



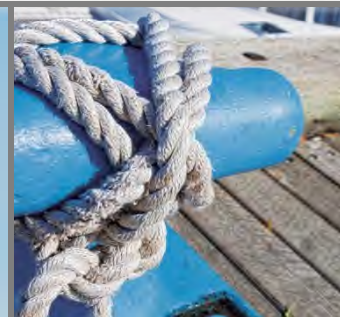
**TERMINAL DE CONTENEURS
EN EAU PROFONDE**

LAURENTIA

JUILLET 2020



**CONDITIONS CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES
PRÉSENTÉ À L'AGENCE D'ÉVALUATION D'IMPACT DU CANADA
(AÉIC)**





Préparé par : <original signed by>

Annie Bérubé
Professionnelle en environnement
Études environnementales et relations
avec les communautés

<original signed by>

Vérfié par :

Philippe Charest-Gélinas
Chargé de projet
Études environnementales et relations
avec les communautés

Registre des révisions et émissions		
N° de révision	Date	Description
0A	2020-03-17	Émission de la version préliminaire
0B	2020-06-16	Émission de la version préfinale
00	2020-07-08	Émission de la version finale

Propriété et confidentialité

« Ce document est destiné exclusivement aux fins qui y sont mentionnées. Toute utilisation du rapport doit prendre en considération l'objet et la portée du mandat en vertu duquel le rapport a été préparé ainsi que les limitations et conditions qui y sont spécifiées et l'état des connaissances scientifiques au moment de l'émission du rapport. Englobe Corp. ne fournit aucune garantie ni ne fait aucune représentation autre que celles expressément contenues dans le rapport.

Ce document est l'œuvre d'Englobe Corp. Toute reproduction, diffusion ou adaptation, partielle ou totale, est strictement prohibée sans avoir préalablement obtenu l'autorisation écrite d'Englobe et de son Client. Pour plus de certitude, l'utilisation d'extraits du rapport est strictement interdite sans l'autorisation écrite d'Englobe et de son Client, le rapport devant être lu et considéré dans sa forme intégrale.

Aucune information contenue dans ce rapport ne peut être utilisée par un tiers sans l'autorisation écrite d'Englobe et de son Client. Englobe Corp. se dégage de toute responsabilité pour toute reproduction, diffusion, adaptation ou utilisation non autorisée du rapport.

Si des essais ont été effectués, les résultats de ces essais ne sont valides que pour l'échantillon décrit dans le présent rapport.

Les sous-traitants d'Englobe qui auraient réalisé des travaux au chantier ou en laboratoire sont dûment évalués selon la procédure relative aux achats de notre système qualité. Pour toute information complémentaire ou de plus amples renseignements, veuillez communiquer avec votre chargé de projet. »

TABLE DES MATIÈRES

1	CONDITIONS CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES	1-1
1.1	Mise en contexte	1-1
1.2	Activités réalisées depuis le dépôt du document de réponses aux questions.....	1-1
1.3	Zone d'étude	1-2
1.4	Précisions sur l'état de référence.....	1-5
1.4.1	Méthodologie.....	1-5
1.4.1.1	Paramètres de modélisation	1-5
1.4.1.2	Outils de modélisation.....	1-12
1.4.2	État de référence.....	1-16
1.5	Évaluation des effets sur les conditions climatiques et météorologiques	1-17
1.5.1	Phase exploitation	1-17
1.5.1.1	Sources d'effets et effets négatifs potentiels.....	1-17
1.5.1.2	Mesures d'atténuation.....	1-17
1.5.1.3	Description détaillée de l'effet négatif résiduel.....	1-17
1.5.1.4	Évaluation de l'effet négatif résiduel	1-24
1.6	Évaluation des effets cumulatifs sur les conditions climatiques et météorologiques...	1-24
1.7	Surveillance et suivi environnemental.....	1-25
1.8	Références bibliographiques.....	1-27

Carte

Carte 1-1	Zones d'étude.....	1-3
-----------	--------------------	-----

Tableau

Tableau 1-1	Scénarios modélisés	1-11
-------------	---------------------------	------

Figure

Figure 1-1	Étendue du domaine, incluant la zone d'intérêt et la zone éloignée (WSP, 2020).....	1-7
Figure 1-2	Plan des aménagements projetés du secteur de Beauport du port de Québec.....	1-8
Figure 1-3	Rose des vents à la station Beauport de 2003 à 2020 (données retenues uniquement de mai à novembre entre 6 h et 20 h) (WSP, 2020)	1-10
Figure 1-4	Provenance des trois directions de vents étudiés (WSP, 2020).....	1-11
Figure 1-5	Modélisation du régime des vents en provenance de l'ENE à 4 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)	1-19
Figure 1-6	Modélisation du régime des vents en provenance de l'ENE à 10 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)	1-19
Figure 1-7	Modélisation du régime des vents en provenance de l'OSO à 4 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)	1-20
Figure 1-8	Modélisation du régime des vents en provenance de l'OSO à 10 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)	1-20
Figure 1-9	Modélisation du régime des vents en provenance de l'ONO à 4 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)	1-21
Figure 1-10	Modélisation du régime des vents en provenance de l'ONO à 10 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)	1-21
Figure 1-11	Résultats de turbulence pour le scénario de vent de l'OSO en conditions actuelles (A) et en phase d'exploitation (B) (WSP, 2020).....	1-22
Figure 1-12	Résultats de turbulence pour le scénario de vent de l'ONO en conditions actuelles (A) et en phase d'exploitation (B) (WSP, 2020).....	1-23

Annexes

Annexe A	Étude sur modèle numérique des impacts éoliens (WSP, 2020)
Annexe B	Rapport technique – Nouvelles variantes d'aménagement des plages (Lasalle NHC, 2016b)

CONDITIONS CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES

N° DES QUESTIONS DE L'ACÉE	QUESTION	SECTION OÙ TROUVER LA RÉPONSE
ACÉE 93a	Expliquer et valider le choix du logiciel en fournissant, entre autres, des références quant au logiciel utilisé et à des études similaires qui ont utilisé ce même logiciel.	Section 1.4.1.2
ACÉE 93b	Expliquer et justifier les méthodes numériques utilisées.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94a	Fournir l'étude de vent réalisée pour les autres variantes de projet (rapport de Lasalle, 2016).	Section 1.4.1 + annexe A
ACÉE 94b	Définir les termes « zone d'intérêt » et « zone de champ lointain » utilisés à la page 7 du rapport de WSP (2018) – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.1
ACÉE 94c	Spécifier à quelles faces on fait référence à la page 7 du rapport de WSP (2018) – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94d	Préciser comment « La sortie et les côtés du domaine sont prolongés d'une distance suffisante pour que les gradients aux limites soient minimes et que le taux de blocage soit maintenu aussi bas que possible » - Voir Annexe III. <ul style="list-style-type: none"> • Fournir des références afin de justifier ce choix. • Spécifier si une étude de sensibilité a été effectuée. • Justifier le choix d'utiliser une superficie du domaine inférieure à celle utilisée dans l'étude de Lasalle 2014 (Lasalle, 2014). • Spécifier si l'expression « La sortie et les côtés du domaine sont prolongés d'une distance suffisante », signifie qu'on étende sur une distance suffisante. 	Section 1.4.1.1
ACÉE 94e	Justifier le choix des valeurs d'entrée choisies pour la vitesse et la turbulence des vents. – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94f	Clarifier si l'équation pour $u(z)$ inclut le plan de vitesse nulle (« zero-plane displacement ») – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94g	Expliquer comment l'utilisation de données de vents basées sur une statistique annuelle plutôt que sur la période de mai à octobre permet d'évaluer les effets du projet sur les activités de kitesurf et de planche à voile – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.1
ACÉE 94h	Justifier le choix des valeurs d'entrée choisies pour la fréquence d'occurrence des vents – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.1
ACÉE 94i	Justifier la résolution du maillage utilisé et expliquer comment le promoteur s'est assuré qu'elle soit suffisante. Spécifier si une étude de sensibilité quant au maillage utilisé a été effectuée – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94j	Documenter les critères utilisés pour affirmer que les calculs itératifs ont convergé – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94k	Justifier le choix du modèle de turbulence pour les méthodes RANS utilisé – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94l	Fournir une description du comment « Des conditions frontières atmosphériques sont appliquées à l'entrée du modèle en prenant compte un profil logarithmique, dont la forme est ajustée en fonction des conditions du site en amont. » - Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94m	Évaluer et cartographier les différences de conditions de turbulences obtenues entre les cas actuels et projetés pour des directions OSO et ONO – Voir Annexe III.	Section 1.5.1.3
ACÉE 94n	Indiquer, à où pertinent, les directions de vent associées aux impacts appréhendés énumérés – Voir Annexe III.	Section 1.5
ACÉE 94o	Fournir une ou des figures qui indiquent clairement la localisation de la plage actuelle, dans l'étude de WSP 2018, afin de pouvoir comprendre les résultats de la modélisation. – Voir Annexe III.	Section 1.5.1.3
ACÉE 94p	Justifier l'utilisation de données de vent de la station de l'Aéroport Jean-Lesage plutôt que celles de la station de Beauport.	Section 1.4.1.1

