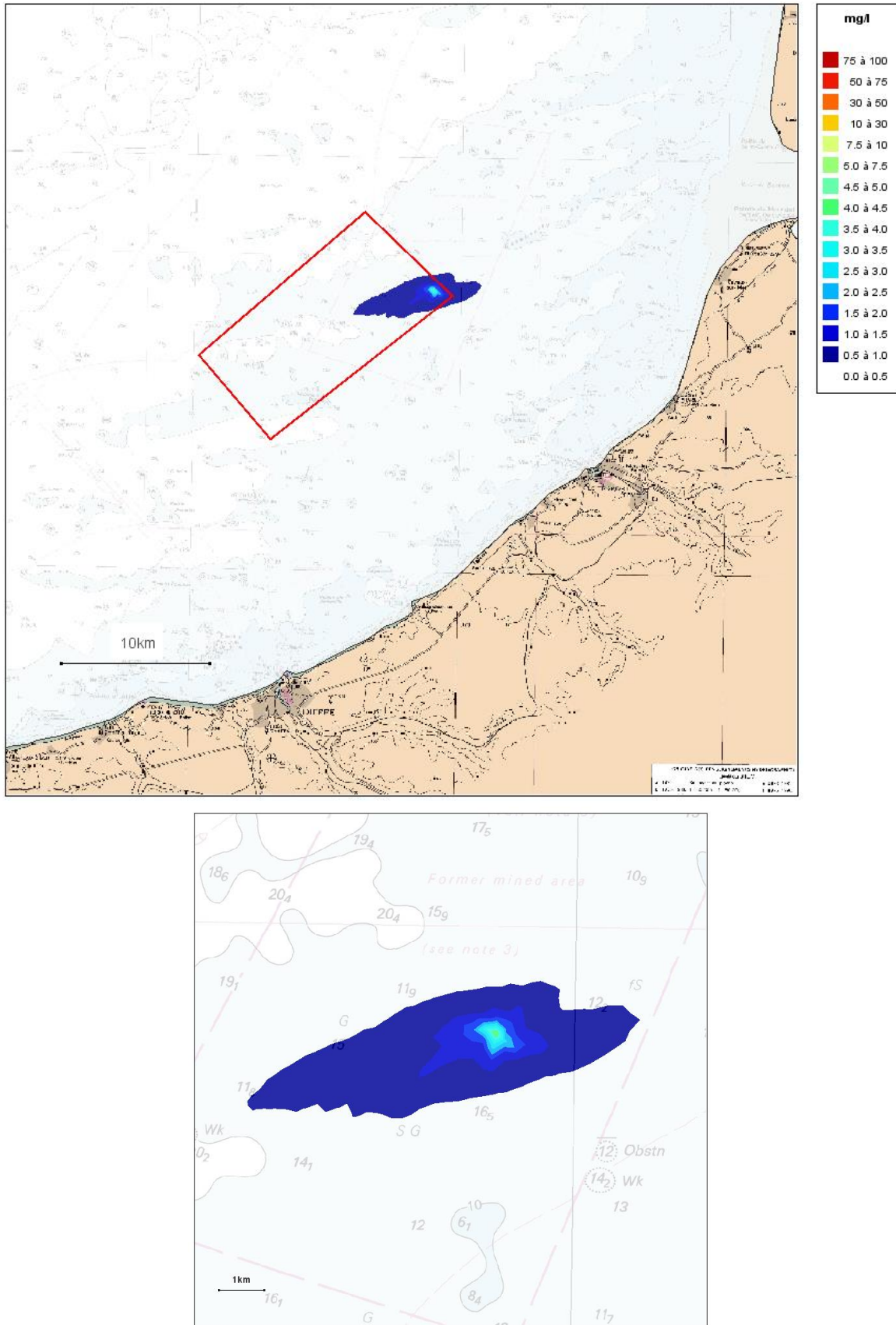


Figure 67 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 3 – Fondation jacket

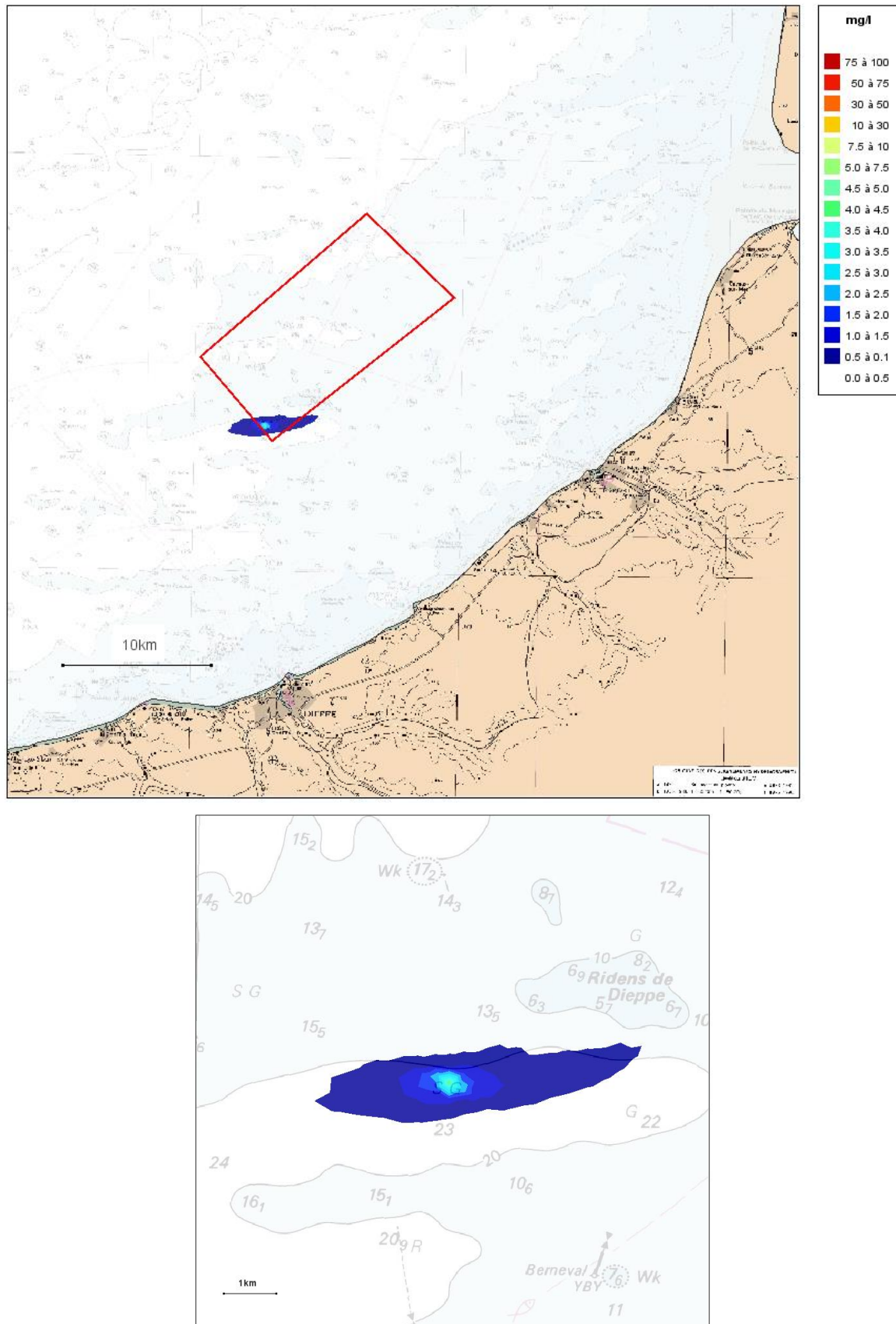


Figure 68 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 4 – Fondation jacket

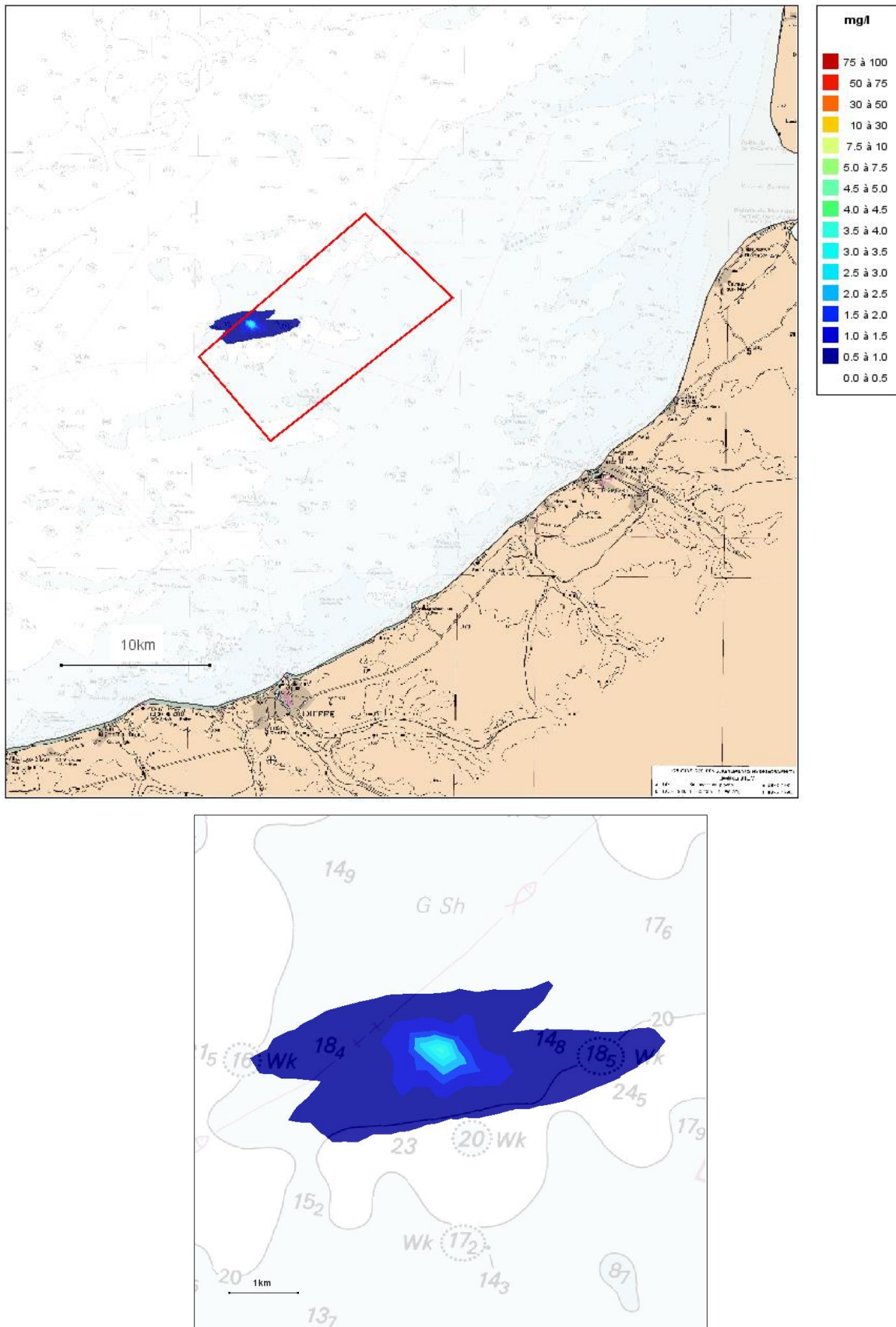


Figure 69 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 5 – Fondation jacket

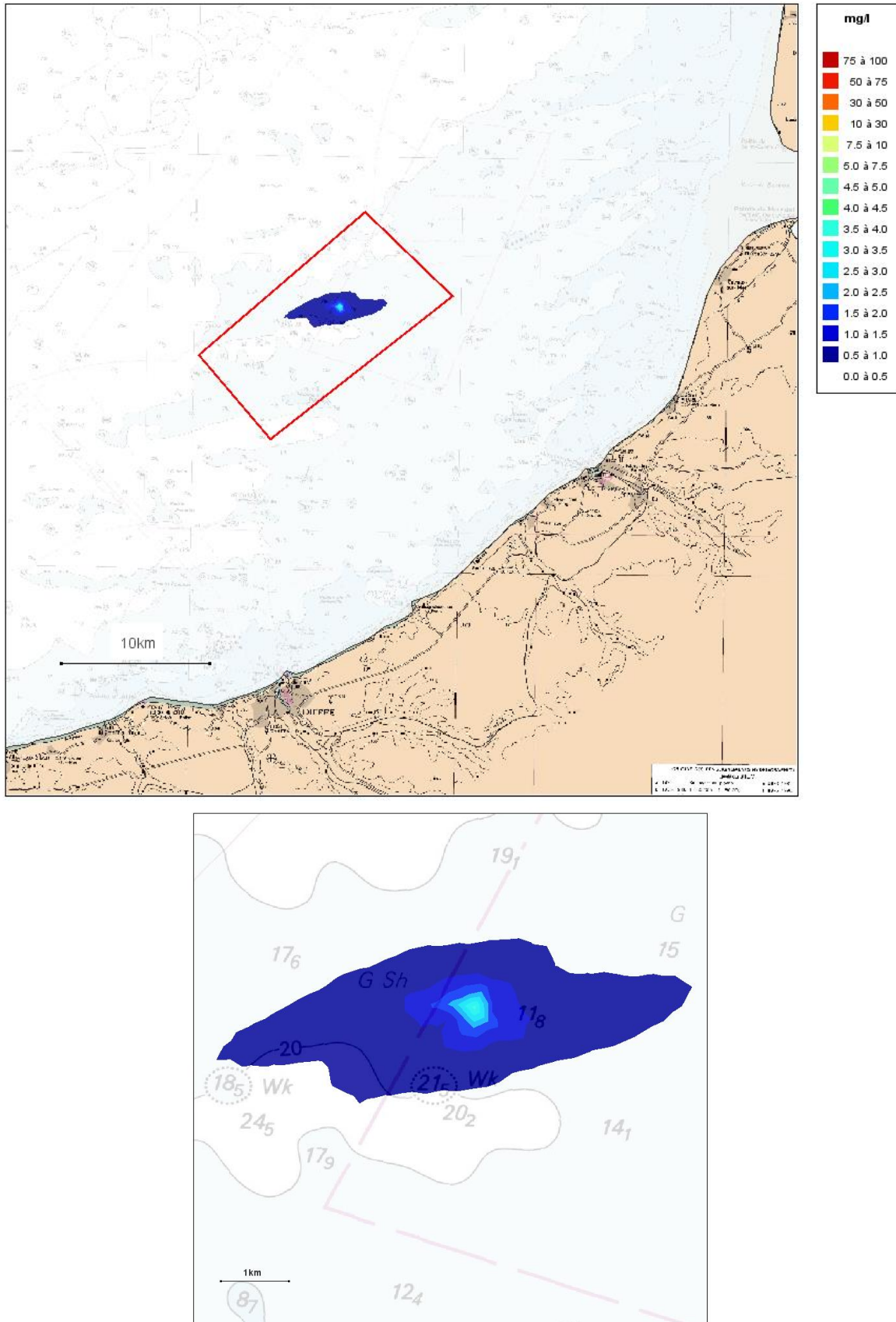


Figure 70 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 1 –volume initial du cutting 350m³

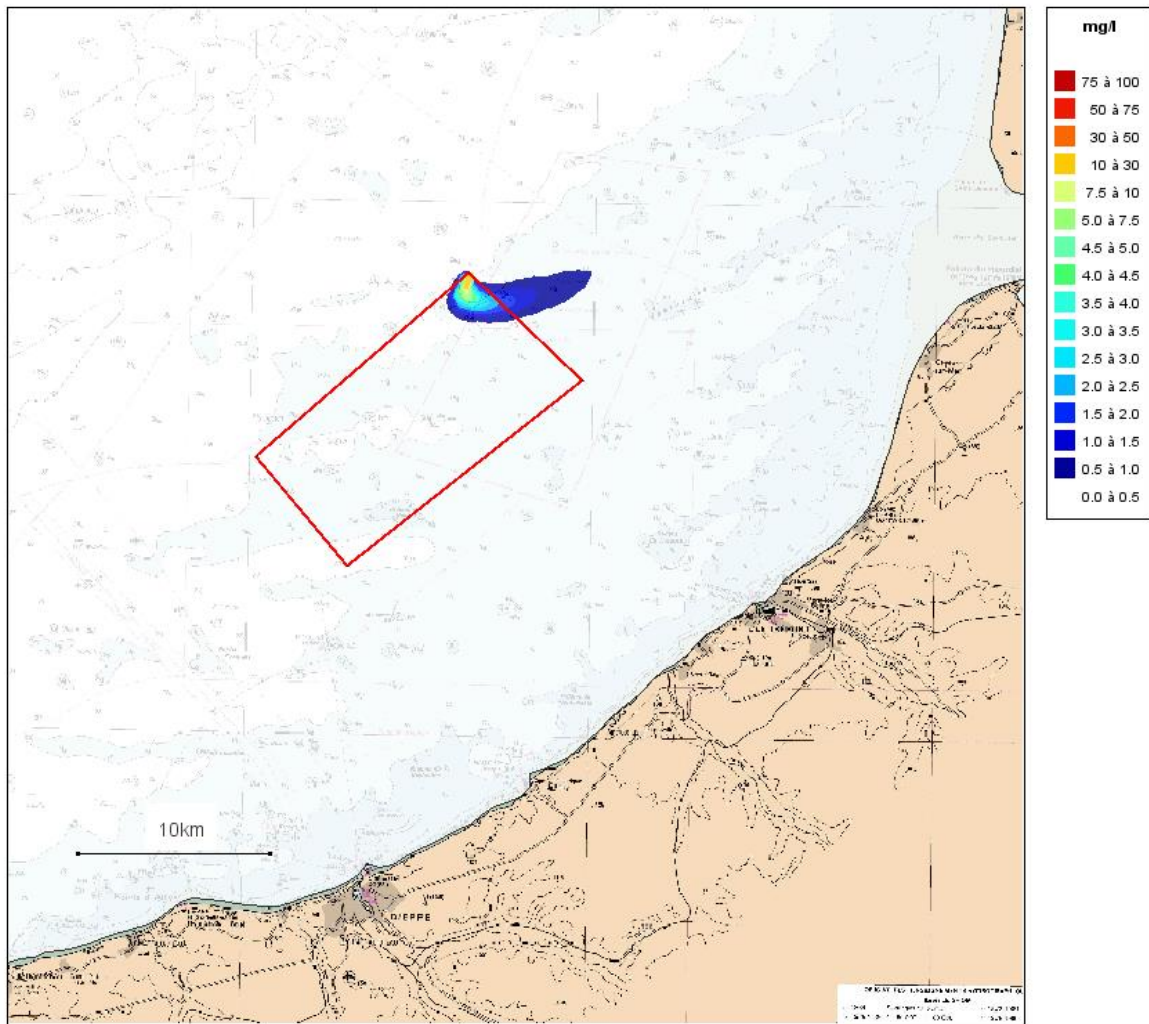


Figure 71 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 1 – volume initial du cutting 1000m³

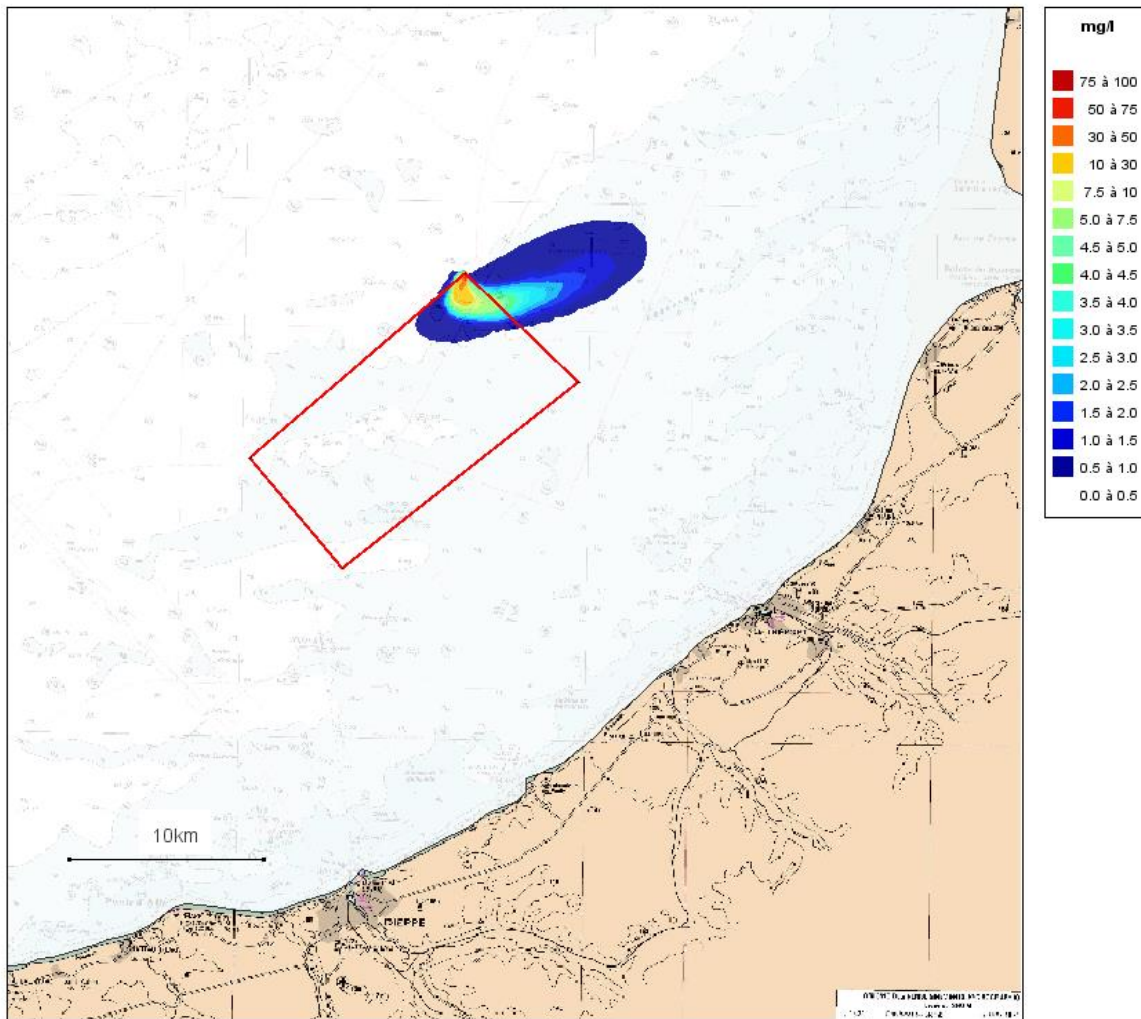


Figure 72 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 2 –volume initial du cutting 350m³