CONDITIONS CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES (suite)

N° DES QUESTIONS DE L'ACÉE	QUESTION	SECTION OÙ TROUVER LA RÉPONSE
Commentaire 21	<p>Le paragraphe suivant explique les références de base appuyant l'analyse effectuée par Environnement et Changement climatique Canada (ECCC) sur la modélisation numérique des impacts éoliens et s'applique aux deux questions concernant la modélisation.</p> <p>La simulation d'écoulements des fluides à l'aide de méthodes CFD (Computational fluid dynamics) devrait s'effectuer suivant certaines directives afin qu'un examen de l'incertitude numérique associée puisse être effectué. De telles directives ont été publiées dans le Journal of Fluids Engineering en 1986, 1993 et 2008. Étant donné que l'énoncé de Freitas en 1993 est clairement élaboré selon une liste de critères, c'est à ce document qu'EEE se réfère.</p>	Feuille 01
CCM-1a	Fournir la référence LI et coll. (2018) au complet ainsi que d'autres références associées au nouveau logiciel utilisé en 2020 et à des études similaires qui ont utilisé ce même logiciel.	Section 1.4.1.2
CCM-1b	Afin d'être en mesure d'examiner les résultats en toute confiance et d'apprécier les performances des différents logiciels, confirmer ou non la similarité des résultats entre les différents modèles pour la configuration actuelle du secteur Beauport. Dans la négative, veuillez justifier l'utilisation de logiciels différents entre les deux dernières modélisations.	Section 1.4.1.2
CCM-2a	Fournir le rapport sur l'étude de vent de Lasalle, 2016 (LASALLE, 2016a. Port de Québec. Extension du secteur de Beauport. Étude sur modèle numérique des impacts éoliens. Version finale révision 1, préparé pour l'Administration portuaire de Québec. 22 p. et annexes).	Section 1.4.1 + annexe A
CCM-3a	Indiquer à quelles faces réfère la phrase à la page 13 de l'Annexe d'Englobe 2020.	Section 1.4.1.2
CCM-4a	Veuillez tenir compte des précisions des travaux de Franke (2007) et Tominaga et coll. (2008) dans la justification de l'extension horizontale du domaine dans la version finale du feuillet.	Section 1.4.1.1
CCM-4b	Veuillez préciser l'extension verticale du domaine utilisée et indiquer si elle est en accord avec ces deux études. Dans la négative, veuillez expliquer pourquoi.	Section 1.4.1.1
CCM-5a	Justifier le choix des valeurs d'entrées pour la vitesse et la turbulence des vents et indiquer plus en détail comment ont été choisies ces valeurs notamment en illustrant à l'aide d'un exemple.	Section 1.4.1.2
CCM-6a	Corriger le texte afin de tenir compte de l'énergie cinétique de turbulence au lieu du vent à la page 1-15 dans la version finale du feuillet.	Section 1.5.1.3
CCM-6a	Fournir la définition du paramètre c de la formule visant à estimer la probabilité de Weibull apparaissant à la page 1-8.	Section 1.4.1.1
CCM-6b	Modifier l'équation déterminant les valeurs de turbulence à la page 1-12 du feuillet afin de tenir compte du paramètre k au lieu de k (κ).	Section 1.4.1.2
CCM-6c	Éclaircir la contradiction concernant la turbulence au sud-est de la plage pour la direction OSO du vent entre le texte de la page 23 et le tableau 5.1 (page 26) de l'Annexe A. Veuillez justifier comment le vent dissipé par les nouveaux bâtiments pourrait expliquer une diminution de la turbulence au sud-est de la plage.	Section 1.5.1.3; annexe A
CCM-6d	Inclure une légende lisible pour la figure 4.1 (page 17) de l'Annexe A.	Annexe A

1 CONDITIONS CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES

1.1 MISE EN CONTEXTE

En mai 2019, l'Administration portuaire de Québec (APQ) a conclu un accord commercial à long terme avec Hutchison Ports et la Compagnie des chemins de fer nationaux du Canada (le CN) en vue de la construction et de l'exploitation du nouveau terminal de conteneurs en eau profonde qui sera aménagé dans le secteur de Beauport (projet Laurentia). Cet accord et l'étroite collaboration entre les partenaires ont permis de préciser la configuration détaillée des installations nécessaires à l'exploitation d'un terminal à la fine pointe de la technologie.

Dans le contexte du processus d'évaluation environnementale en cours, l'objectif de ce document est donc de fournir à l'Agence d'évaluation d'impact du Canada (AÉIC)¹ des renseignements suffisamment détaillés pour qu'elle puisse poursuivre l'analyse des effets du projet Laurentia sur les conditions climatiques et météorologiques. En se basant à la fois sur les questions et les commentaires reçus de l'AÉIC (9 et 23 août 2019), ainsi que sur les précisions et les améliorations proposées au projet Laurentia (voir le livrable *Description des optimisations au projet Laurentia et effets anticipés*), ce document est structuré de manière à respecter les différentes étapes du processus d'évaluation environnementale pour une composante environnementale spécifique :

- ▶ Les activités réalisées depuis le dépôt du document de réponses aux questions;
- ▶ Les précisions à l'état de référence;
- ▶ L'évaluation des effets sur les conditions climatiques et météorologiques;
- ▶ L'évaluation des effets cumulatifs;
- ▶ La surveillance environnementale;
- ▶ Le suivi environnemental;
- ▶ La compensation, si requis.

Le document de réponses spécifique aux conditions climatiques et météorologiques s'inscrit donc dans la continuité du processus en cours d'évaluation environnementale par l'AÉIC ainsi que des efforts de l'APQ et de ses partenaires pour proposer un projet intégré qui tient compte de l'évolution des connaissances et des préoccupations recueillies auprès des différentes parties prenantes rencontrées depuis avril 2018.

Enfin, un tableau est, lorsque requis, inséré au début de chacune des sections par souci de clarté et pour faciliter le repérage des réponses formulées.

1.2 ACTIVITÉS RÉALISÉES DEPUIS LE DÉPÔT DU DOCUMENT DE RÉPONSES AUX QUESTIONS

Depuis le dépôt à l'AÉIC du document de réponses aux questions le 30 avril 2018 (Englobe, 2018), certaines activités spécifiques aux conditions climatiques et météorologiques ont été réalisées dans le contexte du projet Laurentia. Une mise à jour de l'étude de modélisation du régime des vents produite par WSP en 2018 a été effectuée (WSP, 2020; annexe A). Cette activité visant à documenter

¹ Anciennement nommée l'Agence canadienne d'évaluation environnementale (ACÉE).

spécifiquement les conditions climatiques et météorologiques prend en considération les changements apportés au projet Laurentia.

Les objectifs poursuivis par cette activité complémentaire étaient les suivants :

- ▶ Obtenir un niveau suffisant de connaissances afin d'évaluer les effets sur les conditions climatiques et météorologiques découlant de l'optimisation du projet Laurentia;
- ▶ Répondre à certaines questions posées par l'AÉIC dans sa seconde série transmise en deux parties les 9 et 23 août 2019.

1.3 ZONE D'ÉTUDE

Les cinq zones d'étude définies pour évaluer les effets du projet Beauport 2020 (zone de chantier, zone d'étude, zone d'étude élargie, zone du bassin atmosphérique et zone des limites administratives de l'APQ) sont toujours applicables au projet Laurentia. Parmi ces zones d'étude, celle qui a été retenue pour les conditions climatiques et météorologiques est la zone du bassin atmosphérique (ZBA) (carte 1-1).

Rappelons que les limites de cette zone permettent de décrire et d'évaluer spécifiquement les effets du projet sur la qualité de l'air, incluant les conditions climatiques et météorologiques. Le rayon de 6 km (diamètre de 12 km) a été déterminé en tenant compte de la portée spatiale des effets anticipés du projet Laurentia, mais également des préoccupations soulevées au cours des dernières années par les résidents à proximité. À cet égard, il importait que la pointe sud de l'île d'Orléans (Sainte-Pétronille) soit incluse dans la ZBA, ce qui a largement contribué à établir la limite de cette zone. Sa forme circulaire est justifiée par le comportement des masses d'air et des modèles de dispersion utilisés pour modéliser les effets du projet sur la qualité d'air à partir de sources d'émission ponctuelles.

1.4 PRÉCISIONS SUR L'ÉTAT DE RÉFÉRENCE

L'état de référence relatif aux conditions climatiques et météorologiques présenté dans le document de réponses aux questions et aux commentaires de l'AEIC déposé le 30 avril 2018 est toujours valable. À la suite de certaines activités complémentaires, quelques précisions sont nécessaires pour bonifier l'état actuel des connaissances. Ces précisions sont résumées ci-après, ce qui permet d'éviter de reproduire l'état de référence dans sa totalité.

1.4.1 Méthodologie

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94a	Fournir l'étude de vent réalisée pour les autres variantes de projet (rapport de Lasalle, 2016).	Section 1.4.1 + annexe A
CCM-2a	Fournir le rapport sur l'étude de vent de Lasalle, 2016	Section 1.4.1 + annexe A

Rappelons que deux études de vent portant sur un terminal de vrac et incluant le brise-lames et la recharge de plage ont été réalisées par Lasalle (2014 et 2016a), alors que WSP (2018) a produit la modélisation des vents relativement à la configuration précédente du terminal de conteneurs et qui a été transmise à l'AEIC le 30 avril 2018. L'étude produite par Lasalle (2016a) est annexée à l'étude de WSP fournie à l'annexe A. Une étude portant spécifiquement sur le réaménagement de la plage a également été produite en 2016 (Lasalle | NHC, 2016b; annexe B)

Afin d'évaluer les effets du projet sur le régime des vents dans la configuration du projet Laurentia, la modélisation a été mise à jour (WSP, 2020). Elle vise à répondre aux questions de l'AEIC, ainsi qu'aux préoccupations soulevées par le Forum des usagers de la baie de Beauport (FUBB) dans le cadre des consultations tenues en continu depuis 2016 avec ce groupe.

1.4.1.1 Paramètres de modélisation

Domaine d'étude

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94b	Définir les termes « zone d'intérêt » et « zone de champ lointain » utilisés à la page 7 du rapport de WSP (2018) – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.1
ACÉE 94d	Préciser comment « La sortie et les côtés du domaine sont prolongés d'une distance suffisante pour que les gradients aux limites soient minimes et que le taux de blocage soit maintenu aussi bas que possible » - Voir Annexe III. <ul style="list-style-type: none"> Fournir des références afin de justifier ce choix. Spécifier si une étude de sensibilité a été effectuée. Justifier le choix d'utiliser une superficie du domaine inférieure à celle utilisée dans l'étude de Lasalle 2014 (Lasalle, 2014). Spécifier si l'expression « La sortie et les côtés du domaine sont prolongés d'une distance suffisante », signifie qu'on étende sur une distance suffisante.	Section 1.4.1.1
CCM-4a	Veillez tenir compte des précisions des travaux de Franke (2007) et Tominaga (2008) dans la justification de l'extension horizontale du domaine dans la version finale du feuillet	Section 1.4.1.1
CCM-4b	Veillez préciser l'extension verticale du domaine utilisée et indiquer si elle est en accord avec ces deux études. Dans la négative, veuillez expliquer pourquoi	Section 1.4.1.1

Le domaine modélisé s'étend sur environ 8 km dans toutes les directions à partir du centre du port (superficie totale de 16 km sur 16 km). Il comporte les mêmes frontières que le domaine modélisé dans l'étude précédente (WSP, 2018) (figure 1-1). **Cette zone permet de tenir compte des structures topographiques principales qui forment les corridors de vent, dont la vallée de la rivière Saint-Charles et différentes branches du fleuve Saint-Laurent.** Il s'agit de la « zone de champ lointain » qui se situe autour du site du port et qui inclut des particularités topographiques pouvant potentiellement influencer l'écoulement du vent à l'intérieur de la zone d'intérêt.

Le domaine modélisé comporte une « zone d'intérêt » qui correspond à un rayon de 2 000 m centré sur le futur terminal Laurentia (figure 1-1). Il s'agit de la zone qui subira des modifications en ce qui a trait à la topographie et qui comprend les aires de navigation de plaisance où les vents sont susceptibles d'être affectés significativement par la présence des infrastructures prévues. Les bâtiments et la topographie de cette zone ont été modélisés explicitement, alors que les obstructions du reste du domaine modélisé ont été prises en compte en utilisant un modèle mathématique assignant une valeur de rugosité en fonction du type de terrain.

Les frontières du modèle sont significativement plus grandes que les distances de blocage des bâtiments d'intérêt. En effet, le *European Cooperation in Science and Technology* (COST) (Franke, 2007) suggère une distance minimale de 10 fois la hauteur du plus haut bâtiment étudié. L'Architectural Institute of Japan (AIJ, Tominaga et coll., 2008) recommande une distance de 5 fois la hauteur. Le domaine modélisé offre des distances de l'ordre de 186 fois la taille des bâtiments d'intérêt (16 km / 86 m de hauteur), en considérant que les plus hauts sont les grues-portiques (86 m), les navires (30 m par rapport à la surface du quai) et les empilements de conteneurs (18 m).

Tous les bâtiments et infrastructures en élévation qui se trouvent à moins d'une distance de $10H_n$ ont été représentés dans le modèle numérique. En fait, toutes les structures imposantes présentes sur les terrains du port de Québec, qui couvrent une distance de plus de 1 km vers l'ouest à partir de l'extrémité du terminal existant, ont été représentées. Puisque tous les bâtiments existants et projetés ne dépassent pas une hauteur de 86 m et puisque ceux-ci ont été inclus dans le modèle numérique de terrain, le modèle utilisé respecte les recommandations de Franke (2007) et de Tominaga et coll. (2008).

Le domaine modélisé est centré sur la baie de Beauport et couvre une distance de 16 km dans l'axe du fleuve Saint-Laurent et une distance de 16 km perpendiculaire à cet axe. Le domaine inclut tous les principaux éléments topographiques qui peuvent influencer la distribution des vents, tel que le fleuve Saint-Laurent, ses embranchements et ses falaises escarpées, l'île d'Orléans, les vallées des principales rivières, dont la Saint-Charles qui se déversent dans le port. La topographie dans le domaine s'élève jusqu'à une élévation maximale de l'ordre de 100 m et donc l'influence des falaises peut être sentie sur environ 1 km selon Franke (2007) et Tominaga et coll. (2008), ce qui est respecté avec cette configuration du domaine.

En altitude, le modèle s'étend sur une hauteur de $4,5 H_n$ au-dessus de la plus haute structure (avec $H_n = 86$ m). Puisque seulement quelques structures ouvertes ont une hauteur de 86 m (grues) par rapport à la majorité des bâtiments et des empilements de conteneurs qui ont moins de 20 m de haut, on peut considérer que le blocage au niveau de la plus haute structure est faible. Franke (2007) indique que dans de telles conditions, une hauteur de $4 H_n$ est suffisante.



Figure 1-1 Étendue du domaine, incluant la zone d'intérêt et la zone éloignée (WSP, 2020)

Modèle numérique de terrain

Le modèle numérique de terrain a été construit en utilisant :

- ▶ les cartes numériques de la Ville de Québec et ses environs, incluant la ville de Lévis (1 : 20000, isobathes aux 10 m) afin de représenter la topographie générale des zones du domaine les plus éloignées du port;
- ▶ le relevé LiDAR fourni par la Ville de Québec;
- ▶ les fichiers AutoCAD des plans fournis par l'APQ des installations existantes, spécifiant la hauteur de chaque bâtiment ou réservoir;
- ▶ les fichiers AutoCAD des plans fournis par l'APQ de l'aménagement projeté (version 158100307-VR-001-Laurentia_200204.dwg).

Le modèle numérique de terrain prend en compte la topographie générale et les larges objets (édifices, réservoirs, piles de vrac, conteneurs, etc.) qui pourraient avoir un effet sur le vent. Les objets plus petits, comme la fourniture des rues et les petits équipements, ne sont pas pris en compte.

La figure 1-2 présente le plan des aménagements projetés pour le secteur de Beauport du port de Québec. Les encadrés rouges illustrent la localisation de la Baie de Beauport ainsi que le nouveau quai projeté, incluant les installations portuaires requises s'y rattachant. La hauteur des installations prises en compte dans le modèle est détaillée dans l'étude de WSP (2020) à l'annexe A.

Les bâtiments environnants ont également été inclus pour tenir compte de la perturbation qu'ils ont sur le flux d'air en amont du site. Le niveau de détails des caractéristiques de ces bâtiments est réduit plus la distance par rapport au site d'intérêt augmente.