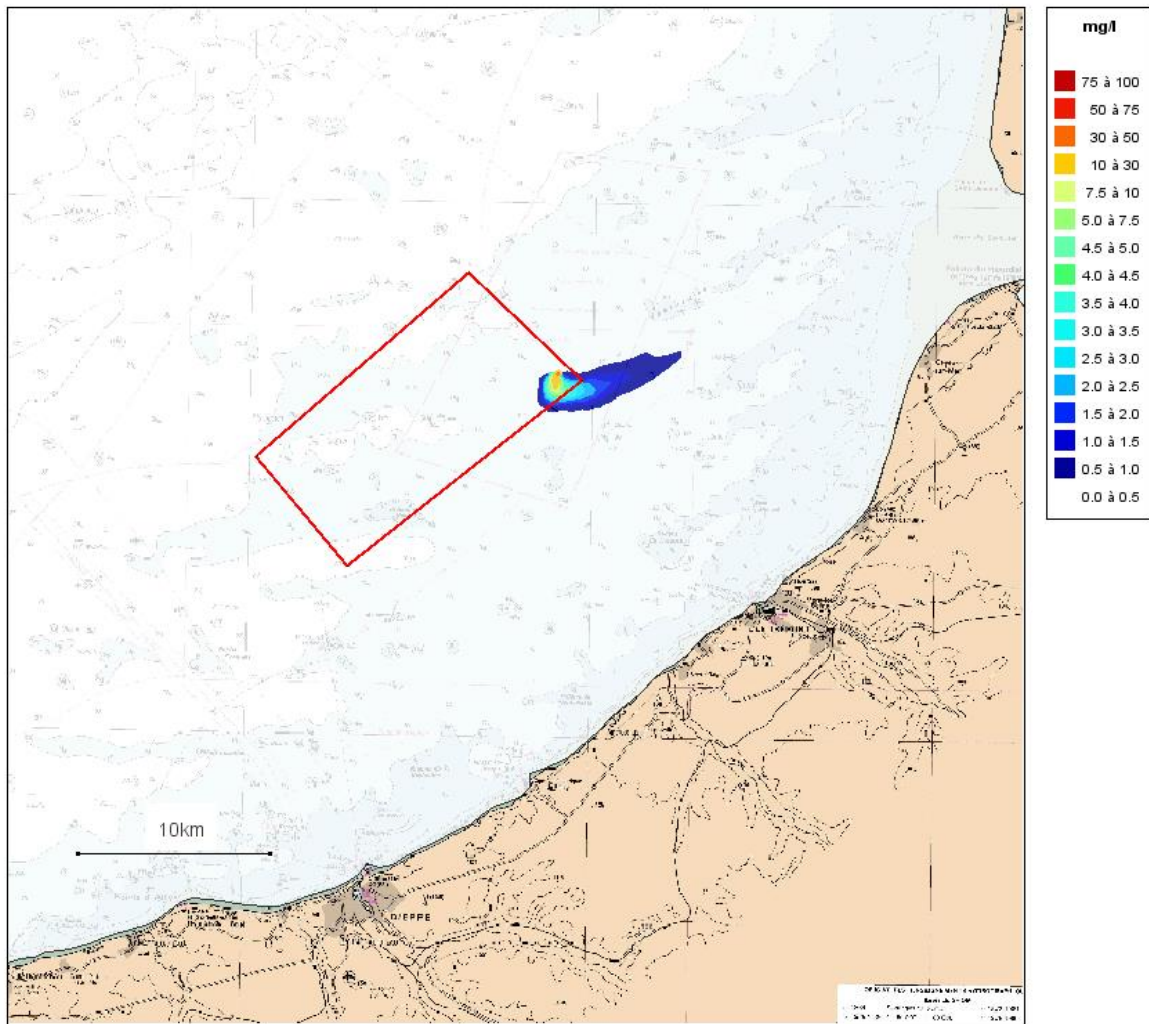


Figure 73 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 2 – volume initial du cutting 1000m³

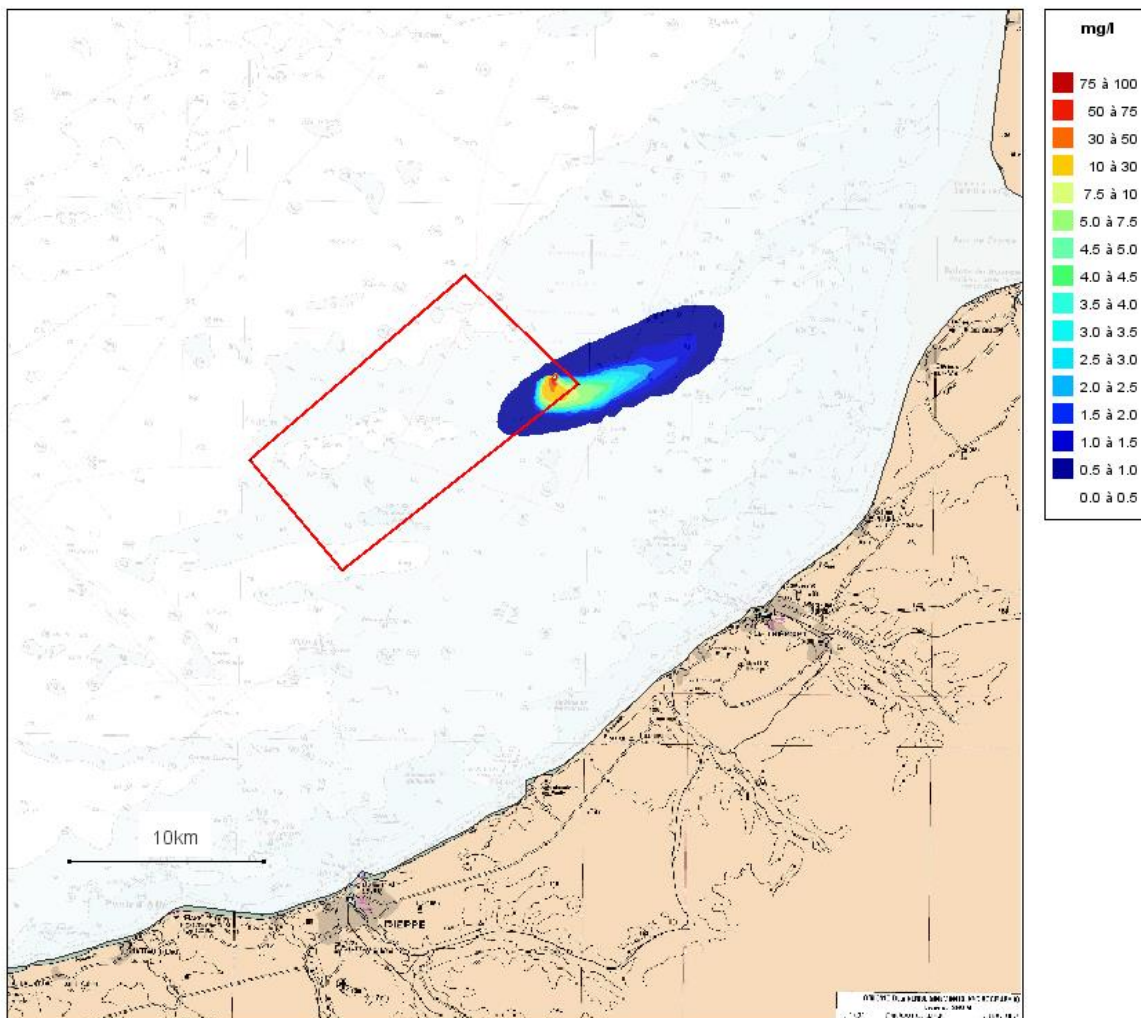


Figure 74 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 3 – volume initial du cutting 350m³

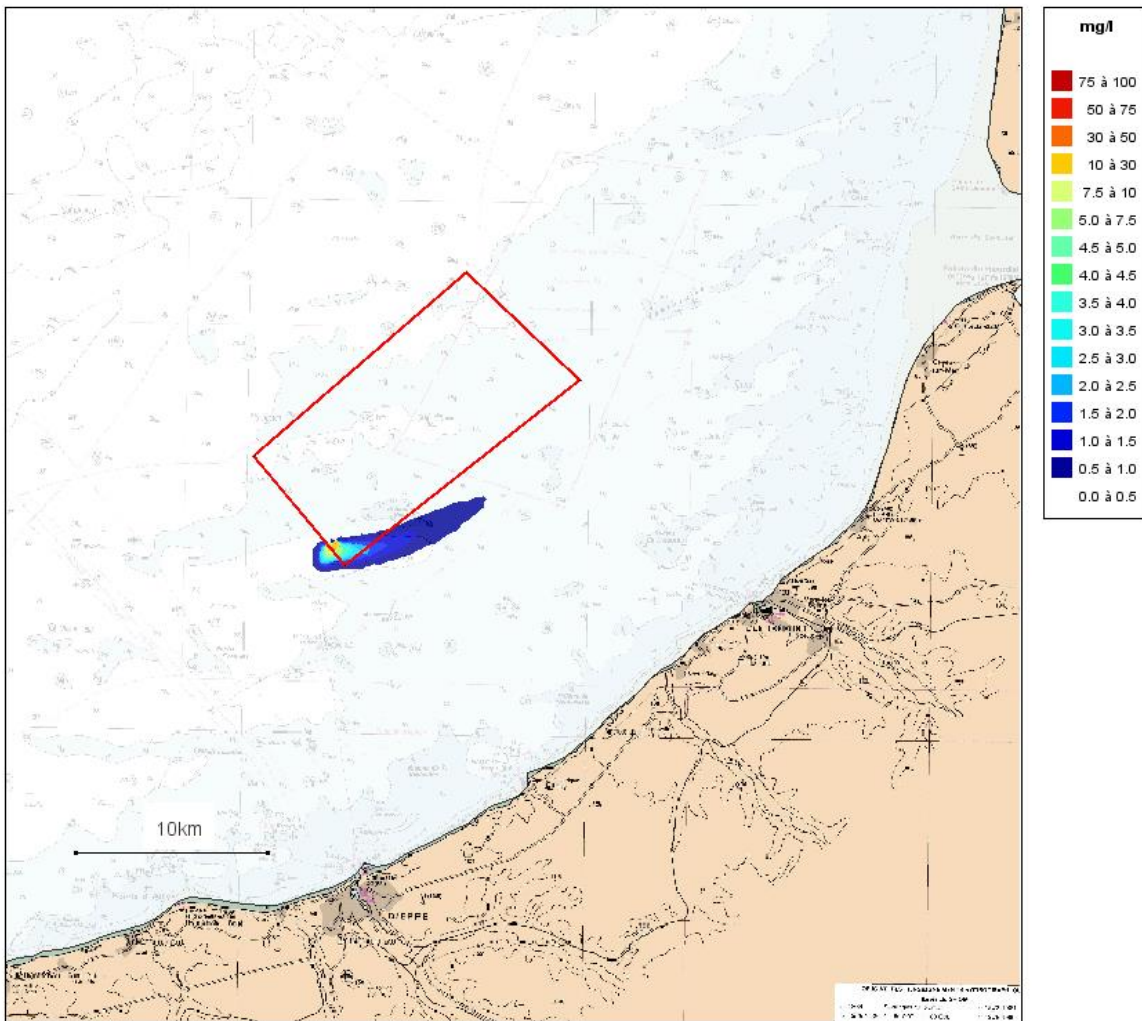


Figure 75 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 3 – volume initial du cutting 1000m³

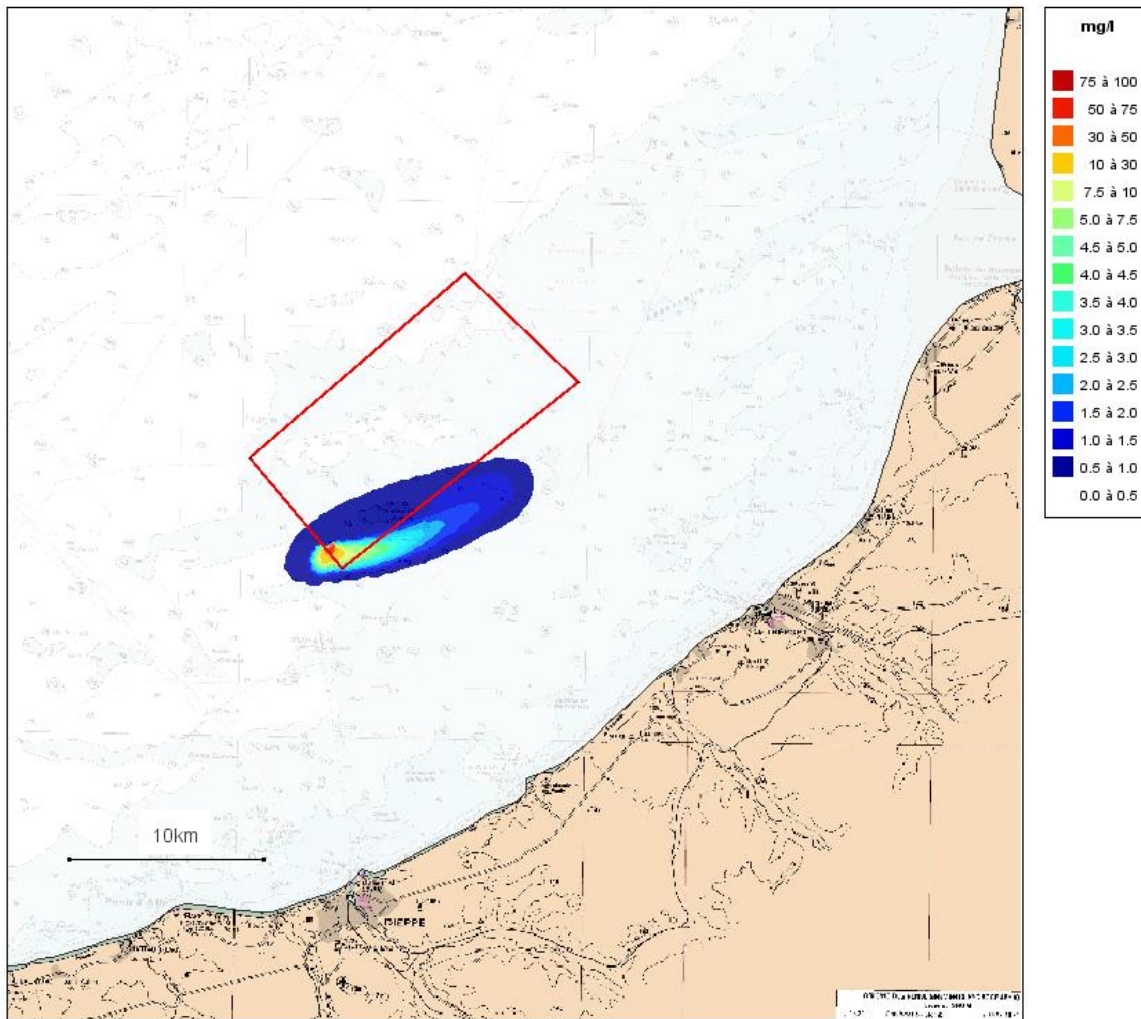


Figure 76 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 4 –volume initial du cutting 350m³

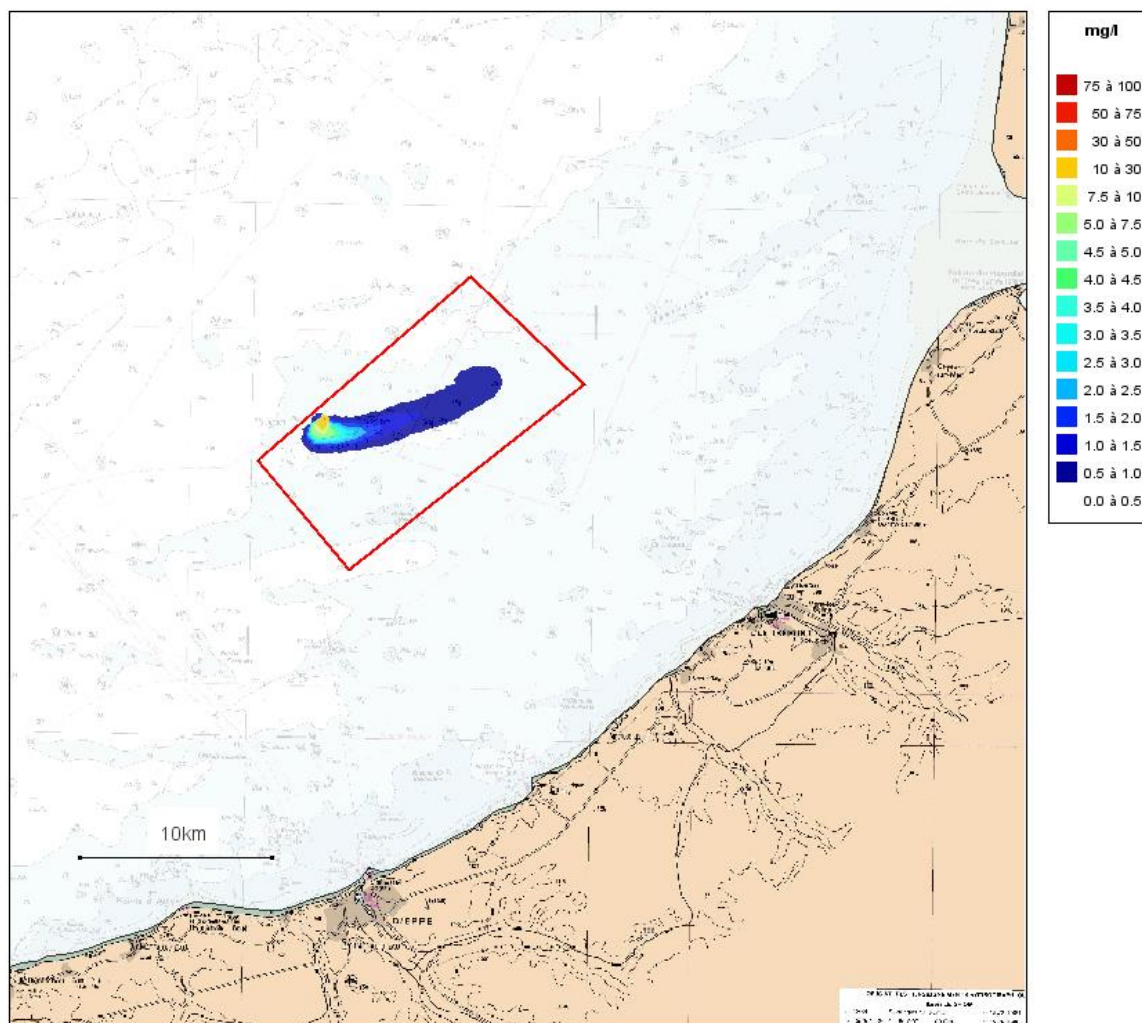


Figure 77 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 4 – volume initial du cutting 1000m³

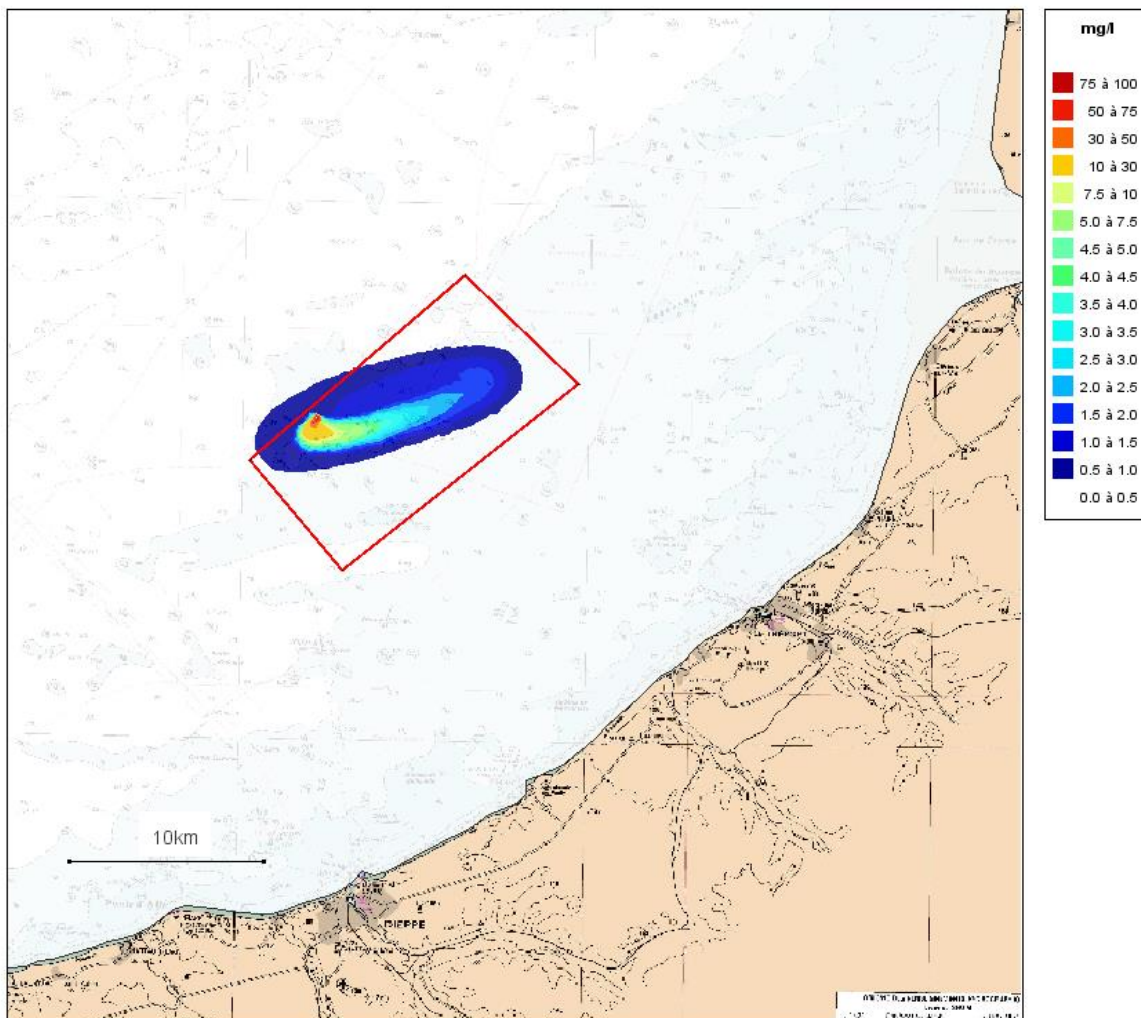


Figure 78 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 5 –volume initial du cutting 350m³ et 1000m³