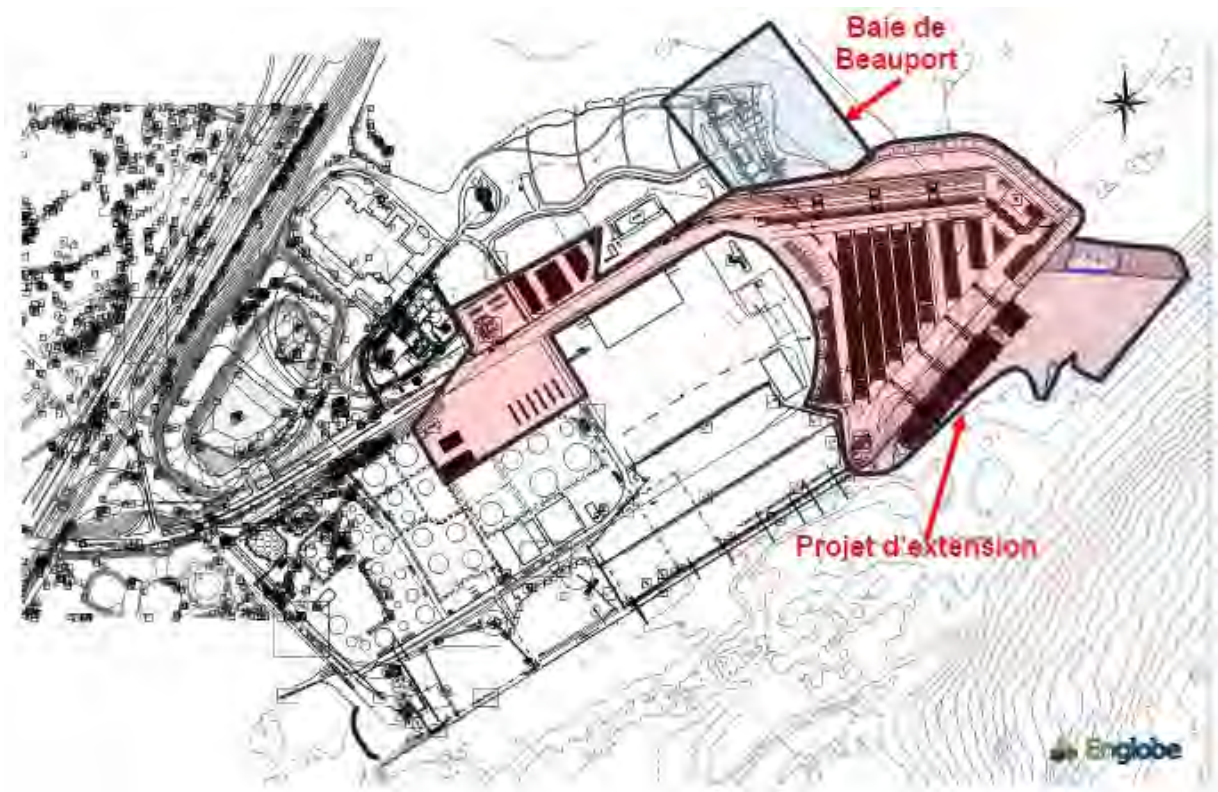


Figure 1-2 Plan des aménagements projetés du secteur de Beauport du port de Québec

Scénario de modélisation

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94g	Expliquer comment l'utilisation de données de vents basées sur une statistique annuelle plutôt que sur la période de mai à octobre permet d'évaluer les effets du projet sur les activités de kitesurf et de planche à voile – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.1
ACÉE 94p	Justifier l'utilisation de données de vent de la station de l'Aéroport Jean-Lesage plutôt que celles de la station de Beauport.	Section 1.4.1.1
CCM-6a	Fournir la définition du paramètre c de la formule visant à estimer la probabilité de Weibull apparaissant à la page 1-8.	Section 1.4.1.1

Les scénarios de modélisation ont été ajustés de manière à répondre aux préoccupations des usagers de la baie de Beauport formulées par le FUBB lors de diverses rencontres. **Les données horaires de la station de Beauport de 2003 à 2020** ont été utilisées dans le cadre de cette étude. La station de Beauport possède plus de 17 années de suivi, ce qui en fait une série suffisamment longue et plus représentative des changements récents du climat. Il est également plus pertinent d'utiliser des mesures de vents le plus près possible de la zone d'intérêt. Afin de déterminer les effets du projet sur les activités aquatiques, la présente étude a été effectuée en prenant uniquement les données de vents pour la période d'utilisation du plan d'eau, **soit entre mai et novembre**, et les conditions des vents durant le jour (6 h à 20 h).

Des méthodes d'estimation du maximum de vraisemblance ont été utilisées pour ajuster les données à une distribution de probabilité de Weibull à deux paramètres, à savoir :

$$P(U) = pe^{-\frac{U}{c}k}$$

où les coefficients p , c et k sont respectivement la probabilité de la direction du vent à subvenir, le paramètre de dispersion et le paramètre de forme. À partir de cette analyse statistique, il a été possible de déterminer la probabilité qu'un seuil de vitesse ($V = 4$ m/s, 10 m/s) soit dépassé.

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94h	Justifier le choix des valeurs d'entrée choisies pour la fréquence d'occurrence des vents – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.1

Les données recueillies à la station de Beauport mettent en évidence deux provenances de vents prédominants, soit les vents du secteur ouest-sud-ouest (OSO), qui ont une fréquence de 39 % du temps, alors que le vent provenant du secteur est-nord-est (ENE) a une prévalence de 27 % du temps. La figure 1-3 illustre la rose des vents utilisée dans la précédente étude pour extraire les statistiques de vent.

Des vents 8 et 15 noeuds (4 à 8 m/s) sont jugés intéressants pour la planche à voile (AKVQ, 2017 et validation en décembre 2019). En période estivale, les débutants peuvent profiter du plan d'eau dès que les vents sont supérieurs à 4 m/s. Des vents d'intensité supérieure sont intéressants pour les plus expérimentés, à partir de 8 m/s, mais idéalement plus élevés. Des intensités de vent de 4 m/s et de 10 m/s à une élévation de référence de 2 m au-dessus du niveau d'eau ont donc été retenues pour les différents scénarios de modélisation. Notons que les simulations effectuées dans l'étude de WSP (2018) considéraient uniquement une vitesse arbitraire de 10 m/s à une hauteur de 10 m du sol.

Les vents les plus intéressants pour les véliplanchistes et *kitesurfers* proviennent de l'ouest-nord-ouest (ONO) et de l'ENE. L'intensité et la stabilité des vents de l'OSO sont, en conditions existantes, déjà

jugées par les utilisateurs comme étant affectées par les bâtiments et autres infrastructures du port. De plus, les vents du SE seraient de peu d'intérêt, en raison de leur faible intensité. Les vents provenant de l'ONO, dont la fréquence d'occurrence est de 12 %, ont aussi été analysés. Ces secteurs incluent les directions avoisinantes, par exemple, la direction OSO couvre les résultats des directions allant du sud-ouest à l'ouest. La figure 1-4 illustre les trois directions de vent par rapport au domaine d'étude.

Ainsi, 12 scénarios ont été simulés, soit en conditions actuelles et en conditions futures. Ils sont résumés au tableau 1-1. Il est important de noter que la géométrie future inclut la présence d'un navire amarré afin de représenter le scénario engendrant la modification la plus importante en ce qui concerne le régime des vents.

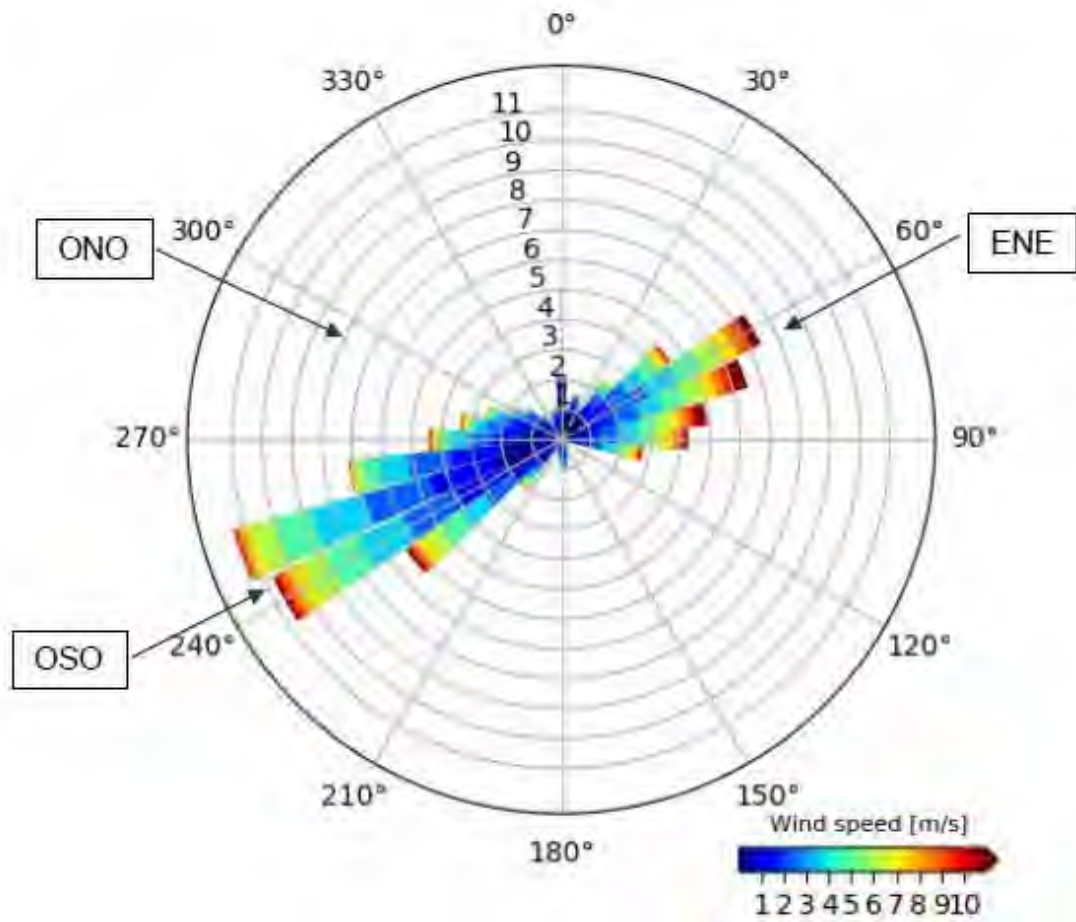


Figure 1-3 Rose des vents à la station Beauport de 2003 à 2020 (données retenues uniquement de mai à novembre entre 6 h et 20 h) (WSP, 2020)