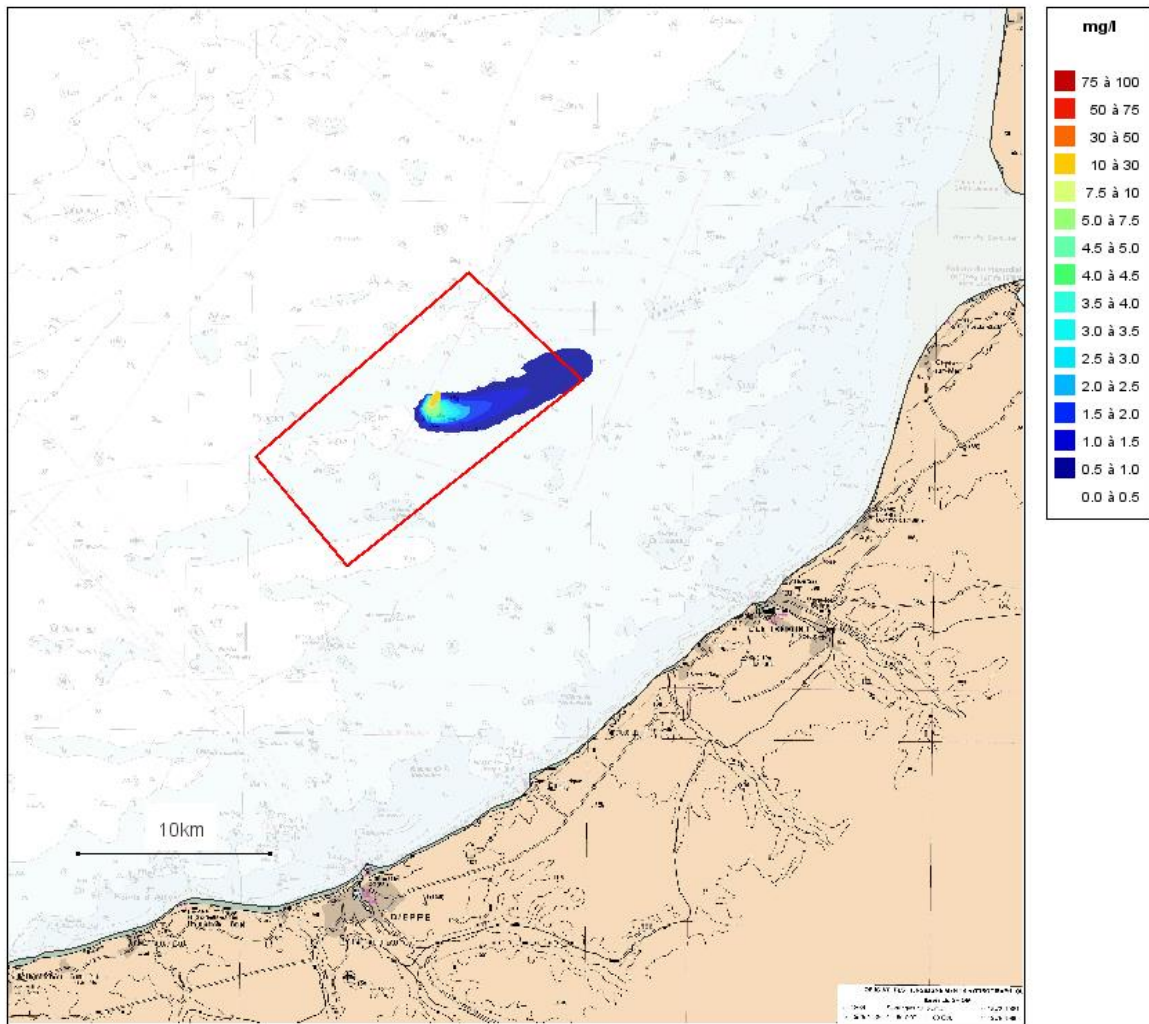


Figure 79 – Concentrations maximales de MES au cours de la simulation – Eolienne 5 – volume initial du cutting 1000m³

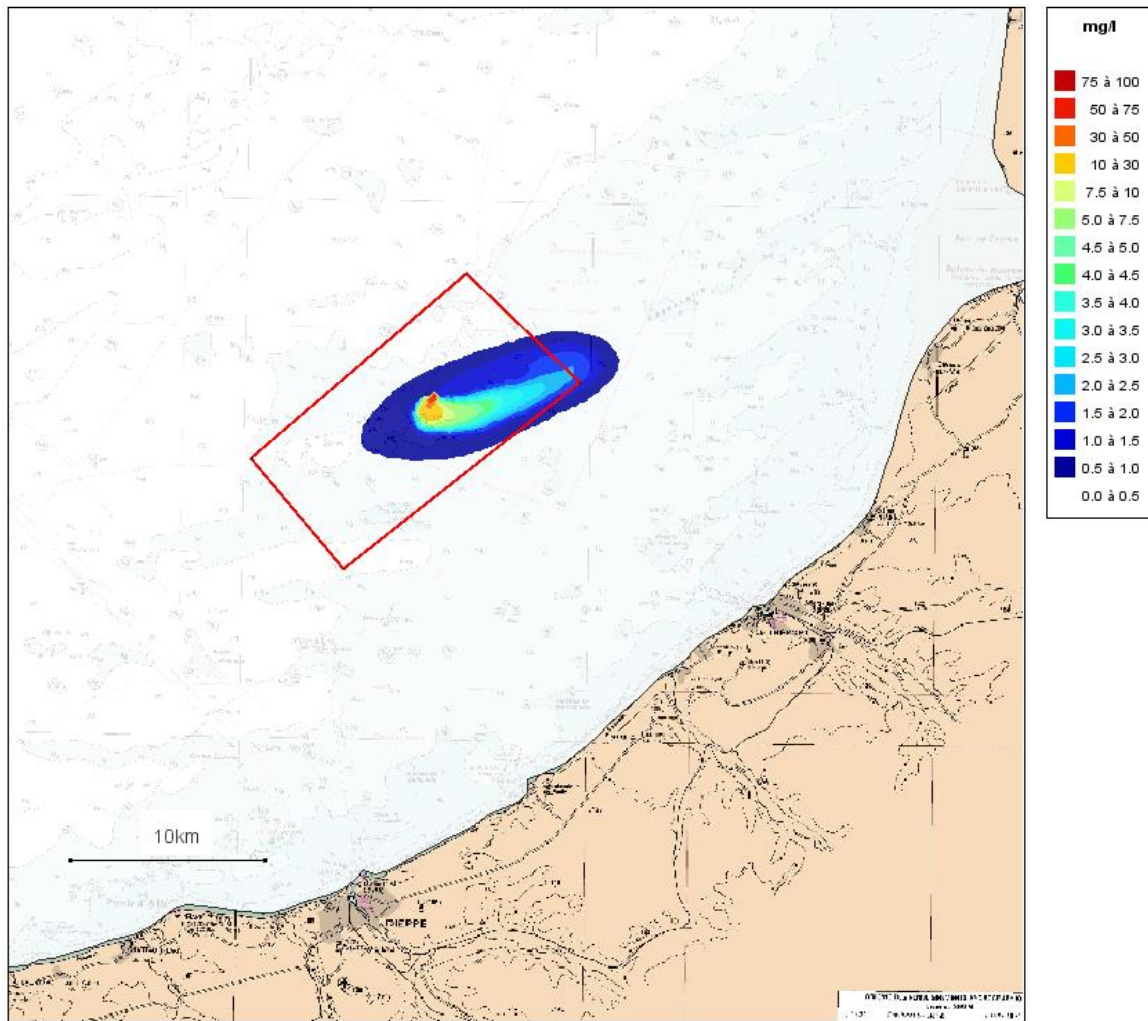
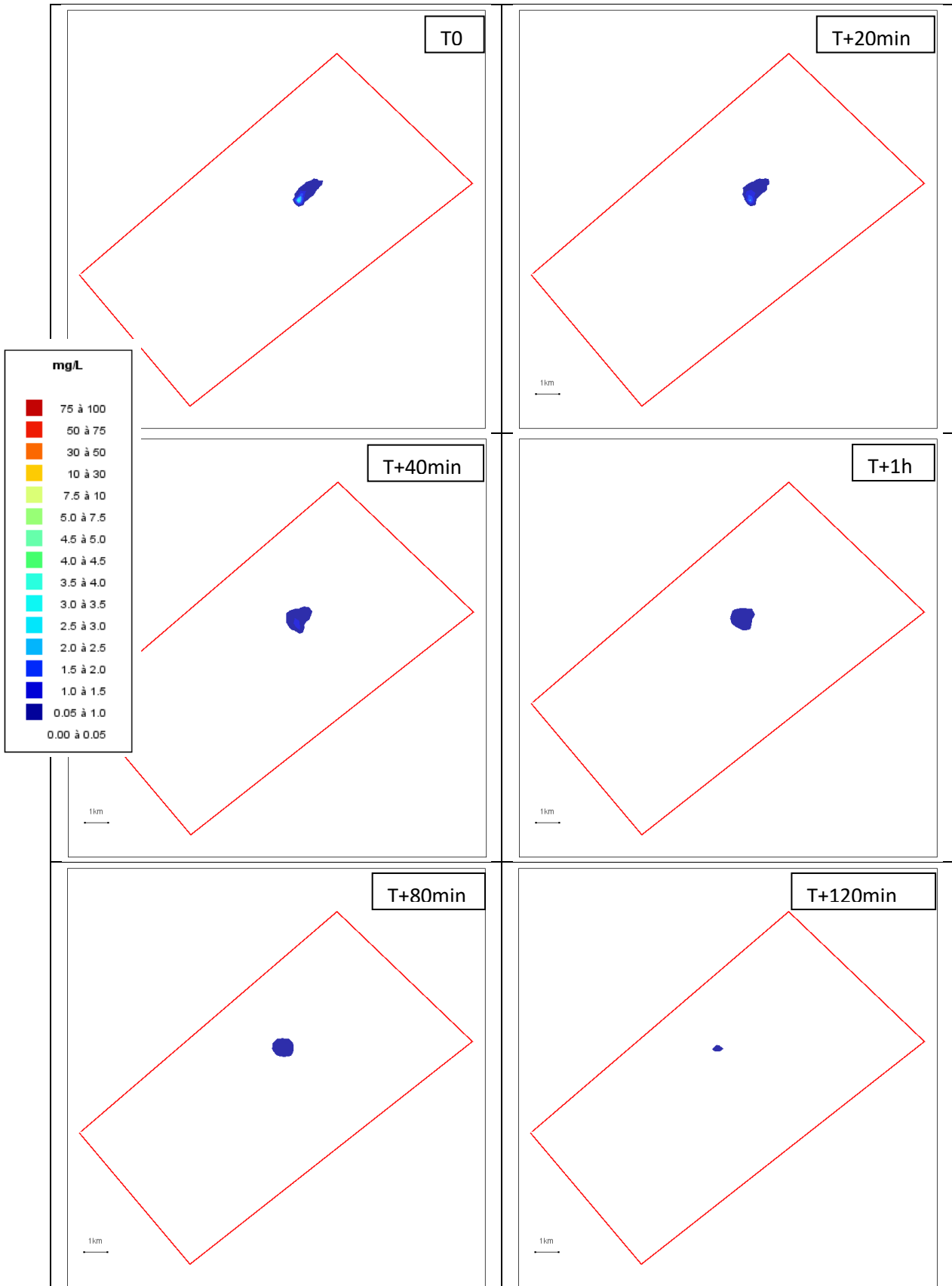


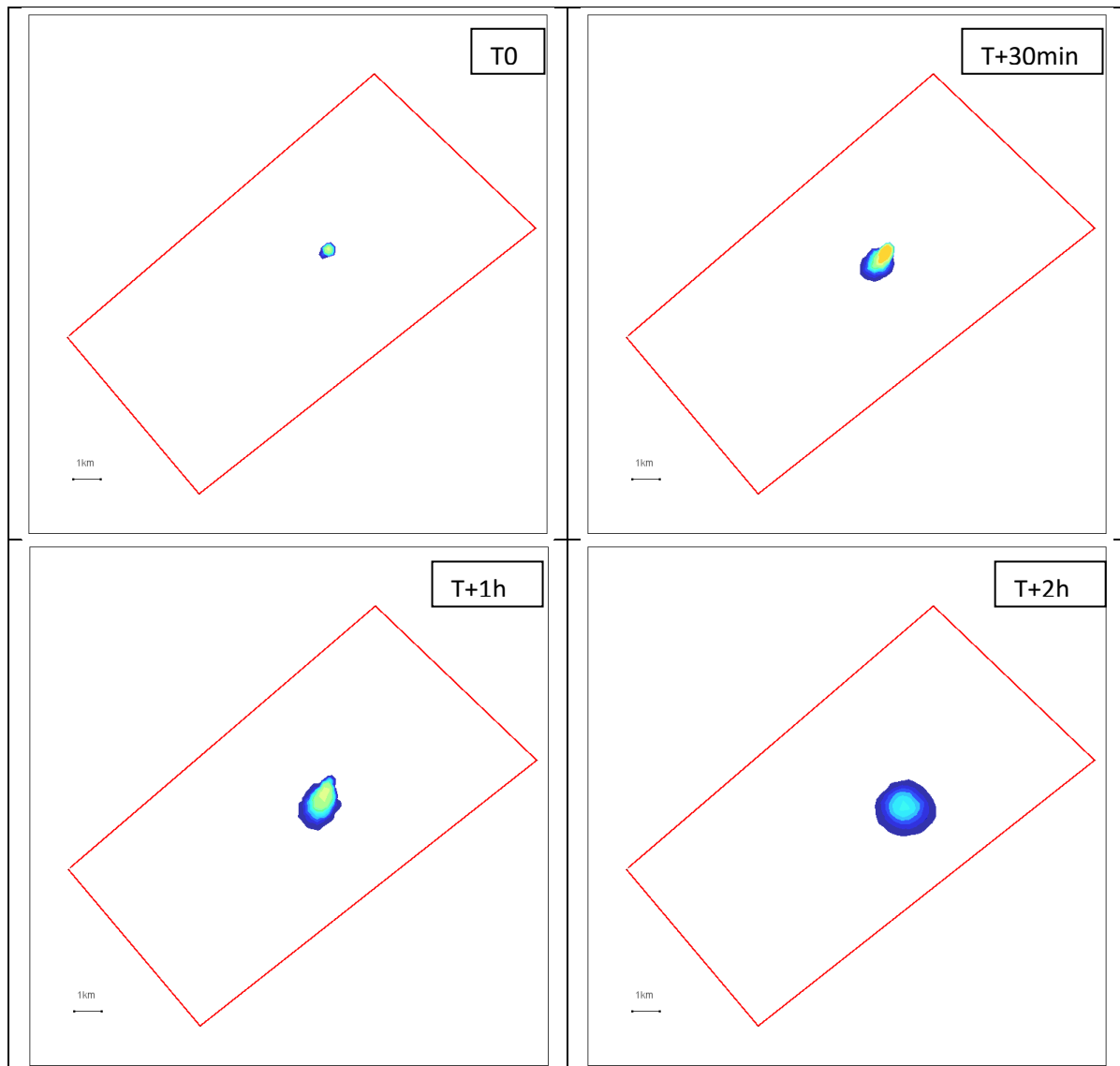
Figure 80 – Evolution du panache après l'arrêt des travaux de forage – temps exprimé en minutes à partir de la fin d'une opération de forage – Eolienne 5 - jacket

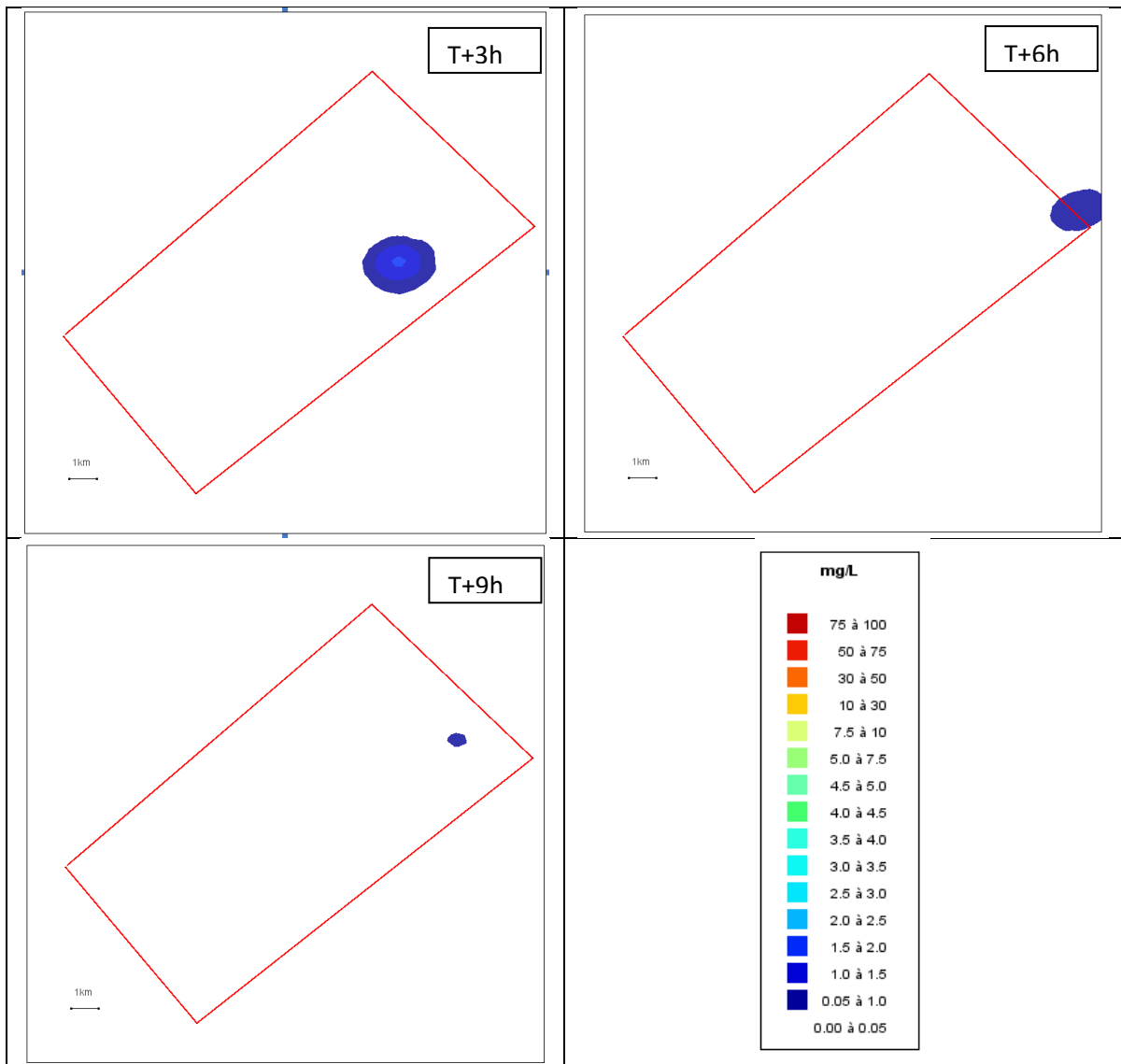


La Figure 80 rend compte de l'évolution du panache après la réalisation du forage pour les fondations jacket.

Les résultats montrent que les concentrations du panache turbide tendent rapidement au bruit de fond de la zone. Le panache est totalement dilué au bout de 120min après l'arrêt des travaux de forage.

Figure 81 – Evolution du panache après la dispersion (350m³) – temps exprimé en minutes à partir de la fin d'une opération de forage – Eolienne 5





La Figure 81 rend compte de l'évolution du panache après dispersion pour un « cutting » d'un volume 350m³. Les concentrations du panache turbide tendent rapidement au bruit de fond de la zone (moins de 3h). Le panache est totalement dilué au bout de 9h.

3.5.8 Synthèse des impacts sur la qualité de l'eau

Les turbidités induites par les opérations de forage utilisées en complément du battage, pour les fondations jacket ont été modélisées.

Ils sont à analyser au regard des turbidités naturelles variables et potentiellement importantes de la baie de Somme :

- ▶ Quelques mg/l pour les mois (d'été) les moins turbides ;
- ▶ [5-10] mg/l pour les mois (d'hiver) les plus turbides.

En considérant deux hypothèses de gestion des résidus de forage, les résultats de la modélisation montrent que :

- ▶ Pour les opérations de forage en continu avec relargage en continu des débris de forage dans la colonne d'eau :
 - Les niveaux maximums de turbidité, qui ne sont effectifs que pendant la durée des opérations et ne sont rencontrés qu'au niveau du point de forage, sont de 5 mg/l ;
 - Les turbidités induites sont très rapidement dispersées par les courants de marée : environ 30 mn après la fin du forage, les valeurs de concentrations de MES ne sont déjà plus détectables par rapport au bruit de fond ambiant ;
 - On ne détecte aucune turbidité induite à proximité du trait de côte.
- ▶ Pour une dispersion différée après accumulation de 350m³ ou 1000 m³ de résidus de forage :
 - une concentration importante au début du relargage pouvant atteindre 100mg/l. Néanmoins suite à l'action des courants dominants, les concentrations vont rapidement diminuer pour atteindre le bruit de fond du site ;
 - Les panaches induits ont une emprise pouvant s'étendre sur une distance de l'ordre d'une dizaine de kilomètre ;
 - La concentration résiduelle de 3 mg/l, représentative des conditions du site en période estivale, n'est plus détectable au-delà de 4 km du point de dispersion ;
 - En moins de 3 h après dispersion la concentration en MES est équivalente à la turbidité naturelle du site ;
 - On ne détecte aucune turbidité induite à proximité du trait de côte.

Nous pouvons donc en conclure que l'impact lié aux travaux sur la turbidité du milieu sera négligeable pour les opérations de forage en continu et très faible pour la dispersion.

4 Synthèse et conclusion



Le projet d'implantation du parc éolien au large de Dieppe et Tréport, regroupe 62 éoliennes situées à une distance minimale de 15km de la côte. Les éoliennes seront fondées sur des structures type jacket, sur des fonds pouvant varier sur la zone de -6m CM à -24 m CM.

Le potentiel impact du parc sur les conditions naturelles du site a été analysé pour les thématiques suivantes :

- ▶ Hydrodynamique : courants et niveaux de marée, états de mer ;
- ▶ La dynamique sédimentaire ;
- ▶ La turbidité en phase travaux.

Ces thématiques ont été analysées à l'échelle du parc et à l'échelle régionale, depuis le large jusqu'au trait de côte.

IMPACTS SUR LES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES

Courants

Les conditions de courant sur la zone d'étude sont régies principalement par la marée. Les courants de marée sur le secteur d'étude longent globalement la côte : ils sont orientés vers le Nord-Est en flot et vers le Sud-Ouest en jusant, avec une asymétrie marquée en faveur du flot. Pour une marée de coefficient 95 (vive-eau) les vitesses maximales de flot sont de l'ordre de 1m.s⁻¹ à 1,5 m.s⁻¹, et de l'ordre de 0,7 à 1 m.s⁻¹ en jusant.