Figure 1-4 Provenance des trois directions de vents étudiés (WSP, 2020)

Tableau 1-1 Scénarios modélisés

SCÉNARIO	VITESSE DU VENT (M/S)	AMÉNAGEMENT	DIRECTION DU VENT	NIVEAU D'EAU
1	4	Existant	ENE (67°)	BMIMM (Basse mer inférieure de marée moyenne)
2			OSO (247,5°)	
3			ONO (292,5°)	
4		Proposé	ENE (67°)	
5			OSO (247,5)	
6			ONO (292,5)	
7	10	Existant	ENE (67°)	
8			OSO (247,5°)	
9			ONO (292,5°)	
10		Proposé	ENE (67°)	
11			OSO (247,5°)	
12			ONO (292,5°)	

1.4.1.2 Outils de modélisation

Logiciel

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 93a	Expliquer et valider le choix du logiciel en fournissant, entre autres, des références quant au logiciel utilisé et à des études similaires qui ont utilisé ce même logiciel.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94l	Fournir une description du comment « Des conditions frontières atmosphériques sont appliquées à l'entrée du modèle en prenant compte un profil logarithmique, dont la forme est ajustée en fonction des conditions du site en amont. » - Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
CCM-1a	Fournir la référence Li et coll. (2018) au complet ainsi que d'autres références associées au nouveau logiciel utilisé en 2020 et à des études similaires qui ont utilisé ce même logiciel.	Section 1.4.1.2
CCM-1b	Afin d'être en mesure d'examiner les résultats en toute confiance et d'apprécier les performances des différents logiciels, confirmer ou non la similarité des résultats entre les différents modèles pour la configuration actuelle du secteur Beauport. Dans la négative, veuillez justifier l'utilisation de logiciels différents entre les deux dernières modélisations.	Section 1.4.1.2

Dans le cadre de l'étude réalisée en 2018, le logiciel Star-CCM+, un solveur CFD (« computational fluid dynamics ») général à volume fini qui est largement utilisé dans l'industrie et le monde universitaire, a été utilisé pour modéliser l'effet du projet sur le régime des vents². Ce logiciel est fréquemment cité dans la littérature, notamment pour des applications similaires nécessitant des calculs d'ingénierie éolienne (Jabayer et coll., 2018, Park et coll., 2017, Elshaer et coll., 2017). WSP UK a utilisé le logiciel Star-CCM+ pour plus de 50 projets d'ingénierie éolienne, dont le London Bridge Station, le projet 22 Bishopsgate, le projet Odense University Hospital et le Chelsea Stadium.

Cependant, pour les besoins de la mise à jour de l'étude, **le logiciel OpenFOAM (Engys version HelyxCORE-3.0.1), reconnu mondialement dans le domaine du CFD, a été retenu** (Li et coll., 2018). Ce modèle a été validé par WSP au cours des dernières années, notamment à l'aide d'essais en soufflerie, pour modéliser diverses conditions d'aérodynamisme externe, similaires à celles du projet Laurentia. Il a fait l'objet de nombreuses validations dans le domaine de la modélisation des environnements éoliens externes, tel que pour l'étude des bâtiments (Li *et al.*, 2018; Dadioti et Rees, 2015). D'autres références concernant le logiciel utilisé sont disponibles dans les articles du *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (p. ex. : <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167610512000475>). Des conditions frontières atmosphériques sont appliquées à l'entrée du modèle en prenant compte un profil logarithmique, dont la forme est ajustée en fonction des conditions du site en amont. Cette étape a été réalisée par analyse visuelle du terrain en amont afin d'obtenir une rugosité aérodynamique représentative qui a ensuite été utilisée dans la formulation ABL (*atmospheric boundary layer*) (2E).

Selon WSP, une analyse des résultats de modélisation en conditions existantes montre que les résultats sont très similaires, pour des conditions de vent équivalentes, entre les modèles STAR-CMM+ et OpenFOAM. Les motivations qui ont orienté le choix de poursuivre avec le logiciel OpenFOAM sont diverses : OpenFOAM est plus largement utilisé dans le monde et il est donc plus facile de trouver des professionnels qui connaissent le logiciel, son prix d'acquisition et de maintenance est plus faible et la littérature sur son utilisation est plus garnie. De plus, la satisfaction des résultats obtenus avec OpenFOAM dans de nombreux projets et la facilité d'utilisation du logiciel ont convaincu l'équipe de

² [En ligne] <https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software-part-4-comprehensive-cfd-software-packages>

délaisser STAR-CMM+ et de poursuivre avec OpenFOAM. En somme, WSP n'a pas abandonné le logiciel STAR-CMM+ pour des raisons de mauvaises performances ou encore de manque de fiabilité, mais préfère le modèle OpenFOAM pour les raisons évoquées plus haut. Les résultats présentés dans les deux études avec STAR-CMM+ et OpenFOAM sont toujours jugés de bonne qualité. Il est à noter que lors de la première étude du terminal Beauport 2020 (Lasalle, 2016a), le logiciel OpenFOAM avait été utilisé par le consultant Lasalle.

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 93b	Expliquer et justifier les méthodes numériques utilisées.	Section 1.4.1.2

En ce qui a trait aux méthodes numériques utilisées, pour l'étude précédente (WSP, 2018), le logiciel Star-CCM+ a été utilisé pour résoudre la forme numérique des équations de RANS en utilisant l'algorithme SIMPLE. La discrétisation spatiale était de second ordre en amont pour les termes convectifs et une méthode hybride Gauss/moindres carrés (Least Squares) a été utilisée pour les gradients secondaires. Cette méthode de discrétisation spatiale est conforme aux recommandations de la JFM Editorial Policy, ainsi qu'à la littérature spécifique au génie éolien (Blocken et coll., 2012, Tominaga et coll., 2008, Franke, 2007).

Les équations dans le modèle OpenFOAM sont moyennées dans le temps (*timeaveraged*) en utilisant la moyenne de Reynolds pour produire les équations de « Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ». La version RNG du modèle de fermeture k- ϵ a été utilisée en incluant les fonctions de paroi pour approximer le flux à proximité des murs des bâtiments.

Modèles de turbulence

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94e	Justifier le choix des valeurs d'entrée choisies pour la vitesse et la turbulence des vents. – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94k	Justifier le choix du modèle de turbulence pour les méthodes RANS utilisés – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
CCM-5a	Justifier le choix des valeurs d'entrées pour la vitesse et la turbulence des vents et indiquer plus en détail comment ont été choisies ces valeurs notamment en illustrant à l'aide d'exemple.	Section 1.4.1.2
CCM-6b	Modifier l'équation déterminant les valeurs de turbulence à la page 1-12 du feuillet afin de tenir compte du paramètre k au lieu de k (κ).	Section 1.4.1.2

Chaque simulation utilise des méthodes numériques pour résoudre les équations régissant la mécanique des fluides autour d'un site d'intérêt. Ces équations de Navier-Stokes sont un ensemble d'équations différentielles partielles décrivant la conservation de la masse et de la quantité de mouvement dans un fluide. Lorsque les champs moyens sont d'intérêt, ces équations peuvent être moyennées dans le temps en utilisant une méthode connue sous le nom des équations de « Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ». Ce sont les équations résolues pour la mise à jour des simulations (WSP, 2020). Dans les équations de RANS, l'instabilité du flux est modélisée à l'aide de relations mathématiques connues sous le nom de modèles de fermeture ou modèles de turbulence. Les modèles de turbulence sont considérés comme des approximations d'ingénierie, et comme toute hypothèse utilisée dans un modèle (physique ou numérique), un écart par rapport à la réalité est introduit. Pour les flux autour des corps non profilés, les équations RANS fonctionnent généralement bien autour des zones de séparation à haute vitesse, mais elles ont du mal à prédire avec précision les régions d'accélération du vent.