Les résultats sont présentés sous forme de cartes de courants aux moments des maxima de flot et de jusant, en état initial et aménagé. Des cartes de différentiel des intensités ont également été tracées.

L'analyse des résultats peut être synthétisée comme suit :

- ▶ L'impact des fondations sur les niveaux d'eau sont nuls.
- ▶ Les impacts des fondations jacket sur les conditions de courant restent localisés à l'intérieur du parc et ne sont significatives qu'à proximité immédiate des structures qui font obstacle à l'écoulement. Autour de chaque fondation, les modifications des intensités de courant de plus de 5% ne vont pas au-delà d'environ 200m.

Nous pouvons donc retenir qu'en dehors d'une zone d'environ 200m pour les fondations jacket, il n'y a pas d'impact significatif sur les conditions de courants.

Propagation des vagues

Les états de mer de la zone sont caractérisés par des houles provenant en majorité du secteur Ouest. Des événements d'incidence Nord peuvent être néanmoins observés avec des hauteurs significatives moins importantes que les tempêtes venues du secteur Ouest. Deux événements énergétiques ont été définis et simulés, à partir des sorties des modélisations Previmer (Ifremer) : la tempête Ruzica (08/02/2016) pour le secteur ouest, avec des vagues atteignant 4m au niveau du parc, et événement de secteur Nord qui génère des vagues de 2m au niveau du parc.

En se propageant à travers le champ éolien, les vagues vont subir localement des pertes d'énergie au niveau de chaque fondation. Un effet cumulatif à l'échelle de l'ensemble des éoliennes est possible et a pu être évalué grâce au modèle mis en place qui intègre explicitement l'ensemble des fondations.

Les résultats sont représentés sous forme de cartes de différentiel des hauteurs significatives entre la situation actuelle et la situation aménagée. Les modifications des conditions de propagation des vagues ont été simulées pour deux niveaux de marée : pleine-mer et basse-mer de vive-eau.

L'analyse des résultats amène les constatations suivantes :

- ▶ les pertes d'énergie et leur cumul pour une tempête d'Ouest peuvent s'étendre en aval du parc sur une distance d'environ 16km avec une diminution de la hauteur significative d'au plus 0.05m soit 1% de la hauteur significative estimée à l'état initial. Aucun effet cumulatif n'est observé pour l'évènement de Nord, les pertes d'énergie restent localisées autour de chaque fondation dans un rayon d'environ 200m.

Nous pouvons donc conclure que les impacts vis-à-vis de la propagation des vagues vers la côte peuvent être considérés comme négligeables à nuls. Il n'y aura aucune incidence sur les conditions de vagues qui arrivent à la côte.

IMPACT SUR LA DYNAMIQUE SEDIMENTAIRE

Dans un premier temps les flux sédimentaires à l'échelle régionale ont été simulés, en configuration initiale et en configurations aménagées, pour des conditions hydrodynamiques très énergétiques (marée de vive-eau et états de mer générées par la tempête Ruzica). Trois classes granulométriques (315µm, 500 µm et 2000µm ont été représentées suivant trois modélisations distinctes.

Du point de vue de l'effet des fondations sur les flux sédimentaires, on peut retenir de l'analyse des résultats, en flot comme en jusant :

- ▶ Les modifications du transport sédimentaire restent globalement localisées autour des éoliennes ;
- ▶ Les modifications des flux solides en bordure du parc sont à peine sensibles ;
- ▶ Il n'y a aucun impact attendu sur l'érosion du littoral.

Les flux sédimentaires ne sont pas modifiés à l'échelle régionale.

Les conditions locales d'affouillement ont été évaluées autour des éoliennes à partir des conditions hydrodynamiques et des caractéristiques (granulométrie) de la couverture sédimentaire meuble.

La modélisation Flow-3D© menée dans cette approche qui se voulait conservative (hypothèses de houles et de courants forts, faible granulométrie...) a abouti aux résultats suivants :

- ▶ La profondeur maximale d'affouillement calculée est de l'ordre de 1,5 m ;
- ▶ En termes d'extension de la figure d'affouillement, atteignent approximativement de 8 à 14 m (selon les axes X et Y, respectivement) ;
- ▶ Enfin, l'influence d'ensemble pour une fondation jacket reste circonscrite à une cinquantaine de mètres environ.

Notons que les modélisations réalisées dans le cadre de cette note proposent une configuration proche du permanent en ne tenant compte que d'une direction de courant. Cette approche est identifiée comme majorante car dans la réalité le balancement des marées engendrent une rotation des courants avec une inversion entre le flot et le jusant. Ces conditions auront tendance à limiter l'emprise totale de l'affouillement en pied de fondation.

D'après les retours d'expérience sur des sites dont les caractéristiques (hydrodynamiques et sédimentaires) sont comparables, les effets des fondations sur les morphologies sableuses sont limités même pour les morphologies de dimension modérée (e.g. dunes « moyennes »). Les Ridens de Dieppe, qui supportent les morphologies de plus petite dimension et sont assimilés à des grands bancs, ne seront pas impactés par la mise en place de l'ensemble des fondations des éoliennes.

Nous pouvons donc en conclure qu'il n'y aura pas d'impact sensible sur la dynamique sédimentaire en dehors des limites du parc et notamment sur la morphologie caractéristique des Ridens de Dieppe

IMPACT SUR LA QUALITE DE L'EAU

Sur la zone d'étude, les niveaux de turbidité varient globalement entre quelques mg/l en condition estivale et quelques dizaines de mg/l en condition hivernale.

Les opérations de forage préalable à la mise en place des fondations seront émettrices de particules (résidus) en suspension dans la colonne d'eau. Les résultats des modélisations montrent que :

- ▮ Pour les fondations jackets et une durée de travaux effective de 19h :
 - Les concentrations maximales au droit des éoliennes ne dépassent pas les 8,5 mg/L,
 - Le panache reste localisé autour du point de forage.

Les concentrations, malgré des pics dans le champ proche des fondations, tendent à être dispersés très rapidement et les turbidités induites peuvent difficilement être détectées (en comparaison de la turbidité ambiante) dès lors que l'on s'éloigne des fondations.

- ▮ Pour les opérations de dispersion de volumes plus importants :
 - Les concentrations les plus fortes de MES sont localisées au droit du point d'immersion ;
 - A 4km de distance du point de dispersion, la concentration en MES est du même ordre de grandeur celle naturelle des mois les moins turbides.
 - Malgré les concentrations fortes au début de l'opération, ces dernières tendent rapidement, en moins de 3 heures, vers le bruit de fond de la zone.

Nous pouvons donc conclure que l'impact sur la turbidité du milieu, lors des travaux de forage, sera négligeable pour les fondations jacket. Pour les opérations l'impact sera faible et temporaire.

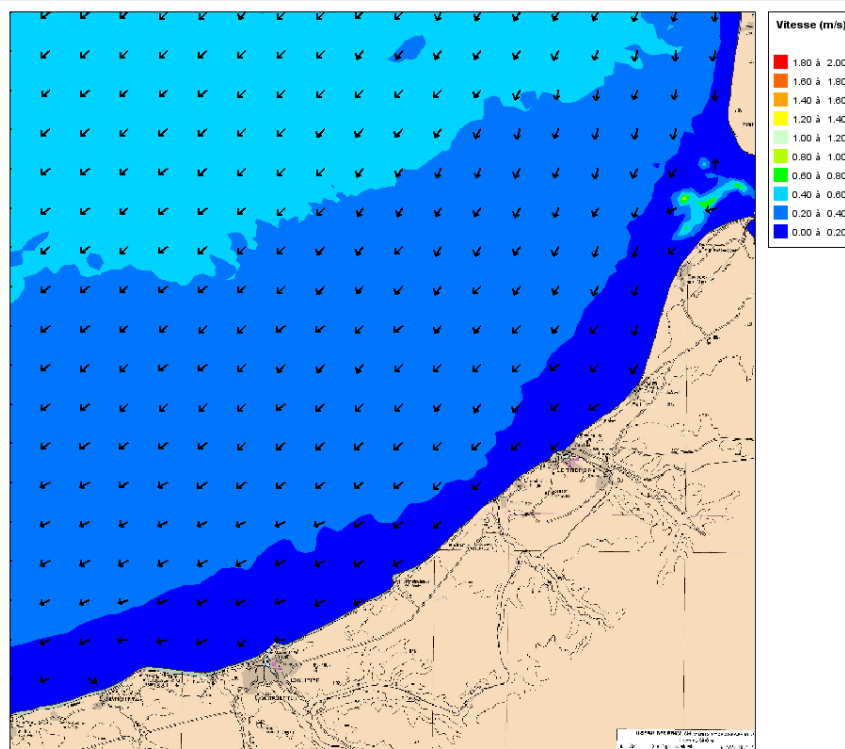
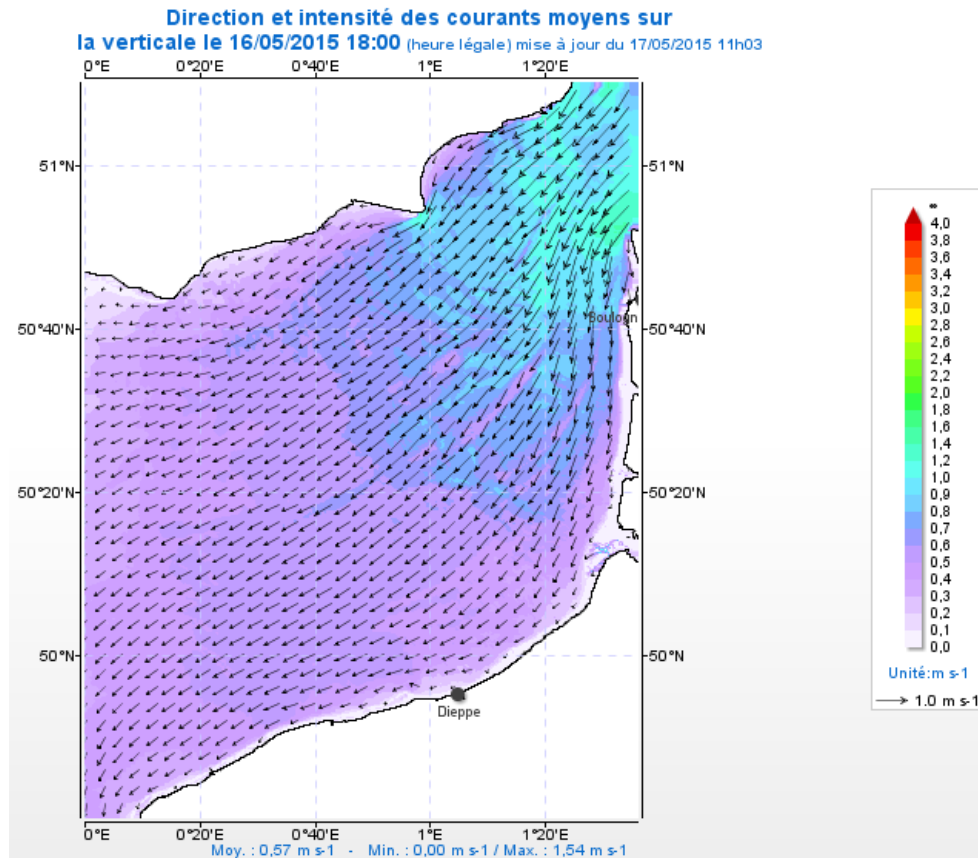
5 Annexes

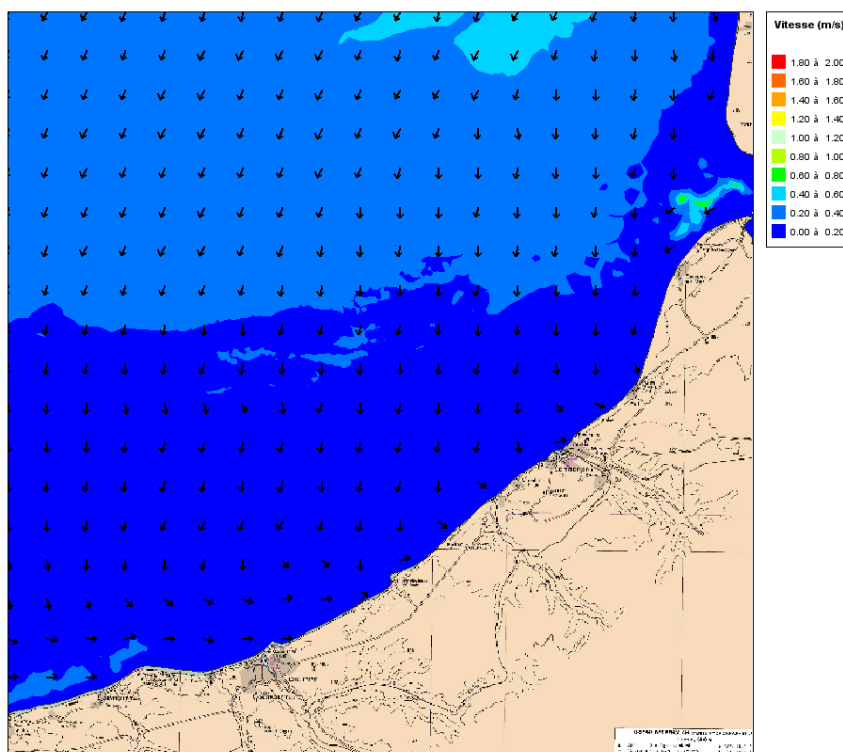
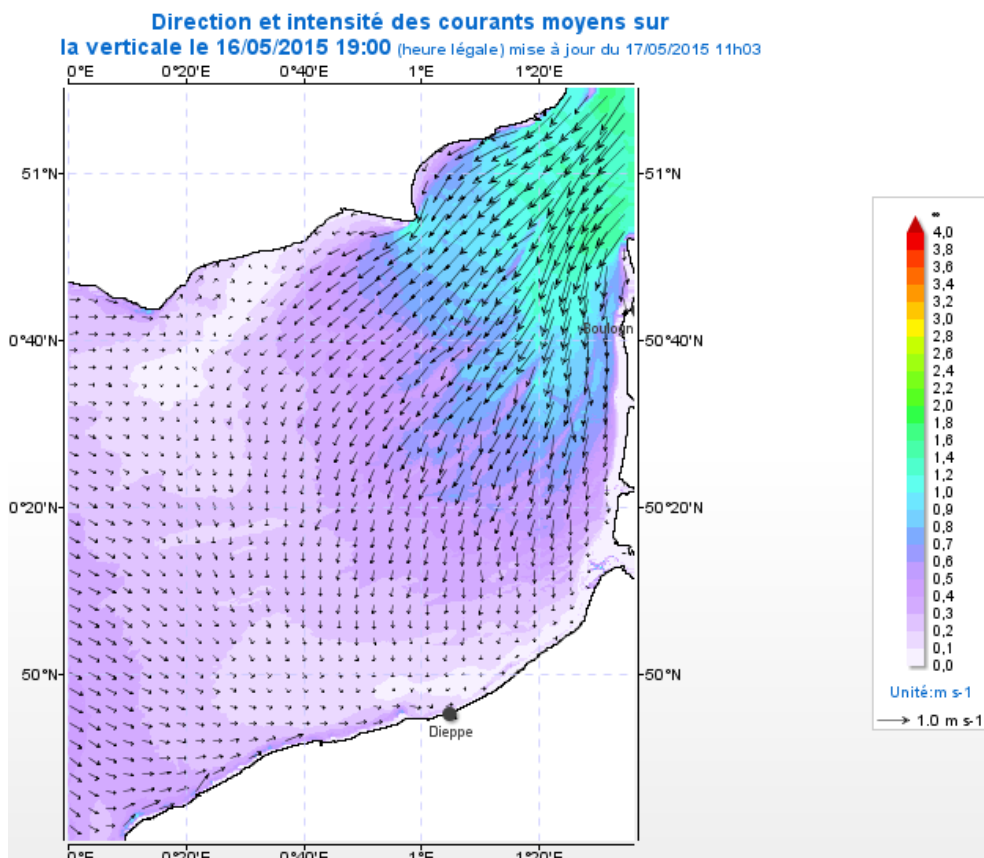


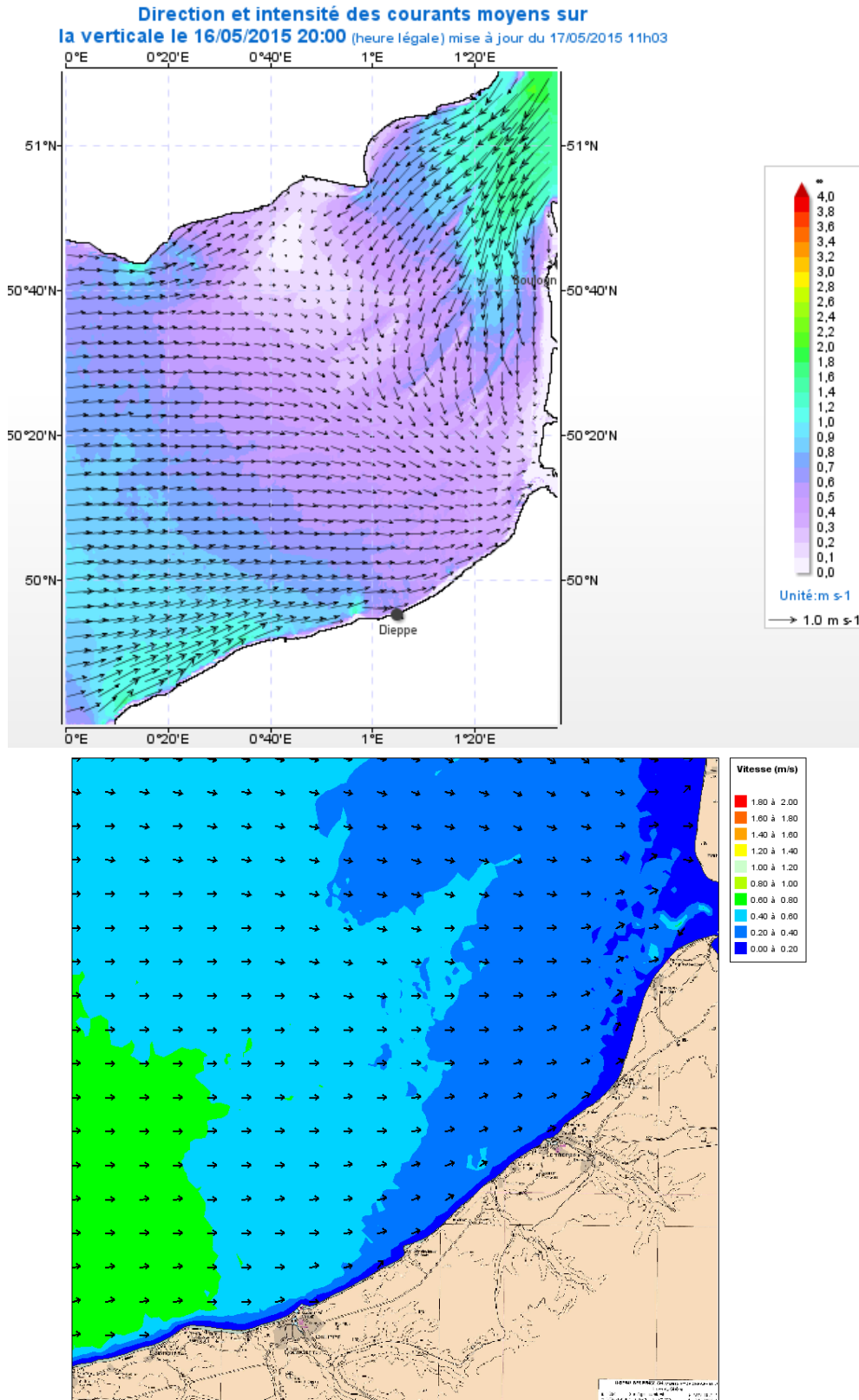
SOMMAIRE

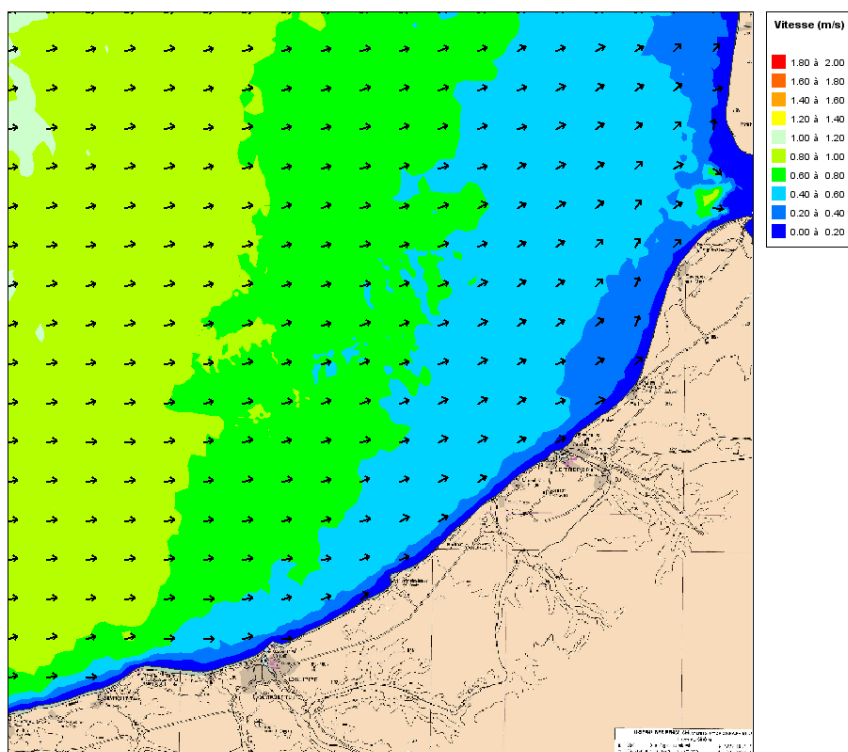
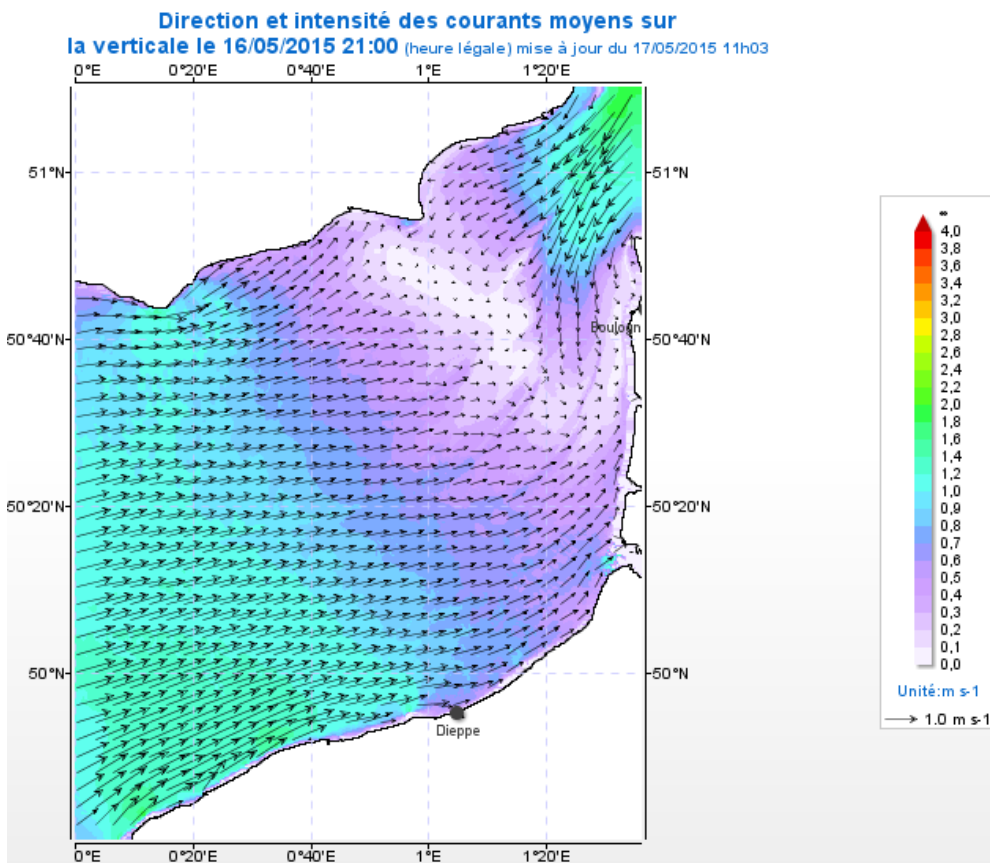
5.1 Annexe 1 – Calage du modèle hydrodynamique – Comparaison des résultats du modèle TELEMAC-2D et du programme Previmer pour un coefficient 95	97
5.2 Annexe 2 : Propagation des houles de large à la côte – Résultats Tomawac – Etat initial	110
5.3 Annexe 3 : Propagation des houles du large à la côte – Résultats Tomawac – Etat aménagé	113
5.4 Annexe 4 : Modélisation des capacités de transport instantané – Granulométrie 500µM	115
5.5 Annexe 5 : Modélisation des capacités de transport instantané – Granulométrie 2000µM	117
5.6 Annexe 6 : Modélisation des capacités de transport instantané – granulométrie 315µm	119
5.7 Annexe 7 : Évolution du panache après la dispersion (1000m³) – Temps exprimé en heures à partir de la fin d’une opération– Éolienne 5	121