Cependant, les simulations utilisant ces approximations sont en accord étroit avec les expériences, à condition qu'une résolution de grille suffisante soit maintenue. Dans ce cas, la version de la théorie

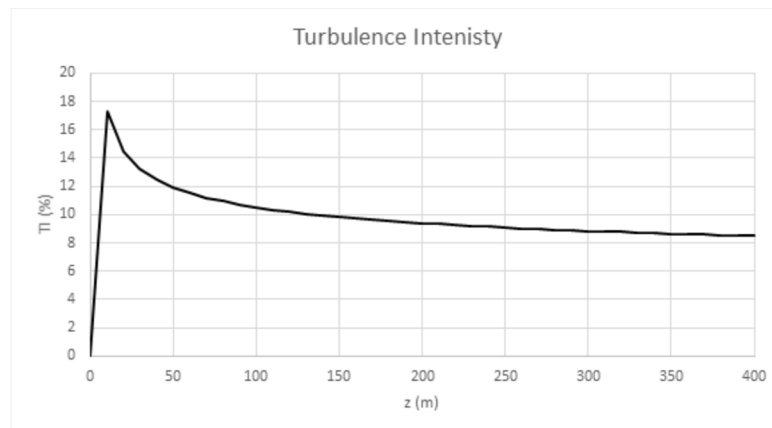
renormalisée (RNG) du modèle k- ϵ , qui introduit des équations pour l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation turbulente, est utilisée comme modèle de turbulence.

Le modèle de turbulence k-epsilon est un choix robuste qui est bien référencé pour les flux éoliens urbains. La formulation de ce modèle a été choisie en raison de ses performances améliorées dans les régions de cisaillement élevé, où le modèle standard a tendance à surestimer l'énergie cinétique turbulente.

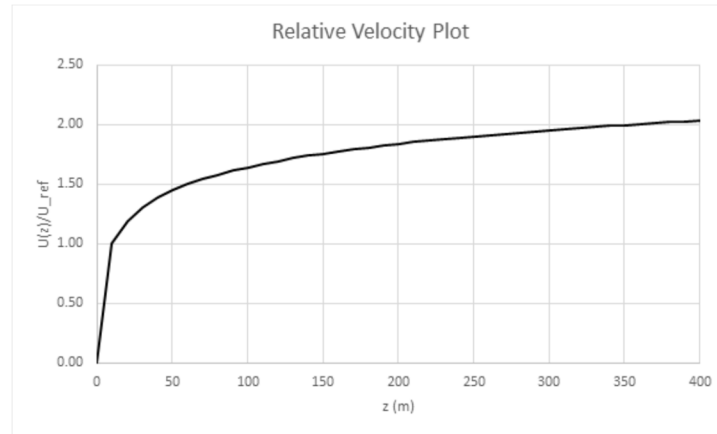
La turbulence à la frontière amont (entrée) est définie par le modèle k-epsilon de Richards and Hoxey (1993) :

$$k = \frac{u_{\tau}^2}{\sqrt{C_{\mu}}}$$
$$\epsilon = \frac{u_{\tau}^3}{\kappa(z + z_0)}$$

Où $k = 0,41$ (constante de Von Karman), z est la hauteur au-dessus du sol, $z_{ref} = 10 \text{ m}$, z_0 est la rugosité à l'entrée du modèle, qui varie en fonction de la direction, et $U_{ref} = 4 \text{ ou } 10 \text{ m/s}$. Le profil de la turbulence (intensité de la turbulence) en fonction de l'altitude est ajusté en fonction de la topographie et de la direction du vent. À titre d'exemple, la figure suivante présente le profil de turbulence imposé à l'entrée du modèle pour la direction ouest-sud-ouest.



En ce qui a trait aux valeurs d'entrées pour la vitesse et la turbulence des vents, elles ont été déterminées à partir des conditions de vents jugées intéressantes pour les activités nautiques qui sont effectuées dans la baie de Beauport. Des vents de 8 et 15 noeuds (4 à 8 m/s) sont jugés intéressants pour la planche à voile (AKVQ, 2017 et validation en décembre 2019 avec le FUBB). En période estivale, les débutants peuvent profiter du plan d'eau dès que les vents sont supérieurs à 4 m/s. Des vents d'intensité supérieure sont intéressants pour les plus expérimentés, à partir de 8 m/s, mais idéalement plus élevés. Des intensités de vent de 4 m/s et de 10 m/s à une élévation de référence de 10 m au-dessus du niveau d'eau seront donc retenues pour les différents scénarios de modélisation. Le graphique suivant présente la forme de l'équation logarithmique de la vitesse relative en fonction de l'altitude.



N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94j	Documenter les critères utilisés pour affirmer que les calculs itératifs ont convergé – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2

L'algorithme SIMPLE, intégré dans le logiciel OpenFOAM (Engys version HelyxCORE-3.0.1), a été utilisé pour résoudre itérativement les équations. La discrétisation spatiale était de second ordre en amont pour les termes convectifs et une méthode hybride Gauss/moindres carrés (Least Squares) a été utilisée pour les gradients secondaires. Mentionnons que la convergence a été établie sur la base d'une stabilité de l'erreur résiduelle moyenne et lorsque les valeurs des paramètres mesurés (intensité, direction, turbulence) à différents points de la zone d'intérêt ont présenté un comportement asymptotique. Ainsi, la solution a été considérée comme convergente lorsque les résidus, c'est-à-dire le changement relatif d'une itération à la suivante, étaient de 10^{-5} pour le momentum et 10^{-4} pour la pression.

Maillage

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94i	Justifier la résolution du maillage utilisé et expliquer comment le promoteur s'est assuré qu'elle soit suffisante. Spécifier si une étude de sensibilité quant au maillage utilisé a été effectuée – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2

Le maillage du modèle est formé de cellules nominalelement hexaédriques. La méthode CFD utilisée exige que ce volume soit divisé en volumes plus petits ou en maillage. Ces mailles réduisent leur taille d'environ 25 m dans le champ lointain à 0,1 m près des différents éléments de l'aménagement projeté, afin de résoudre avec assez d'exactitude l'écoulement de fluides. De minces couches de cellules prismatiques ont été ajoutées au sol et aux bâtiments pour résoudre les grands gradients de l'écoulement près des obstructions solides. Le nombre total de cellules s'élève à ~41 millions.

Une étude d'indépendance du maillage a été réalisée pour déterminer la dépendance de la solution par rapport au maillage utilisé dans l'étude. En pratique, de nombreux paramètres sont définis lors de la construction du maillage, mais ils dépendent tous d'une taille globale de cellules. Par conséquent, pour évaluer efficacement l'indépendance des mailles, une simulation a été effectuée sur trois maillages où la taille de base a été réduite de 20 % à chaque fois. Les maillages fin et moyen ont produit des résultats similaires, ce qui signifie que l'indépendance de la densité du maillage est atteinte avec le maillage moyen (WSP, 2020). Ce dernier a donc été retenu pour la réalisation des simulations.

Conditions limites

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94c	Spécifier à quelles faces on fait référence à la page 7 du rapport de WSP (2018) – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
ACÉE 94f	Clarifier si l'équation pour $u(z)$ inclut le plan de vitesse nulle (« zero-plane displacement ») – Voir Annexe III.	Section 1.4.1.2
CCM-3a	Indiquer à quelles faces réfère la phrase « une condition non-slip est appliquée à ces faces et le champ d'écoulement est explicitement modélisé autour des obstacles »	Section 1.4.1.2

Dans la zone d'intérêt, une condition « non-slip » a été appliquée aux limites de la face des bâtiments et le champ d'écoulement a été explicitement modélisé autour des obstacles. Dans la zone de champ lointain (far-field), les obstructions ont été estimées en utilisant un modèle mathématique qui ajuste le champ d'écoulement pour approximer la rugosité de l'environnement avoisinant. Une valeur de rugosité de $z_0 = 0,02 \text{ m}$ a été appliquée aux bâtiments et au terrain dans un rayon de 500 m du centre du terminal, alors que pour les éléments dans le champ lointain ($> 500 \text{ m}$ de rayon autour du centre du terminal), une valeur de rugosité variant entre $z_0 = 0,005 \rightarrow 0,3 \text{ m}$ a été appliquée selon leur classification de terrain (ESDU). La frontière avale (sortie) avait une condition limite de gradient nul, les parois latérales et supérieures avaient des conditions de glissement libre.

La vitesse et la turbulence spécifiées à l'entrée sont spécifiques à la topographie et au terrain du site. Le profil de vitesse est dépendant sur la hauteur (z) :

$$u(z) = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln \frac{z}{z + z_0}$$

où u_τ est la vitesse de friction, $\kappa = 0,41$ est la constante de von Karman et z_0 est la hauteur de rugosité, qui est dépendant sur la hauteur moyenne du terrain urbain entourant le site à l'étude.

Mentionnons que l'équation de $u(z)$ n'inclut pas le plan de vitesse nulle. Cette composante est ignorée dans la formulation de Richards and Hoxey (1993).