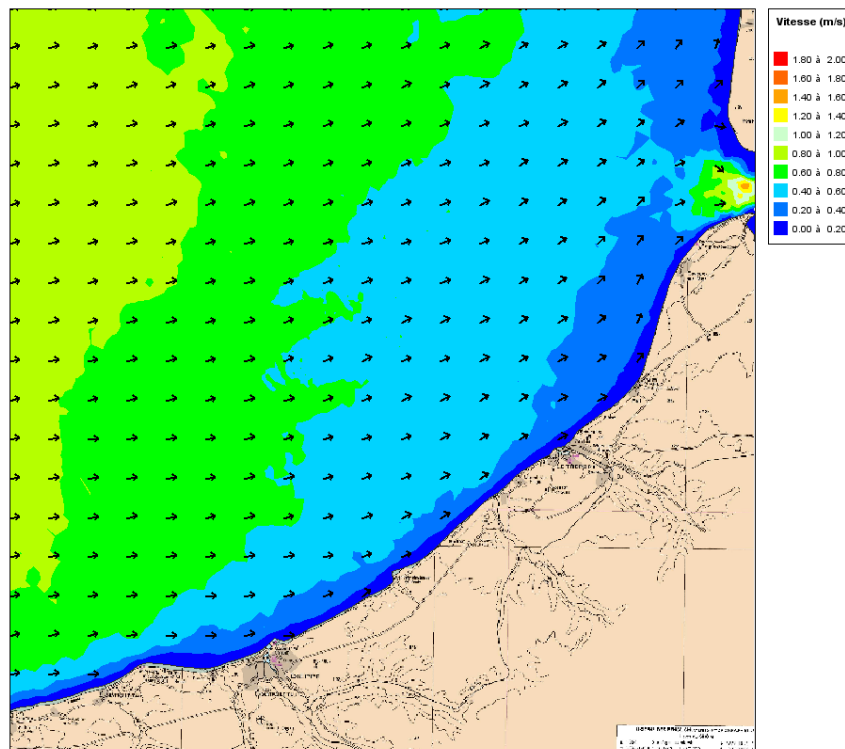
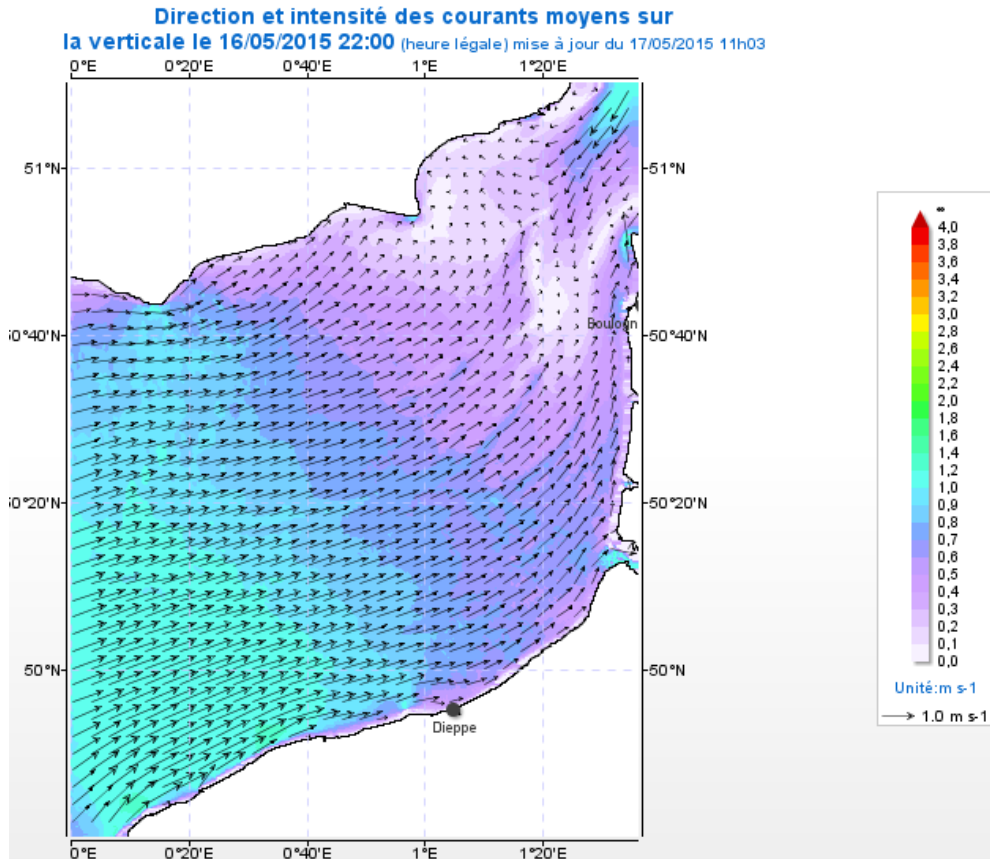
5.1 Annexe 1 – Calage du modèle hydrodynamique – Comparaison des résultats du modèle TELEMAC-2D et du programme Previmer pour un coefficient 95

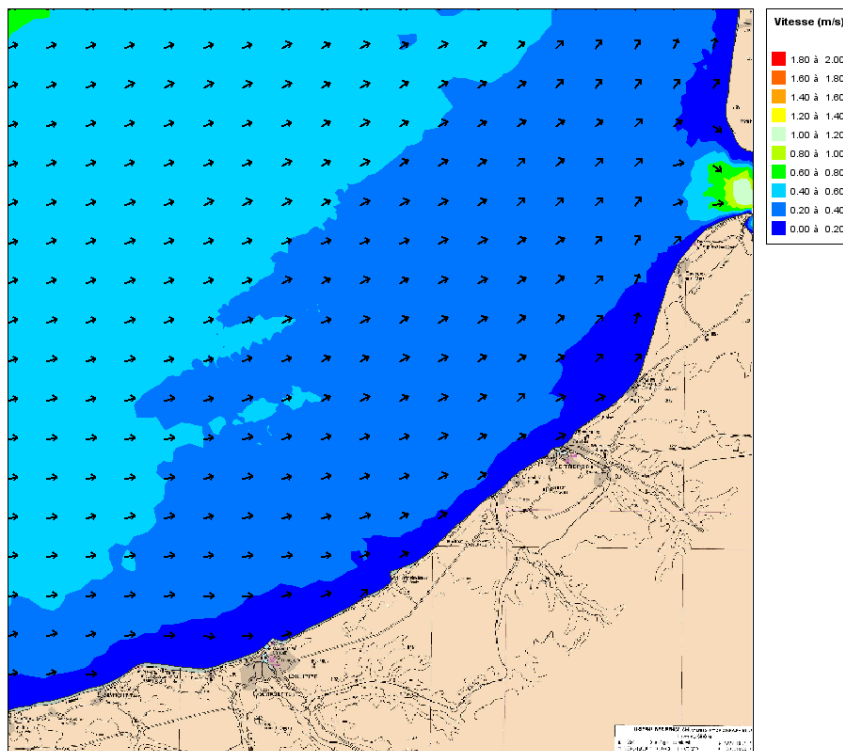
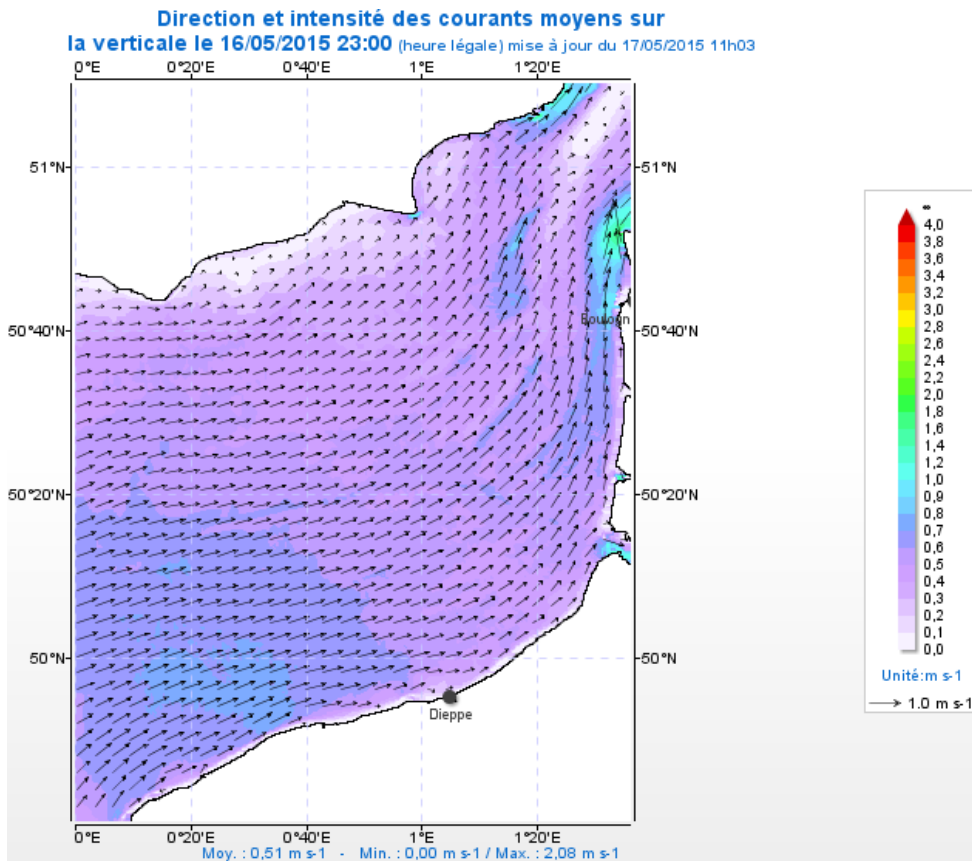


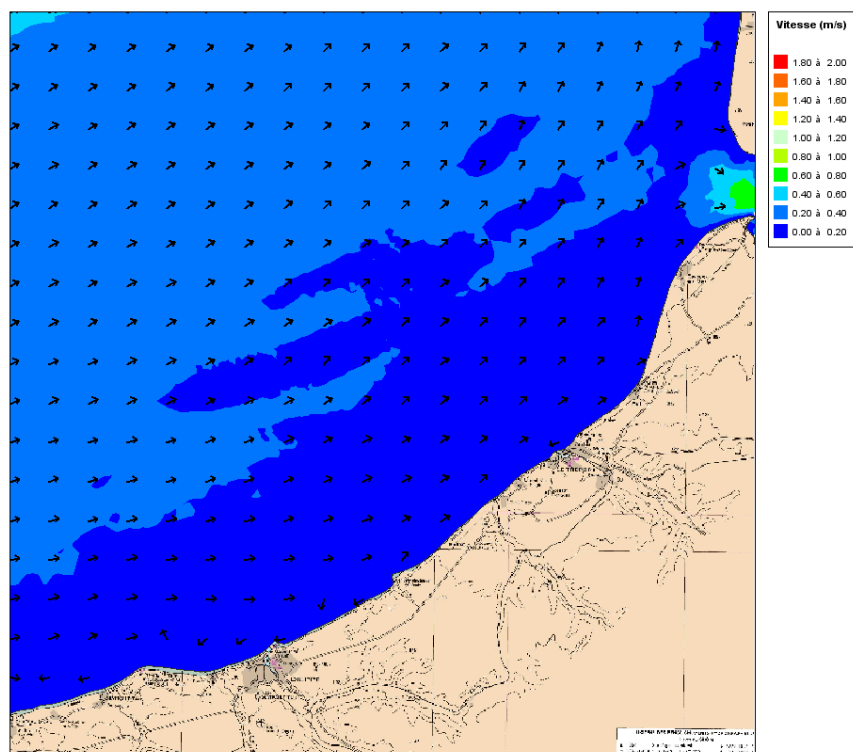
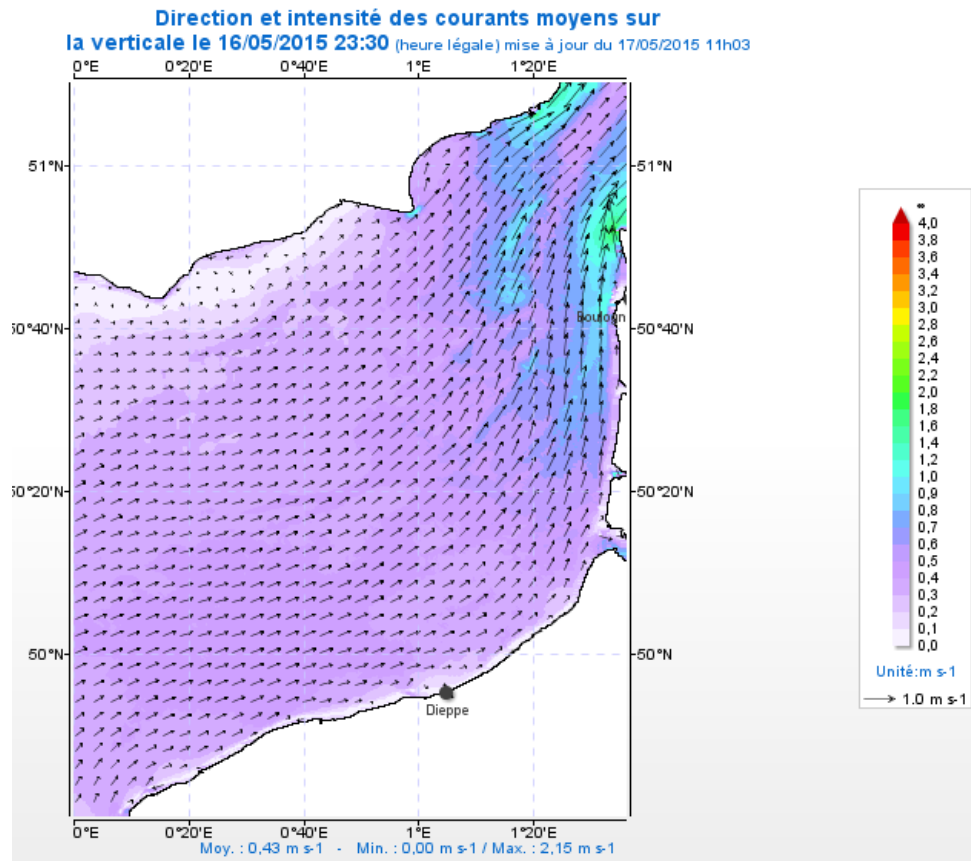


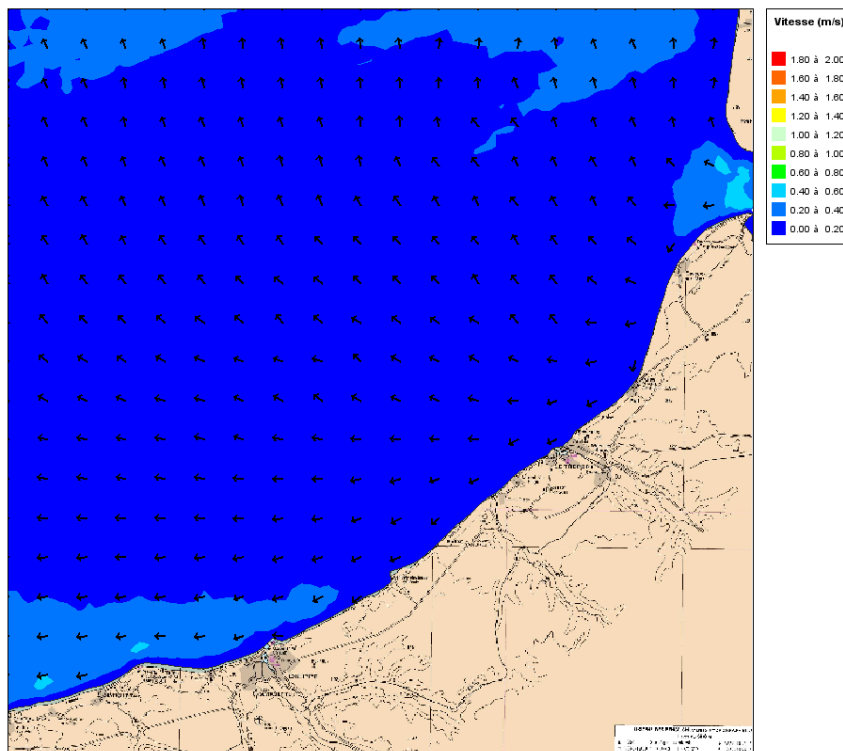
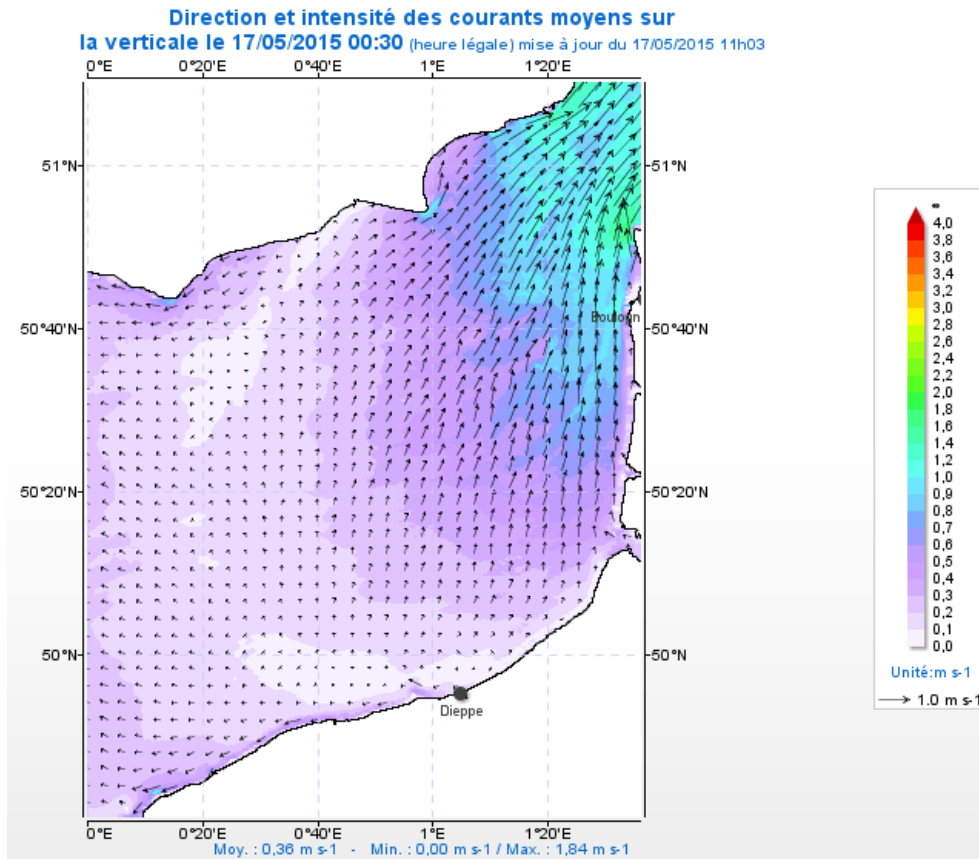