1.4.2 État de référence

L'état de référence des conditions climatiques et météorologiques demeure valide et aucune modification n'y a été apportée.

1.5 ÉVALUATION DES EFFETS SUR LES CONDITIONS CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94n	Indiquer, là où pertinent, les directions de vent associées aux impacts appréhendés énumérés – Voir Annexe III.	Section 1.5

1.5.1 Phase exploitation

1.5.1.1 Sources d'effets et effets négatifs potentiels

Pendant la phase d'exploitation, les sources d'effets sur les conditions météorologiques ainsi que les effets qui en découlent sont les suivants :

- ▶ Présence du quai et de l'arrière-quai (incluant le mur-écran);
- ▶ Opérations portuaires et circulation maritime – **Modification du régime des vents.**

1.5.1.2 Mesures d'atténuation

Aucune mesure d'atténuation n'est prévue.

1.5.1.3 Description détaillée de l'effet négatif résiduel

L'évaluation de l'environnement éolien du secteur visé par le projet a été réalisée pour déterminer l'effet potentiel du développement portuaire sur le microclimat local, particulièrement le régime des vents (annexe A; WSP, 2020). Pour ce faire, la modélisation de la mécanique des fluides a été mise à contribution. Celle-ci requiert d'abord l'élaboration d'un modèle tridimensionnel pour les aménagements actuels et futurs, ce qui permet ensuite d'analyser le régime des vents des deux modèles.

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94o	Fournir une ou des figures qui indiquent clairement la localisation de la plage actuelle, dans l'étude de WSP 2018, afin de pouvoir comprendre les résultats de la modélisation. – Voir Annexe III.	Section 1.5.1.3

Selon WSP (2020), le prolongement du quai en eau profonde n'aura pas d'effet notable sur les vents provenant de l'ENE (fréquence de 27 %). L'effet du projet sur les vents dans la zone de pratique des activités nautiques à voile dans la Baie de Beauport (zone au nord-est de la plage) est négligeable pour un vent en provenance de l'est-nord-est (figures 1-5 et 1-6). L'effet sera quasi imperceptible au niveau de la plage.

N° DE LA QUESTION	QUESTION	RÉPONSE
ACÉE 94m	Évaluer et cartographier les différences de conditions de turbulences obtenues entre les cas actuels et projetés pour des directions OSO et ONO – Voir Annexe III.	Section 1.5.1.3
CCM-6a	Corriger le texte afin de tenir compte de l'énergie cinétique de turbulence au lieu du vent à la page 1-15 dans la version finale du feuillet.	Section 1.5.1.3
CCM-6c	Éclaircir la contradiction concernant la turbulence au sud-est de la plage pour la direction OSO du vent entre le texte de la page 23 et le tableau 5-1 (page 26) de l'Annexe A. Veuillez justifier comment le vent dissipé par les nouveaux bâtiments pourrait expliquer une diminution de la turbulence au sud-est de la plage.	Section 1.5.1.3; annexe A
CCM-6d	Inclure une légende lisible pour la figure 4.1 (page 17) de l'Annexe A.	Annexe A

Pour les vents en provenance de l'OSO (fréquence de 39 %), en conditions actuelles, on observe que les infrastructures existantes ont des effets variables le long de la plage, et plus au large dans la baie (figures 1-7 et 1-8). La présence des nouvelles installations engendre des augmentations variables de 10 à 50 % devant la plage, mais qui sont essentiellement attribuables à de légers déplacements de corridors de vent. Ces variations se traduisent en des augmentations ponctuelles jusqu'à 1,5 m/s pour un vent de 4 m/s, et jusqu'à 3 m/s pour un vent de 10 m/s. L'effet le plus important s'étend sur une distance de 2 500 m à l'est des installations prévues. Cet effet correspond à une diminution de plus de 10 % des vitesses s'étendant le long de ce corridor. La diminution est encore plus marquée (de 40 à 50 %) à 750 m de l'extrémité du terminal et à cet endroit la vitesse du vent est inférieure à 4 m/s pour le scénario de vent de 10 m/s. Cette diminution est causée par la présence des grues et des conteneurs qui font dévier les vents provenant de l'OSO en hauteur. À 750 m de l'extrémité du quai, dans le corridor de la baie touché par le projet, le nombre d'heures où des vents excèdent 4 et 10 m/s passe donc de 200 à 100 en conditions futures. Les impacts sont toutefois négligeables dans la zone de navigation de plaisance qui se trouve au nord-est de la plage de Beauport.

Pour les cas de vents en provenance de l'ONO (fréquence de 12 %), le développement portuaire proposé créera une réduction de la vitesse au niveau de la plage allant jusqu'à 25 % (figures 1-9 et 1-10). Toutefois, cette diminution représente seulement 5 heures au niveau de la plage. C'est au sud-est des nouvelles infrastructures que l'impact sera le plus grand pour les vents provenant de l'ONO puisque la diminution s'étendra sur 1 500 m, et ce, pour les deux vitesses modélisées. Notons qu'à cet endroit, on observe déjà que les infrastructures existantes ont un effet et qu'elles créent des corridors où la vitesse du vent est amoindrie. L'étendue de la diminution de vent sera augmentée, notamment au large des nouvelles installations.

En ce qui a trait à l'énergie cinétique de turbulence à 2 m au-dessus du sol ou de la surface de l'eau (BMIMM), les résultats de la modélisation montrent que le projet entraînera une très légère augmentation de l'énergie turbulente cinétique pour les vents provenant de l'ENE autour de la plage (WSP, 2020). Les nouveaux bâtiments ont pour effet de dissiper l'énergie turbulente cinétique des vents provenant de l'OSO et de l'ONO (figures 1-11 et 1-12).

L'énergie cinétique turbulente présentée dans le rapport à l'annexe A est fournie à une hauteur de 2 m au-dessus du plan d'eau. Puisque la réduction de l'intensité du vent est fortement diminuée à cette élévation, la turbulence y est également grandement diminuée au sud-est de la plage. En effet, l'énergie cinétique turbulente caractérise les échanges d'énergie cinétique par rapport au mouvement moyen, et donc, plus l'intensité moyenne du vent est faible, plus l'énergie cinétique de turbulence est faible. Le rapport à l'annexe A présente des coupes transversales dans le sillage des structures provoquant de la turbulence, lesquelles montrent que la turbulence est présente plus haut en altitude.

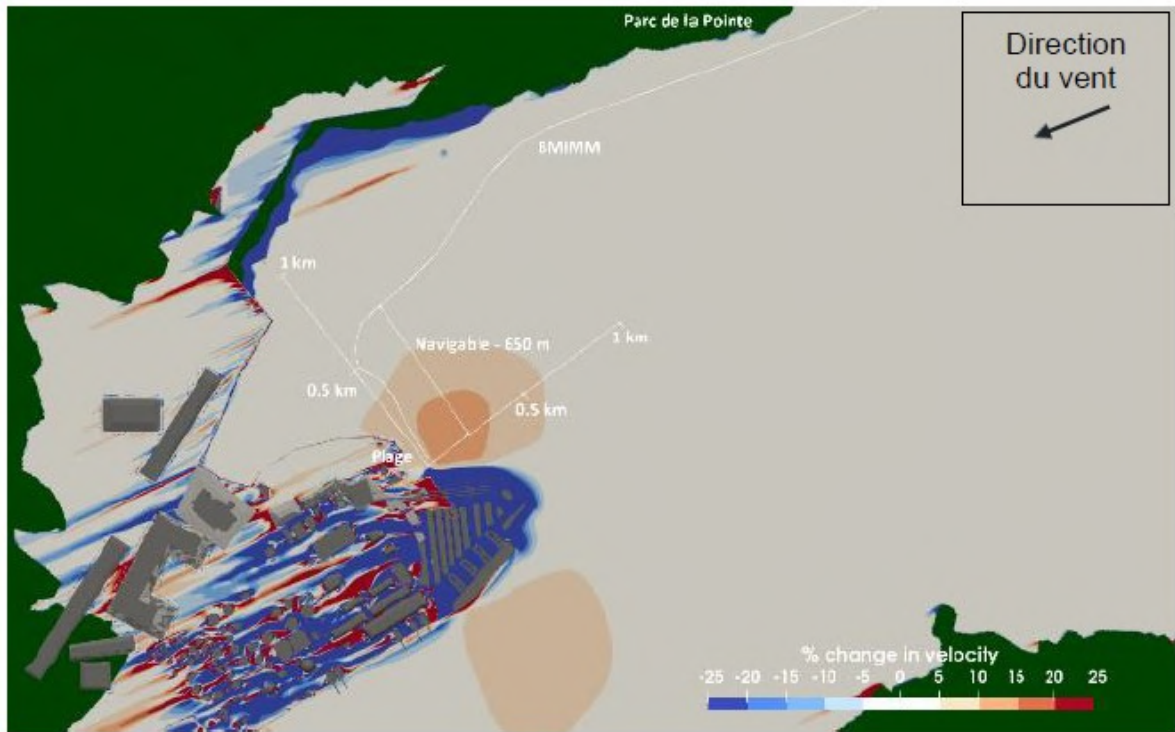


Figure 1-5 Modélisation du régime des vents en provenance de l'ENE à 4 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)