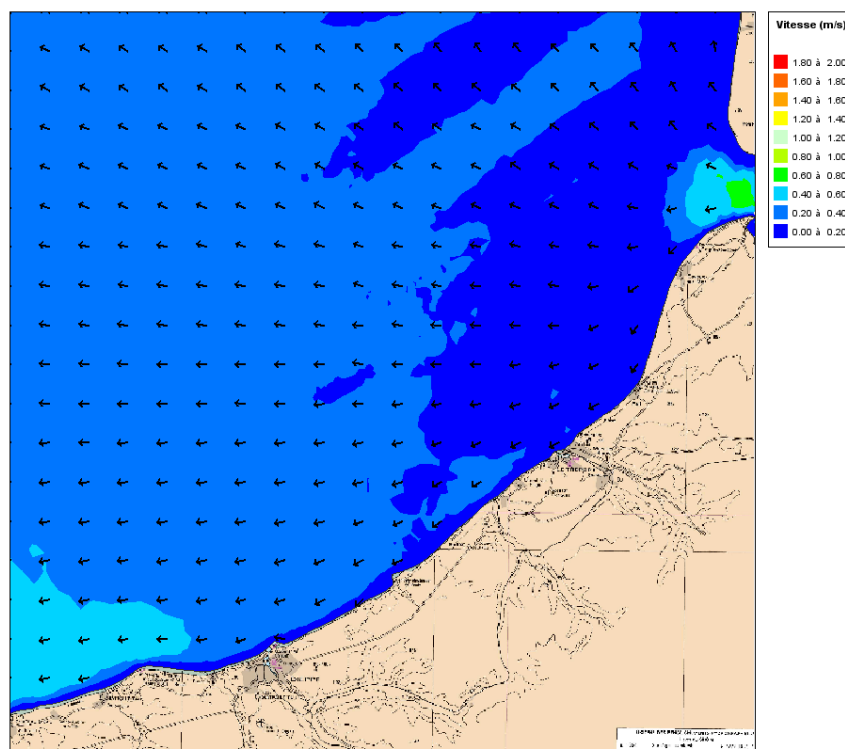
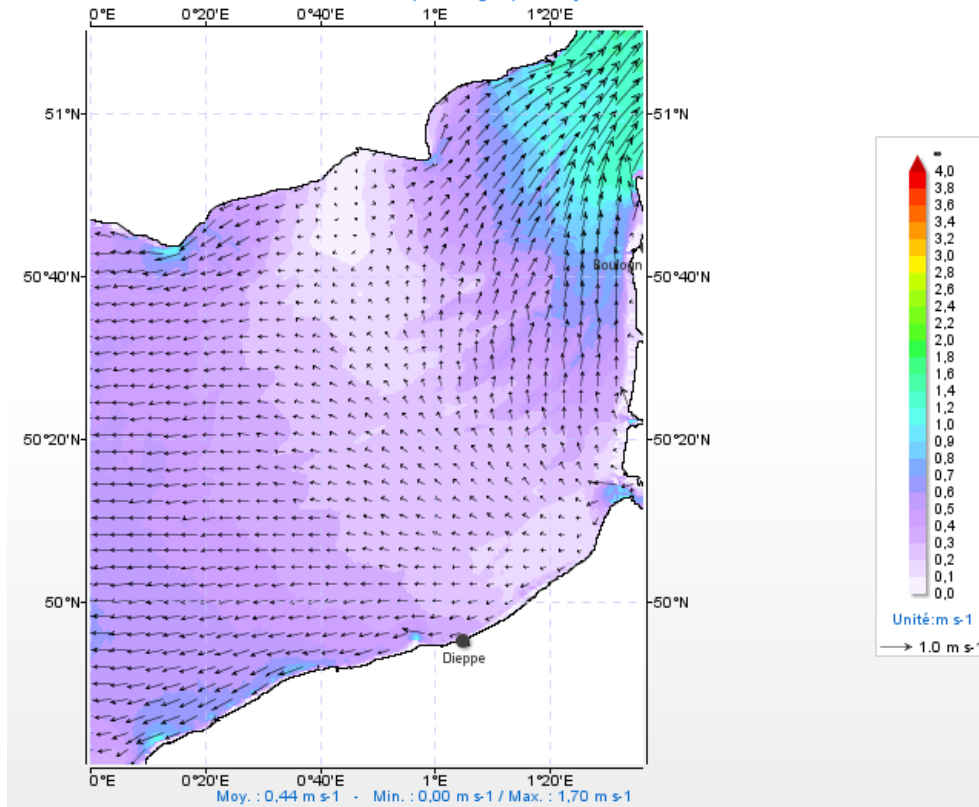


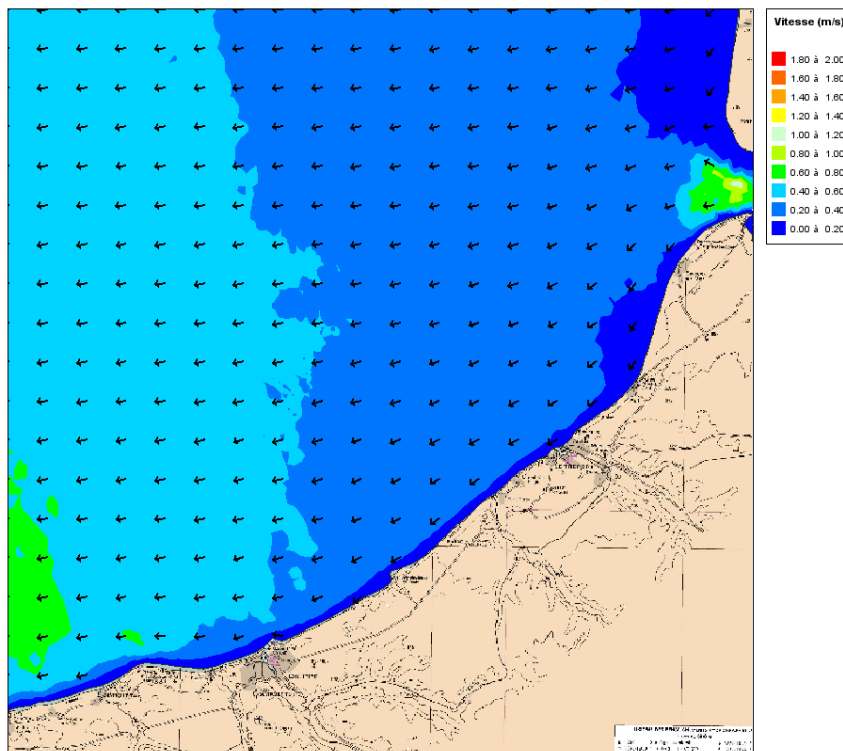
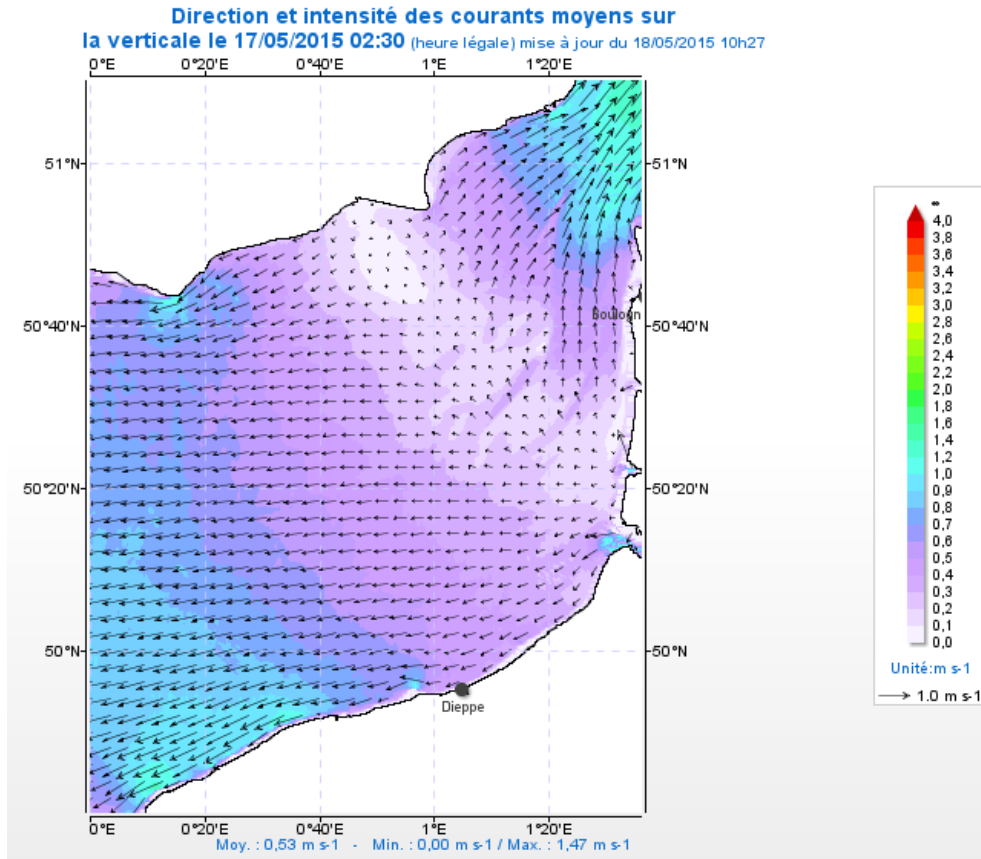




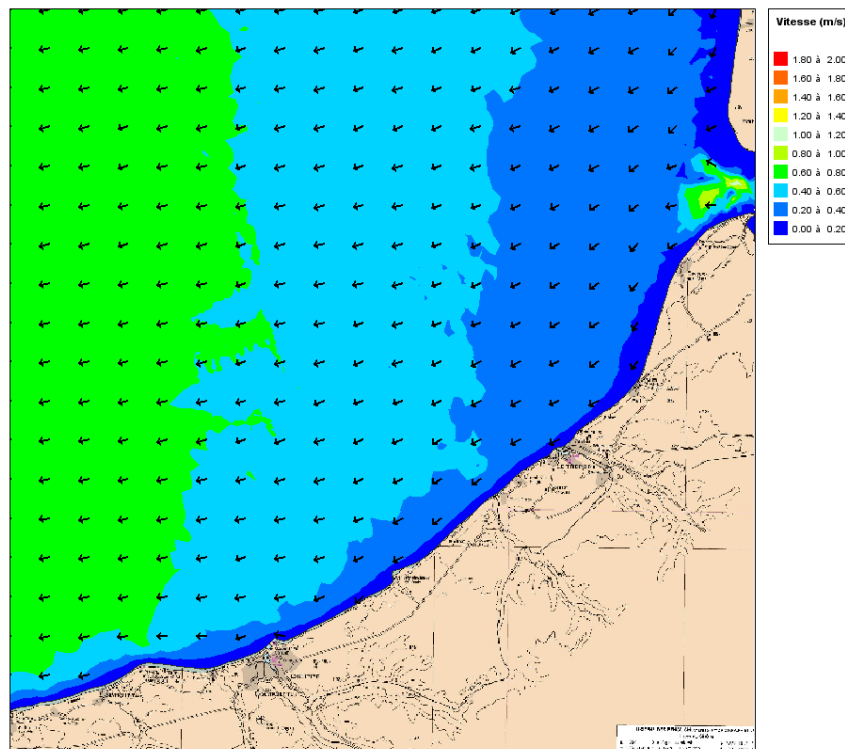
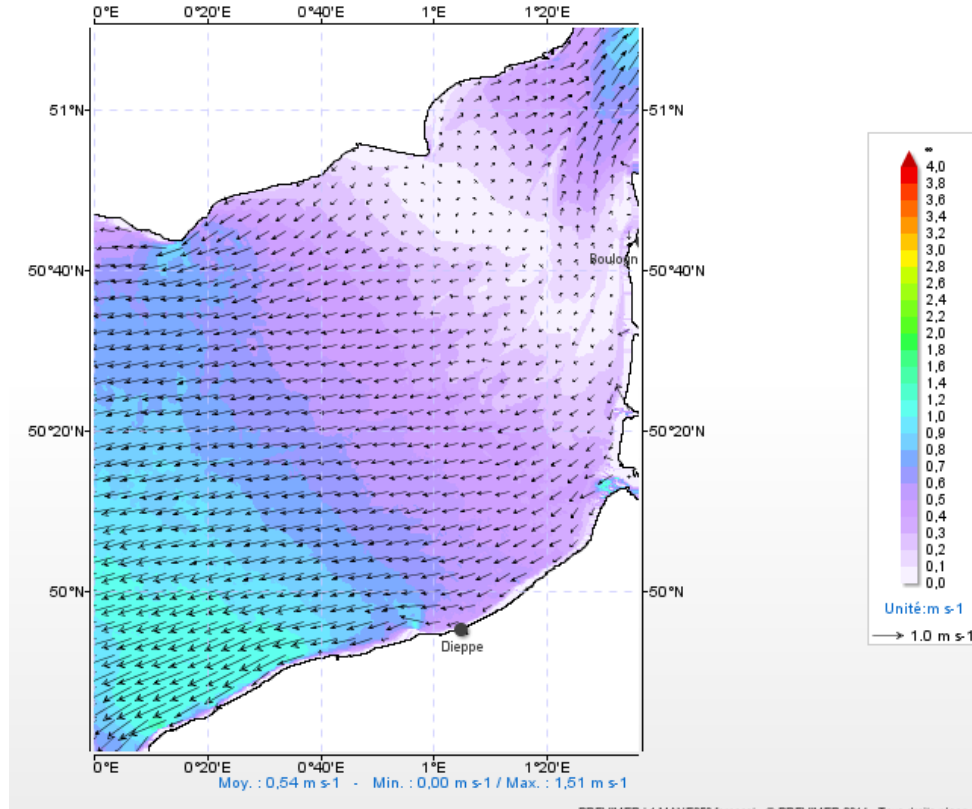


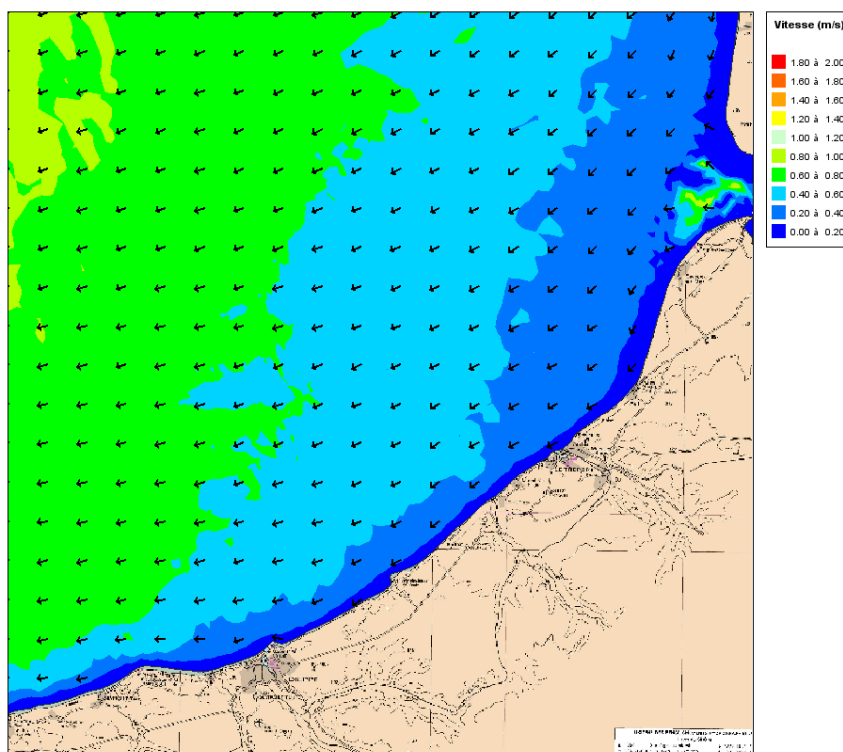
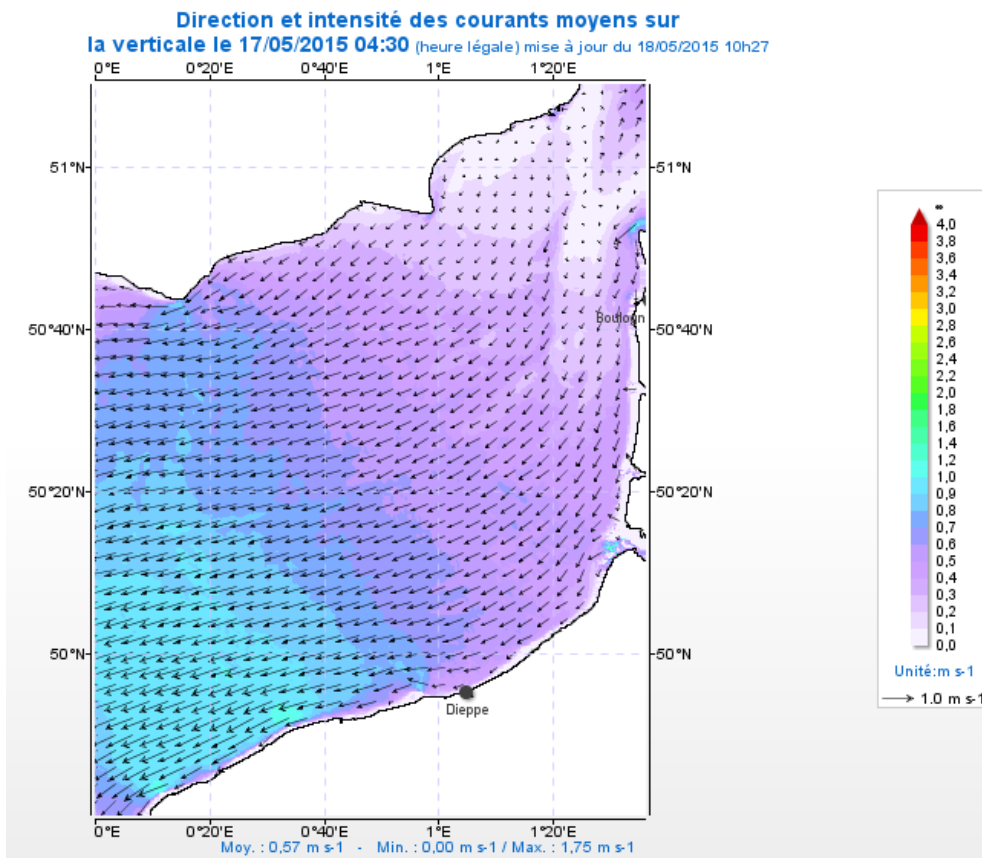
Direction et intensité des courants moyens sur la verticale le 17/05/2015 01:30 (heure légale) mise à jour du 17/05/2015 11h03



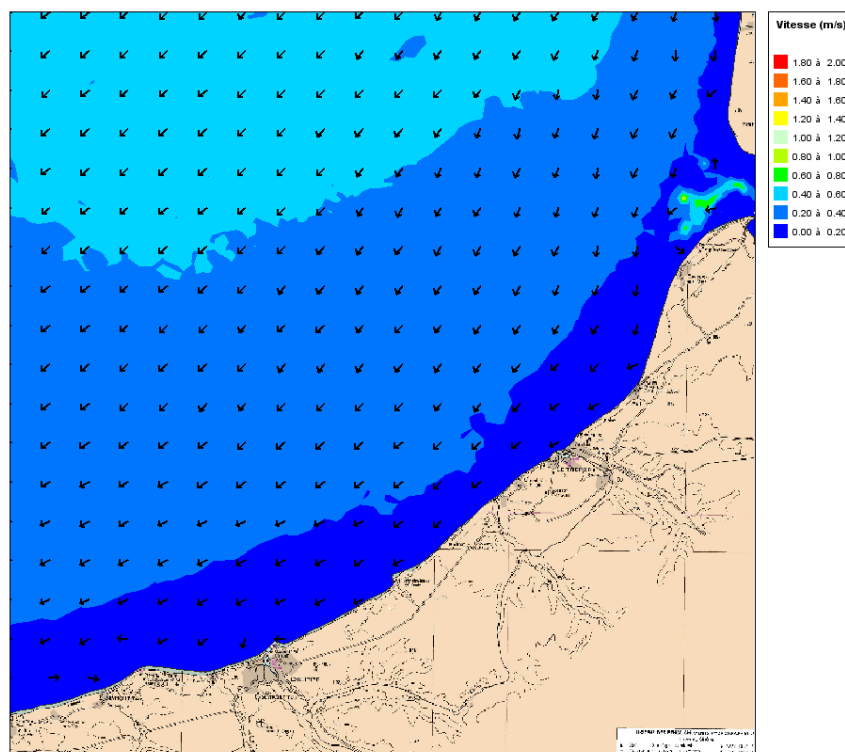
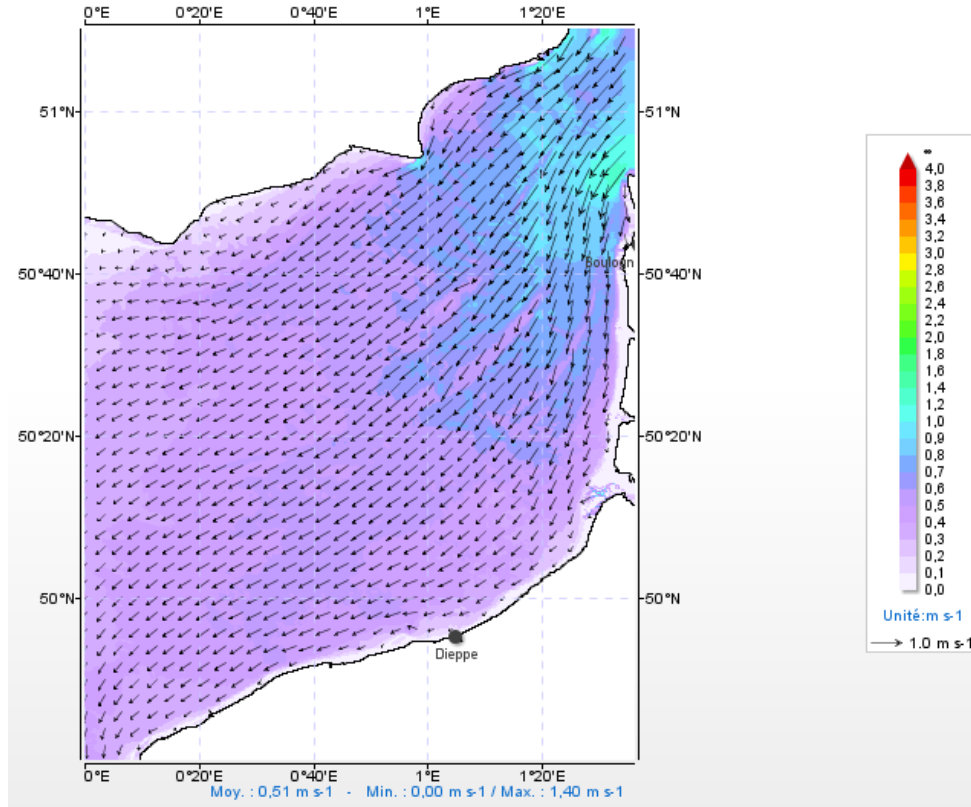


Direction et intensité des courants moyens sur la verticale le 17/05/2015 03:30 (heure légale) mise à jour du 18/05/2015 10h27



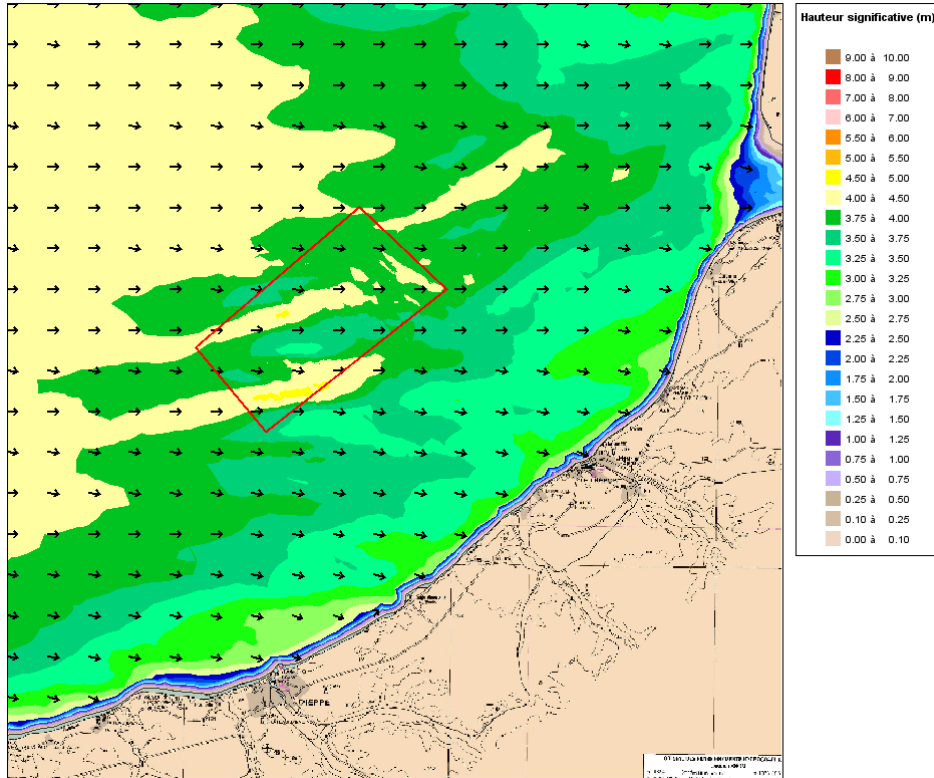


Direction et intensité des courants moyens sur la verticale le 17/05/2015 06:30 (heure légale) mise à jour du 18/05/2015 10h27

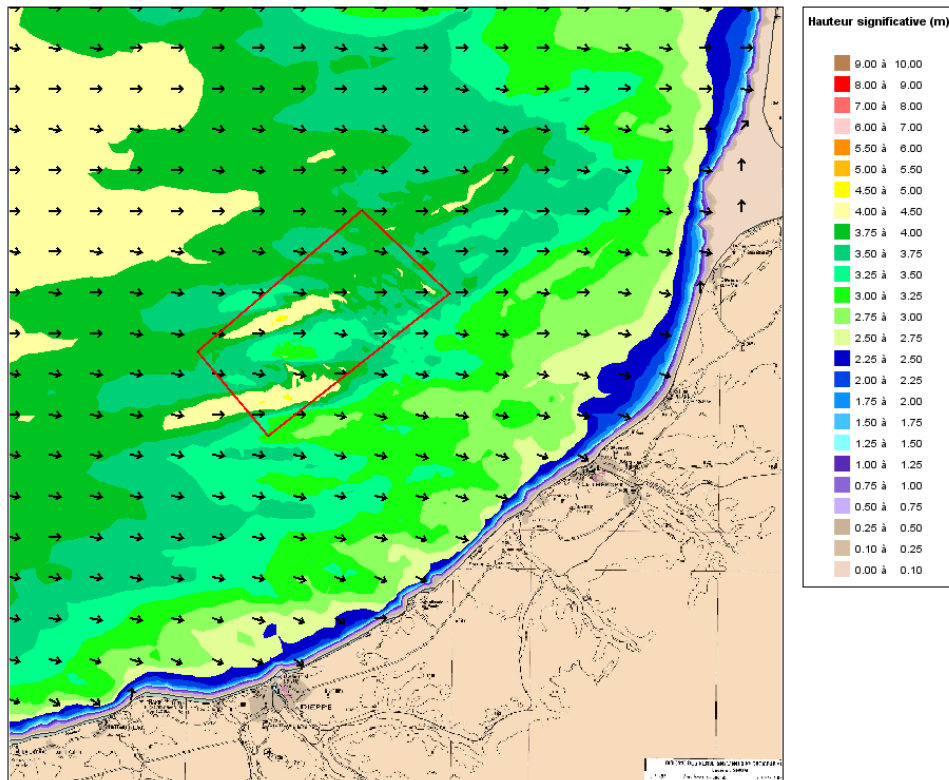


5.2 Annexe 2 : Propagation des houles de large à la côte – Résultats Tomawac – Etat initial

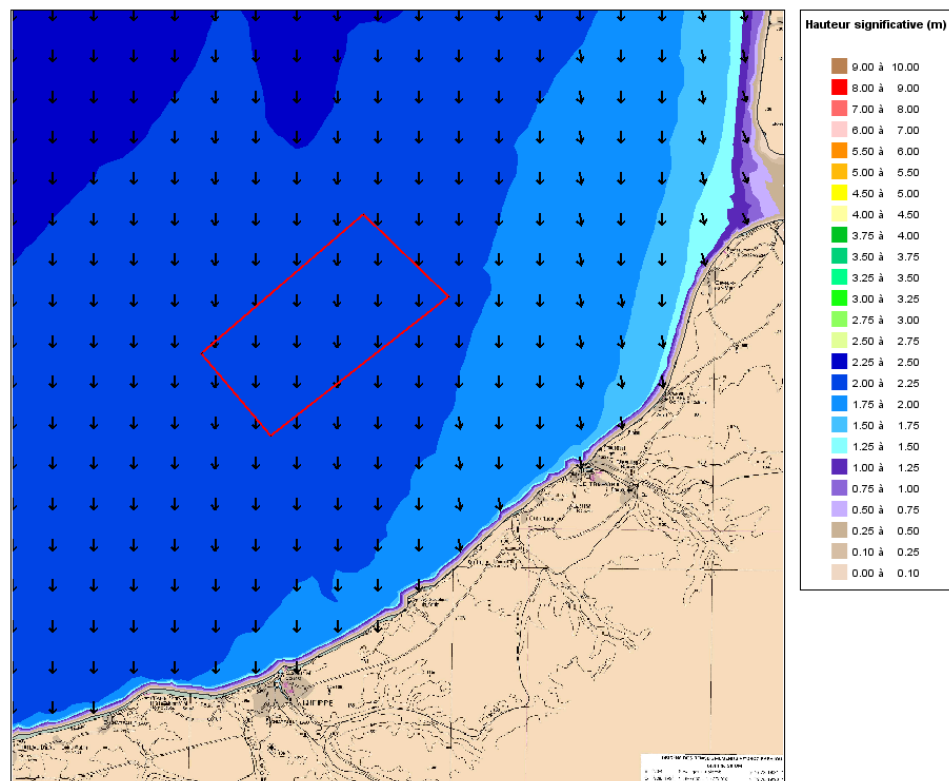
Tempête Ruzica pour une pleine mer à l'état initial



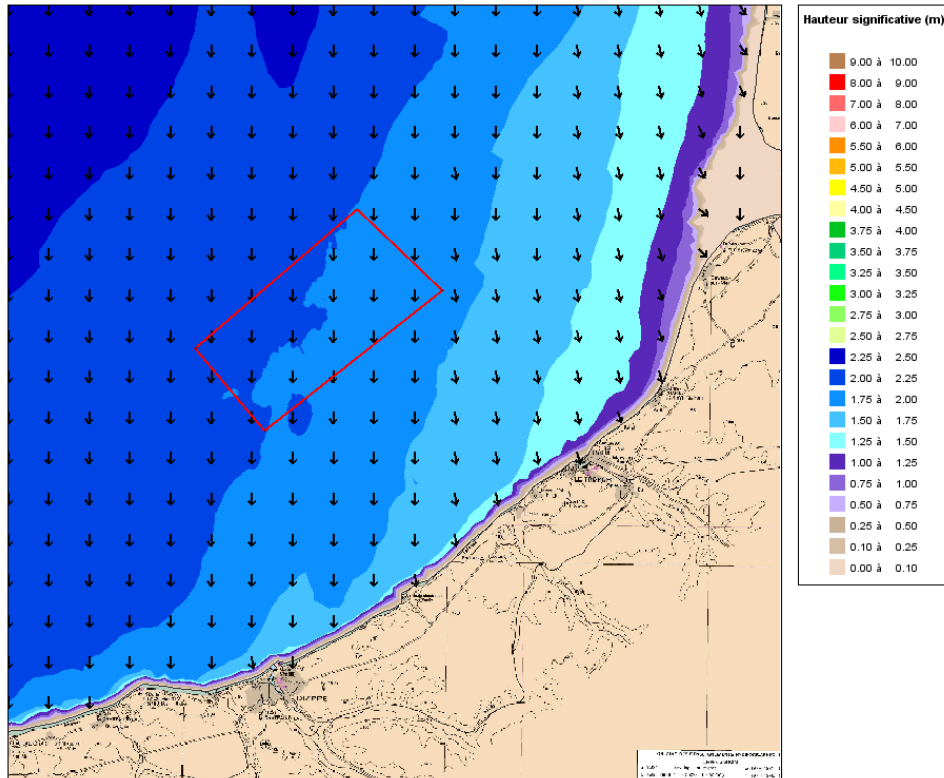
Tempête Ruzica pour une basse mer à l'état initial



Evènement Nord pour une pleine mer à l'état initial

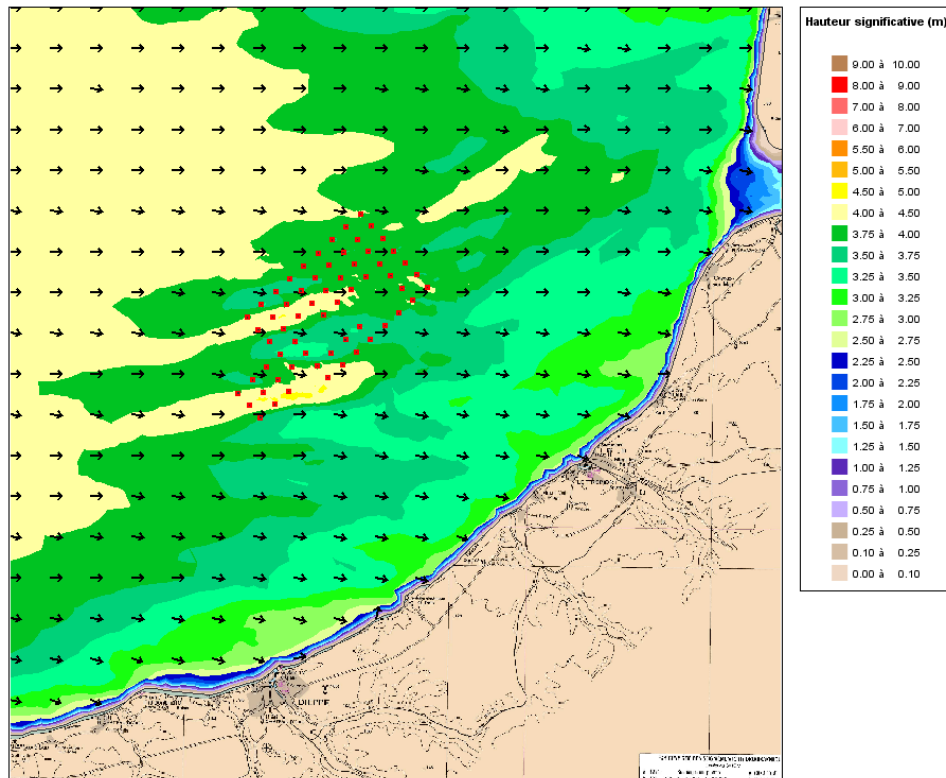


Evènement Nord pour une basse mer à l'état initial

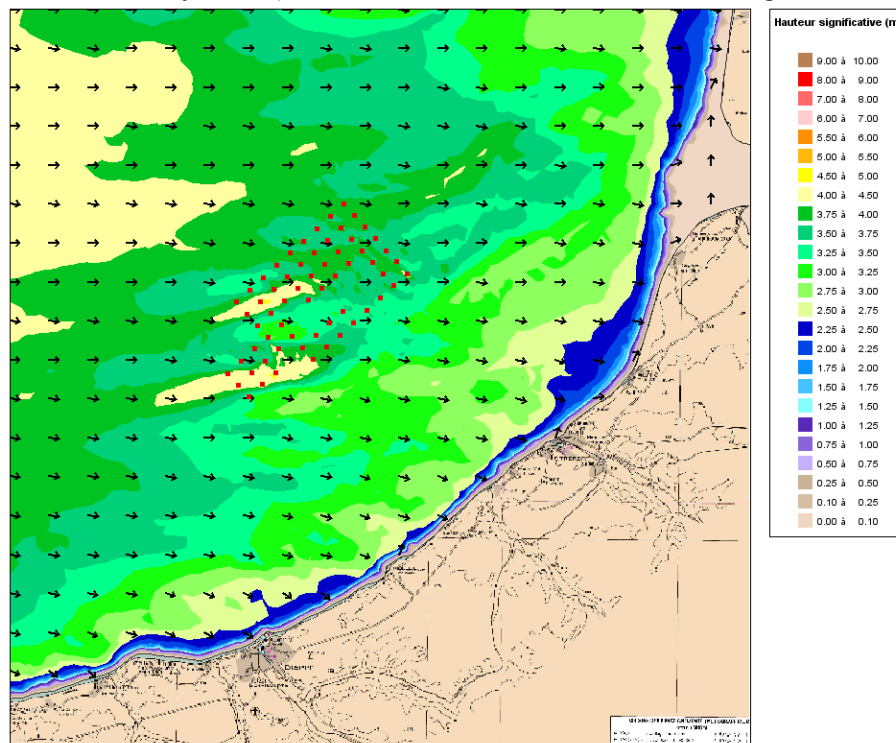


5.3 Annexe 3 : Propagation des houles du large à la côte – Résultats Tomawac – Etat aménagé

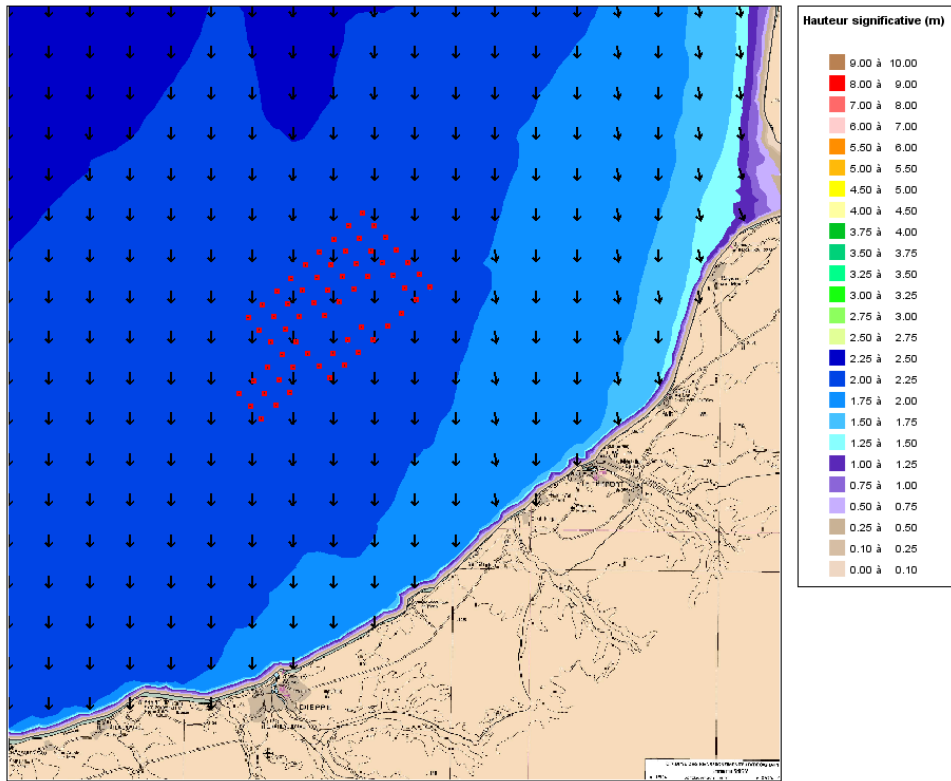
Tempête Ruzica fondation jacket pour une pleine mer à l'état aménagé



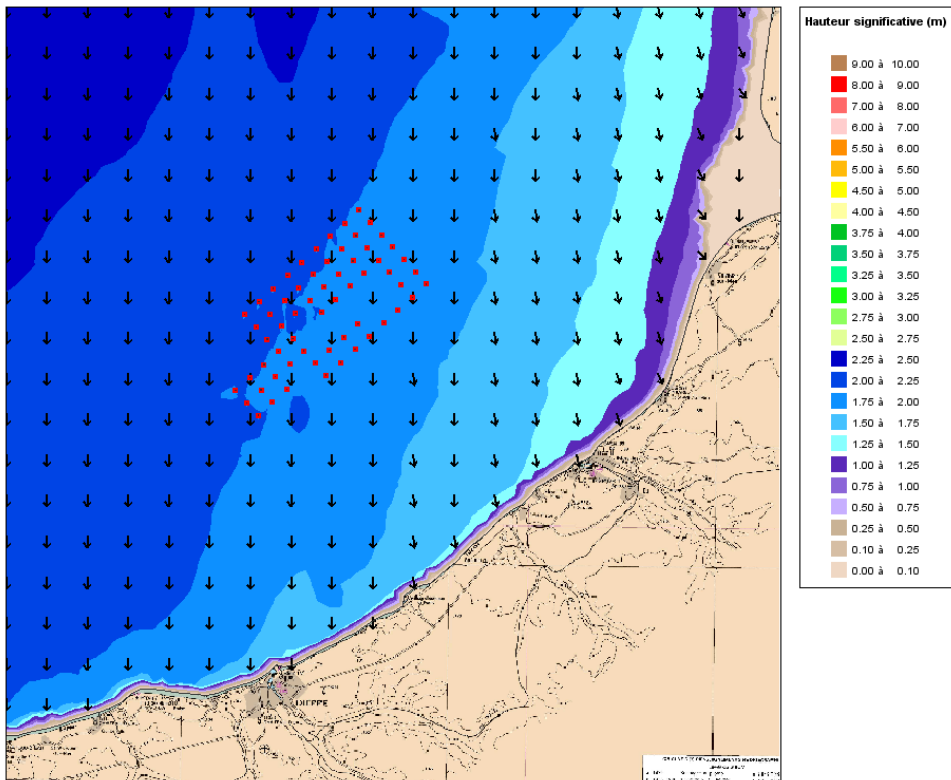
Tempête Ruzica fondation jacket pour une basse mer à l'état aménagé



Evènement Nord fondation jacket pour une pleine mer à l'état aménagé

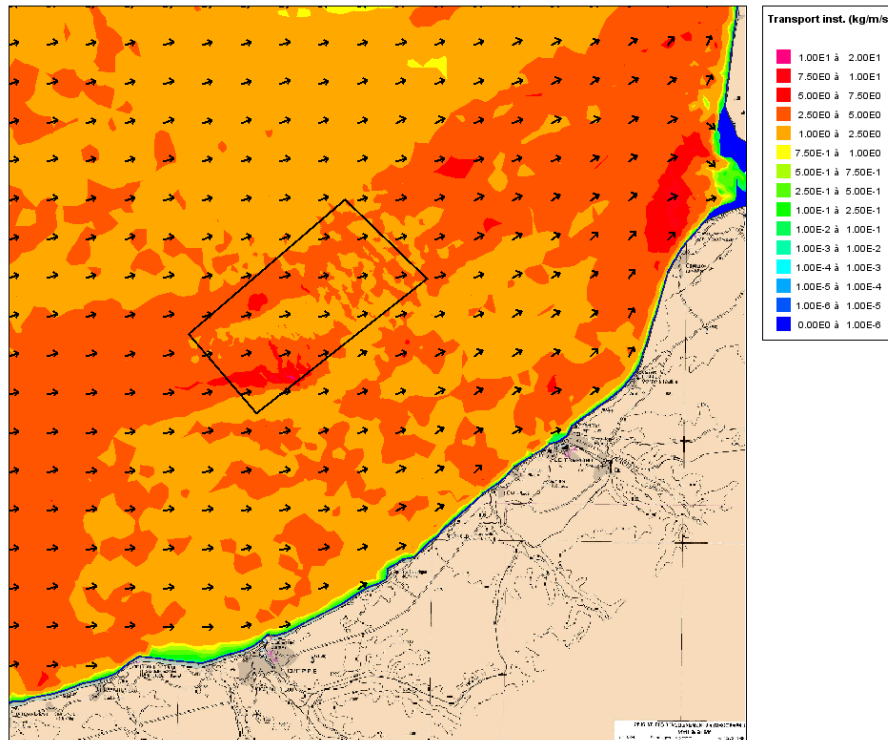


Evènement Nord fondation jacket pour une basse mer à l'état aménagé

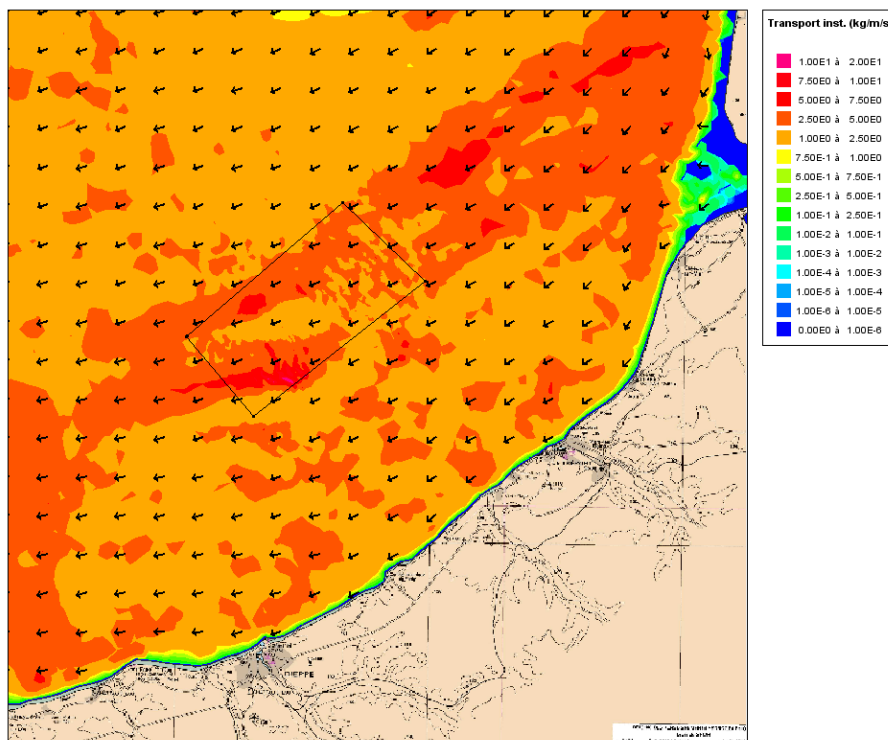


5.4 Annexe 4 : Modélisation des capacités de transport instantané – Granulométrie 500µM

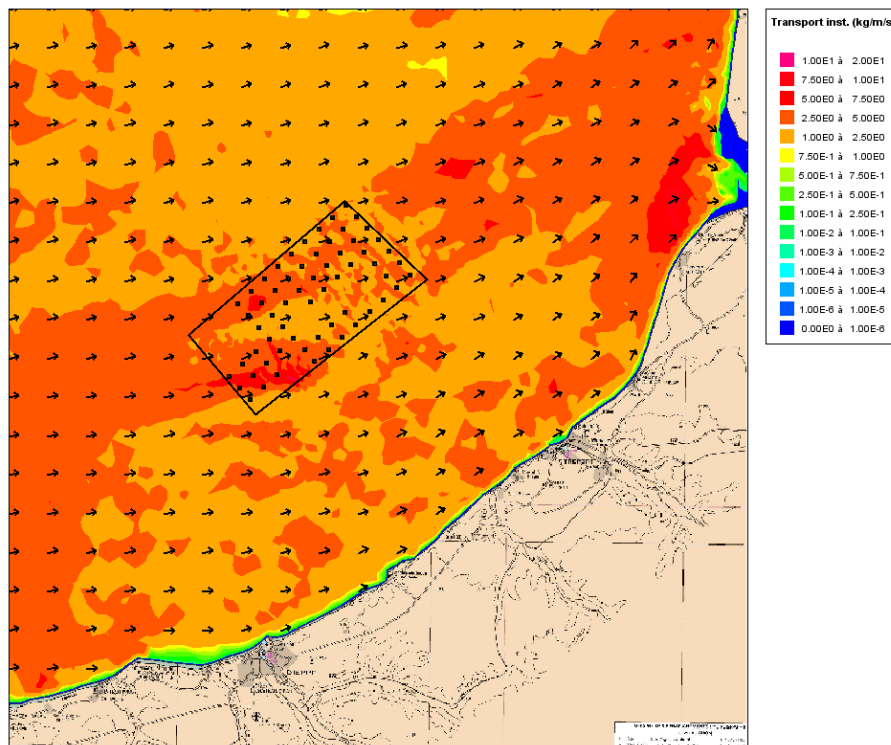
Transport instantané au maximum de flot durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 500µm – Etat initial



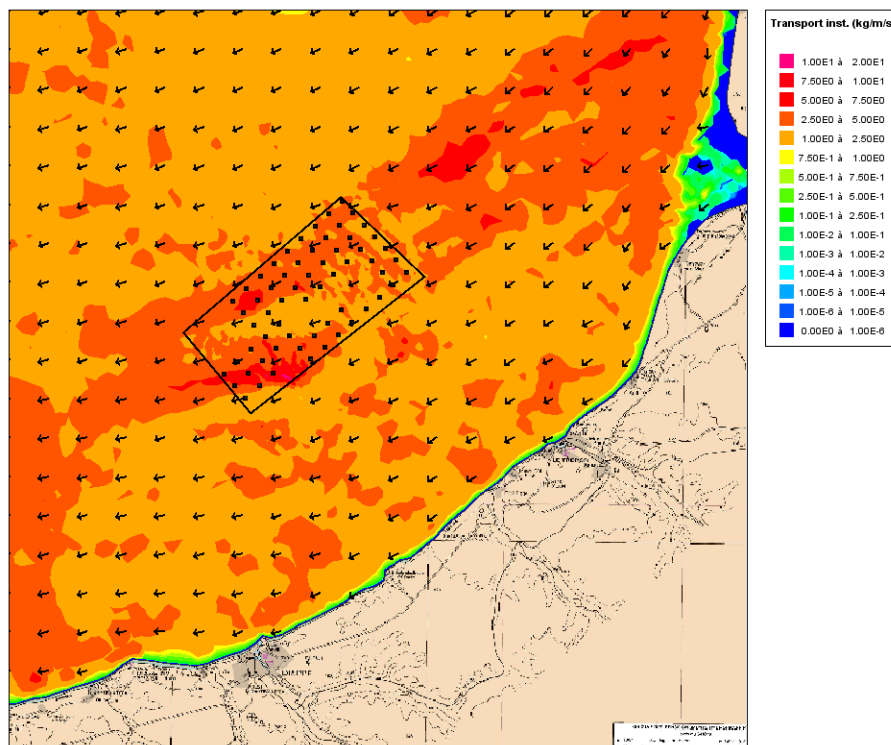
Transport instantané au maximum de jusant durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 500µm – Etat initial



Transport instantané au maximum de flot durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 500µm – Etat Aménagé - Jacket

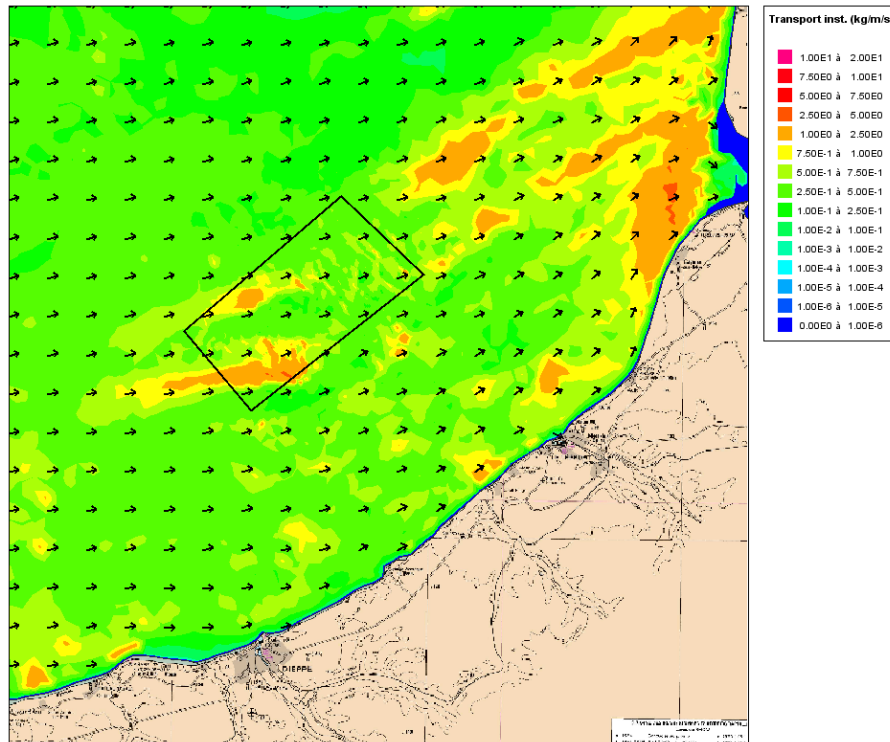


Transport instantané au maximum de jusant durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 500µm – Etat Aménagé - Jacket

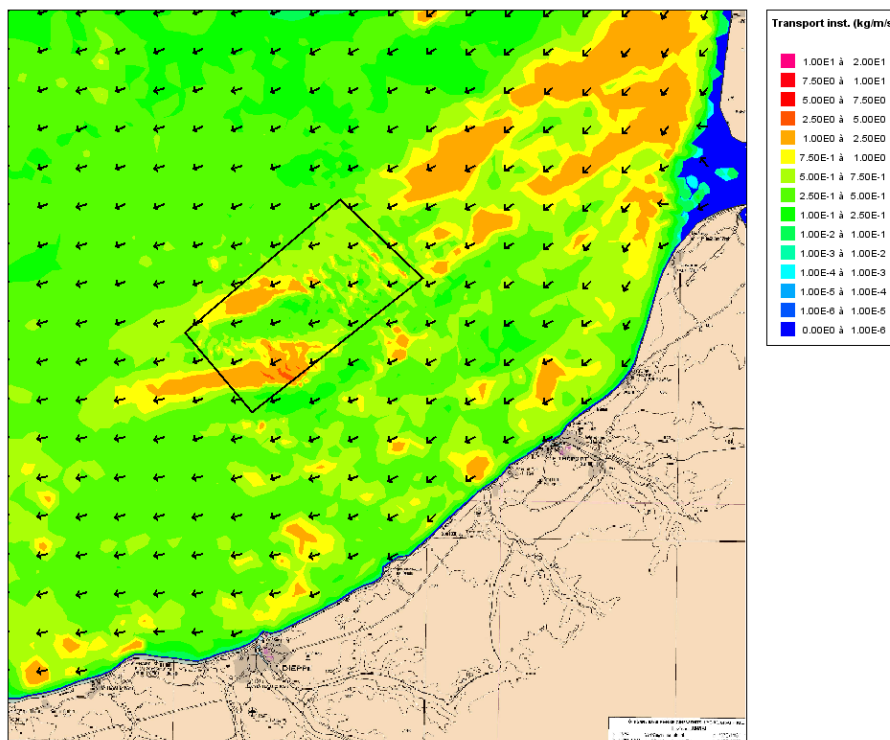


5.5 Annexe 5 : Modélisation des capacités de transport instantané – Granulométrie 2000 μ M

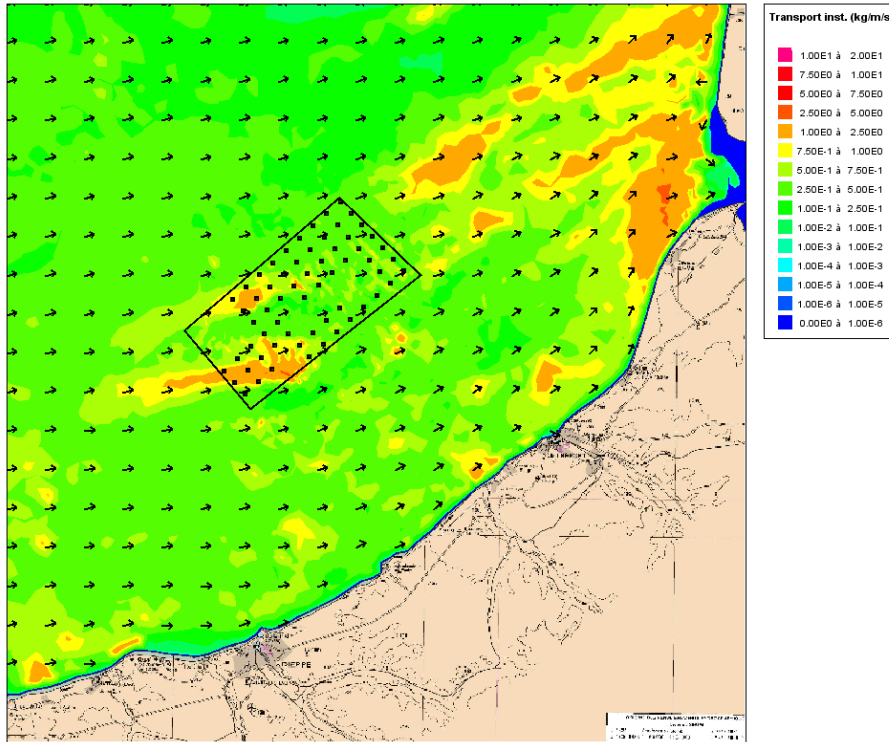
Transport instantané au maximum de flot durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 2000 μ m – Etat initial



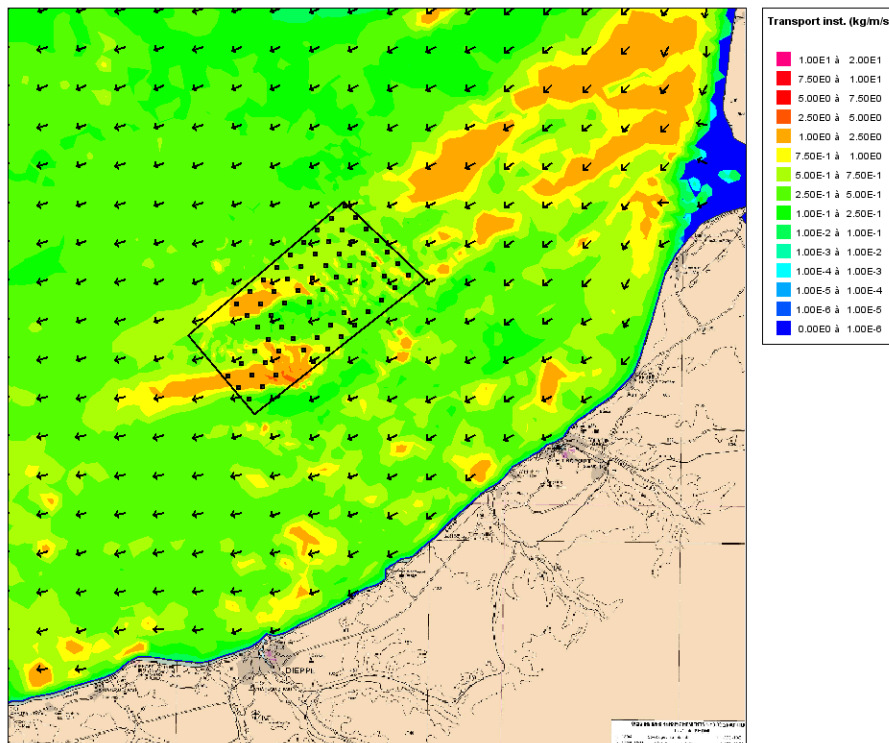
Transport instantané au maximum de jusant durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 2000 μ m – Etat initial



Transport instantané au maximum de flot durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 2000µm – Etat Aménagé - Jacket

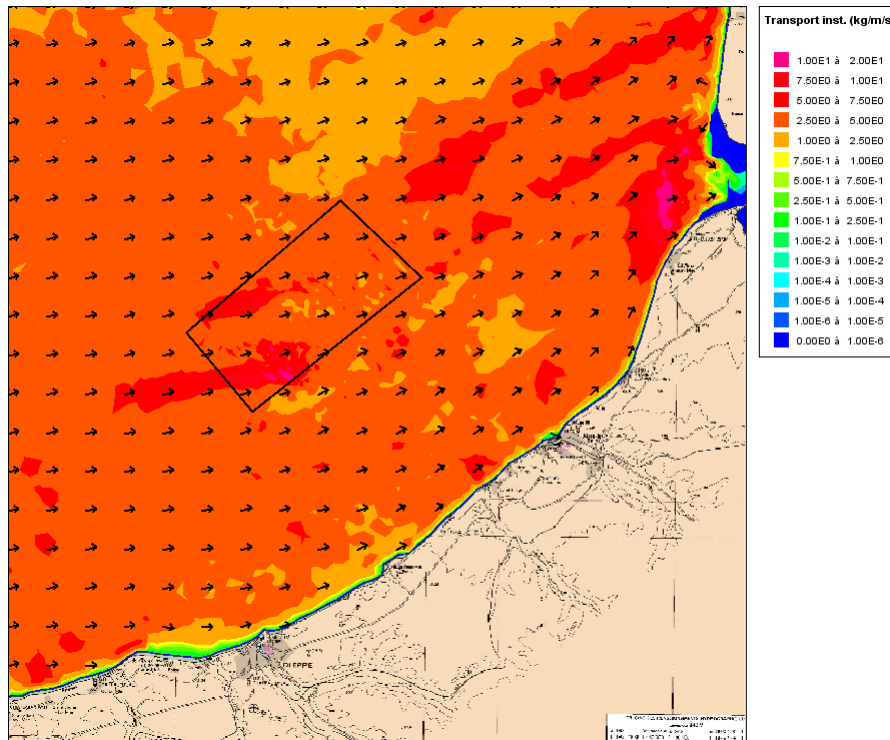


Transport instantané au maximum de jusant durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 2000µm – Etat Aménagé - Jacket

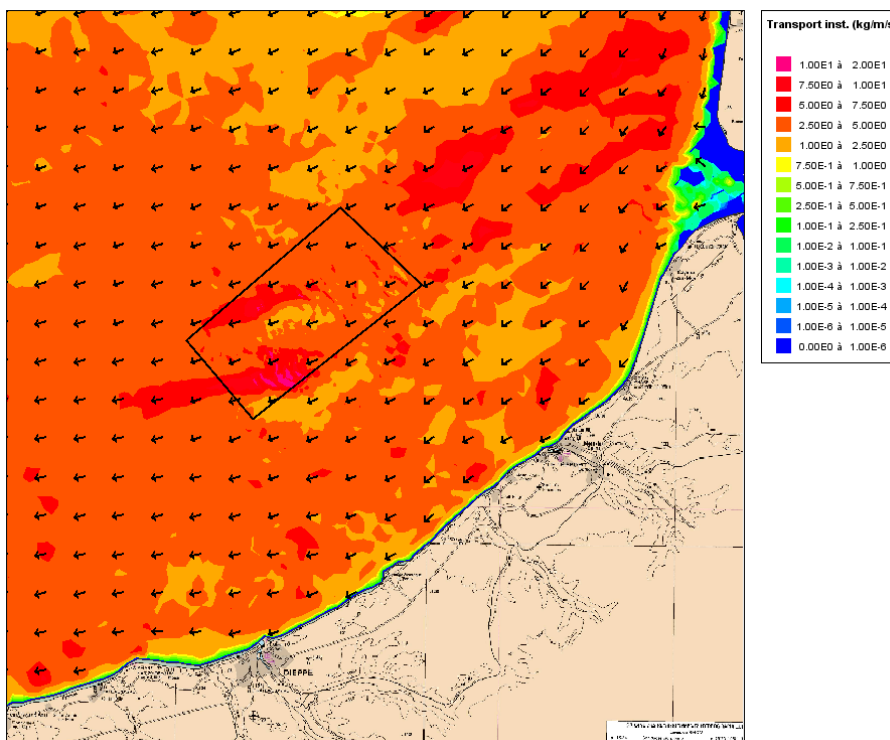


5.6 Annexe 6 : Modélisation des capacités de transport instantané – granulométrie 315µm

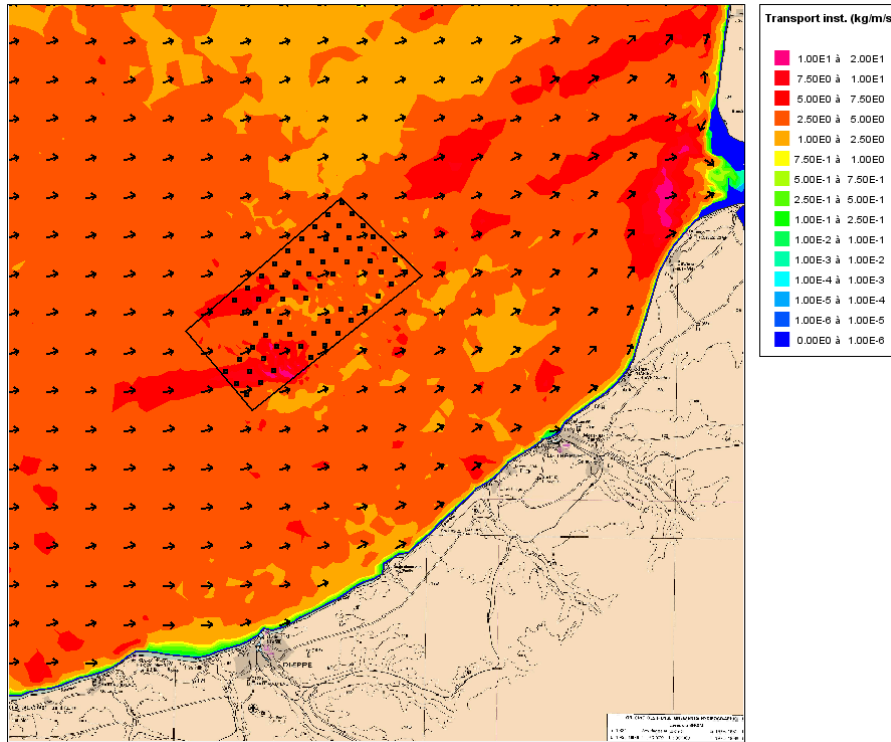
Transport instantané au maximum de flot durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 315µm – Etat initial



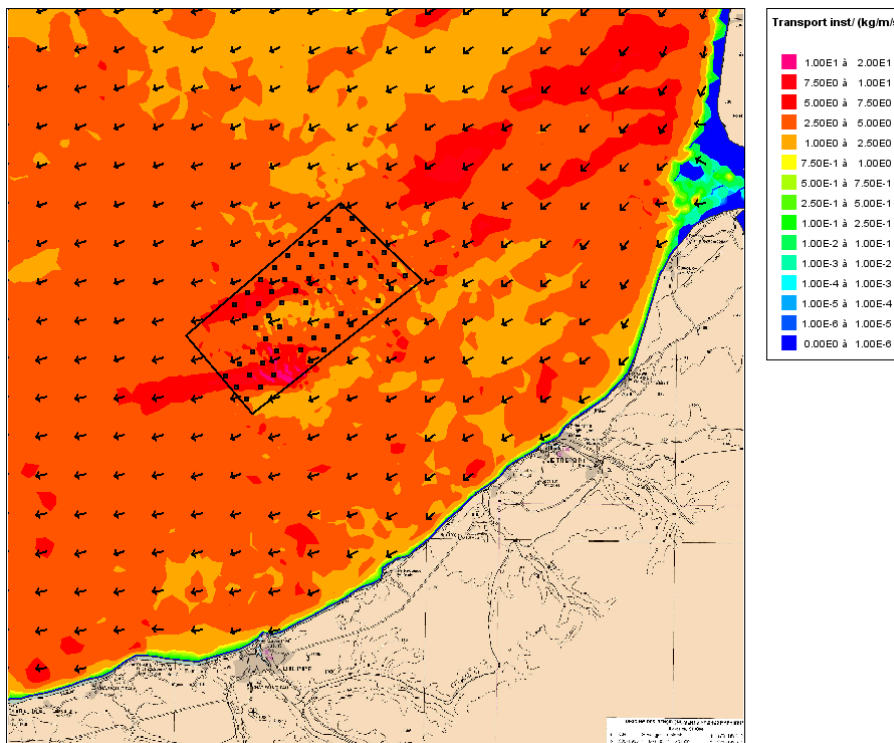
Transport instantané au maximum de jusant durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 315µm – Etat initial



Transport instantané au maximum de flot durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 315µm – Etat Aménagé - Jacket



Transport instantané au maximum de jusant durant une tempête de type Ruzica, pour une granulométrie de 315µm – Etat Aménagé - Jacket



5.7 Annexe 7 : Évolution du panache après la dispersion (1000m³) – Temps exprimé en heures à partir de la fin d'une opération– Éolienne 5