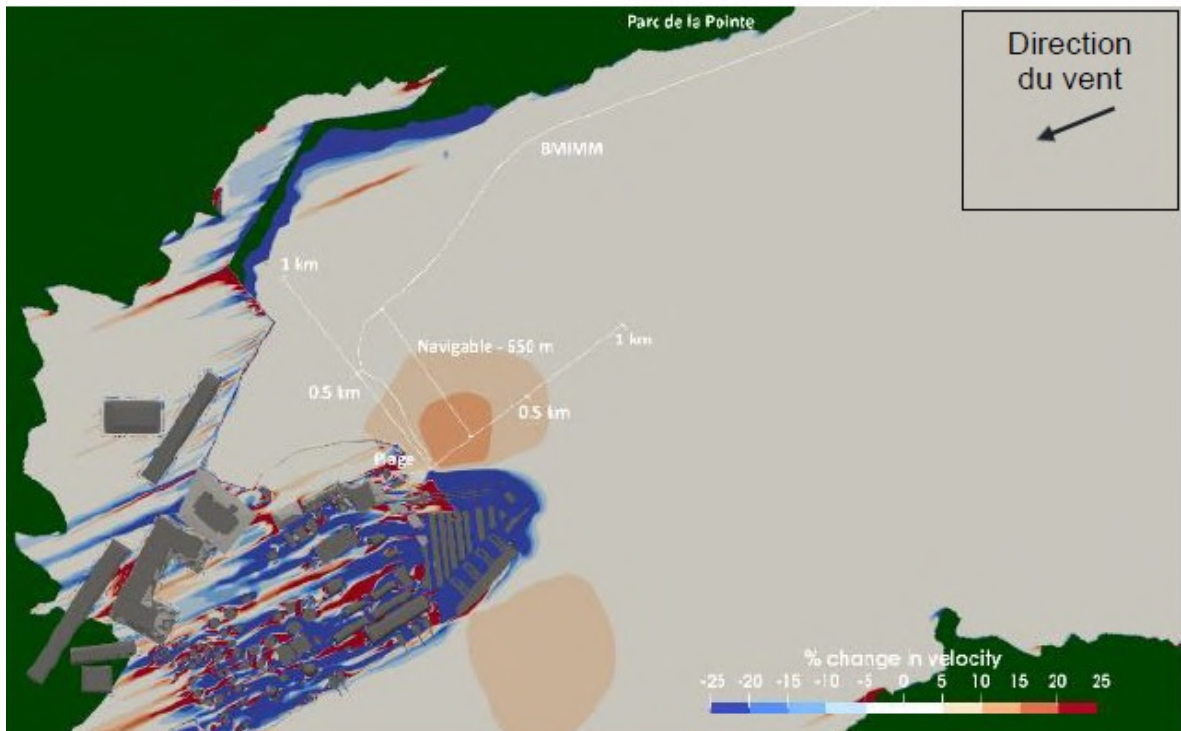


Figure 1-6 Modélisation du régime des vents en provenance de l'ENE à 10 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)

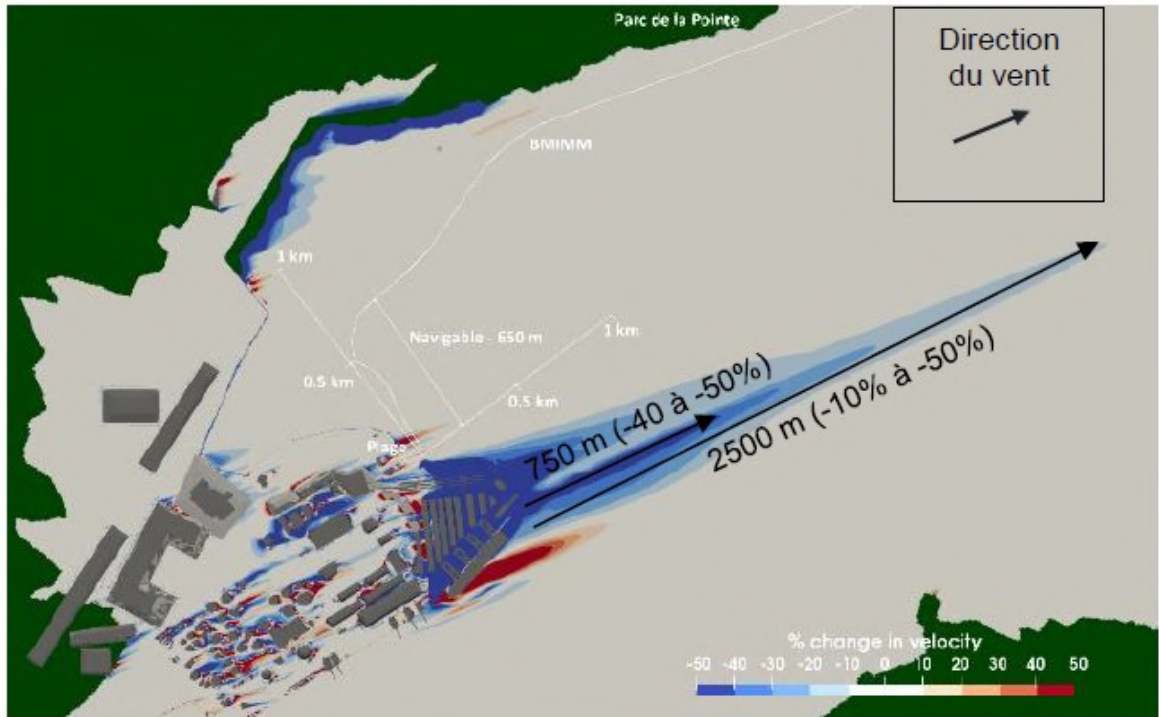


Figure 1-7 Modélisation du régime des vents en provenance de l'OSO à 4 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)

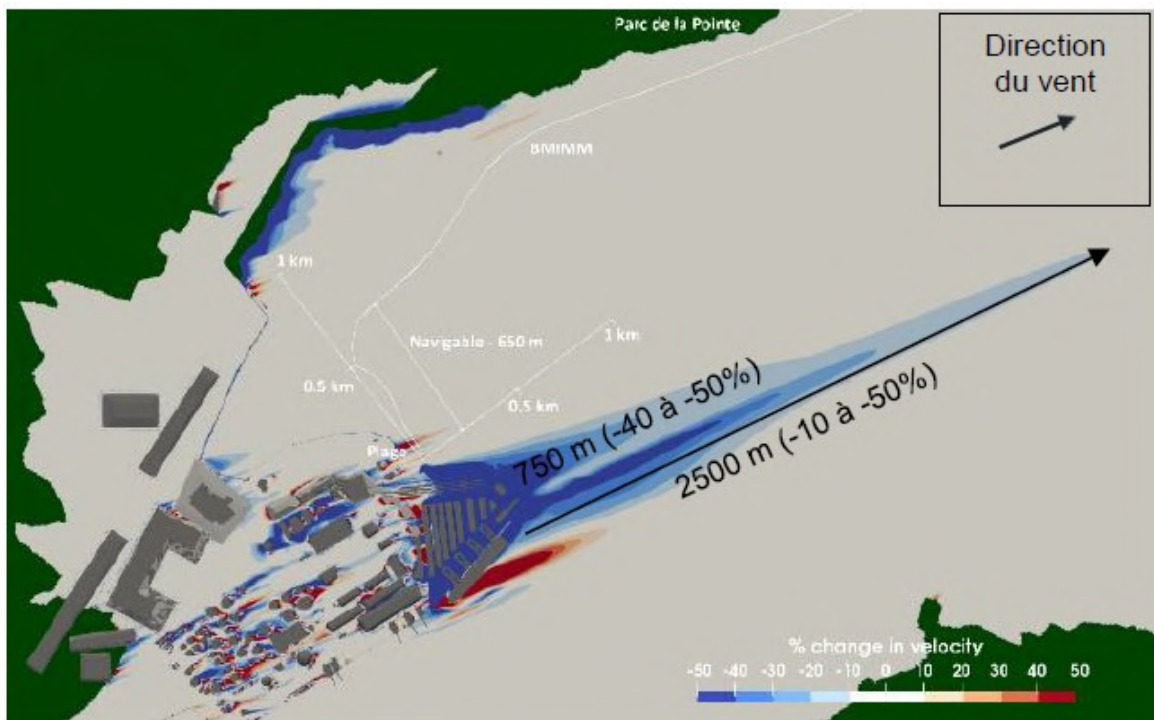


Figure 1-8 Modélisation du régime des vents en provenance de l'OSO à 10 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)

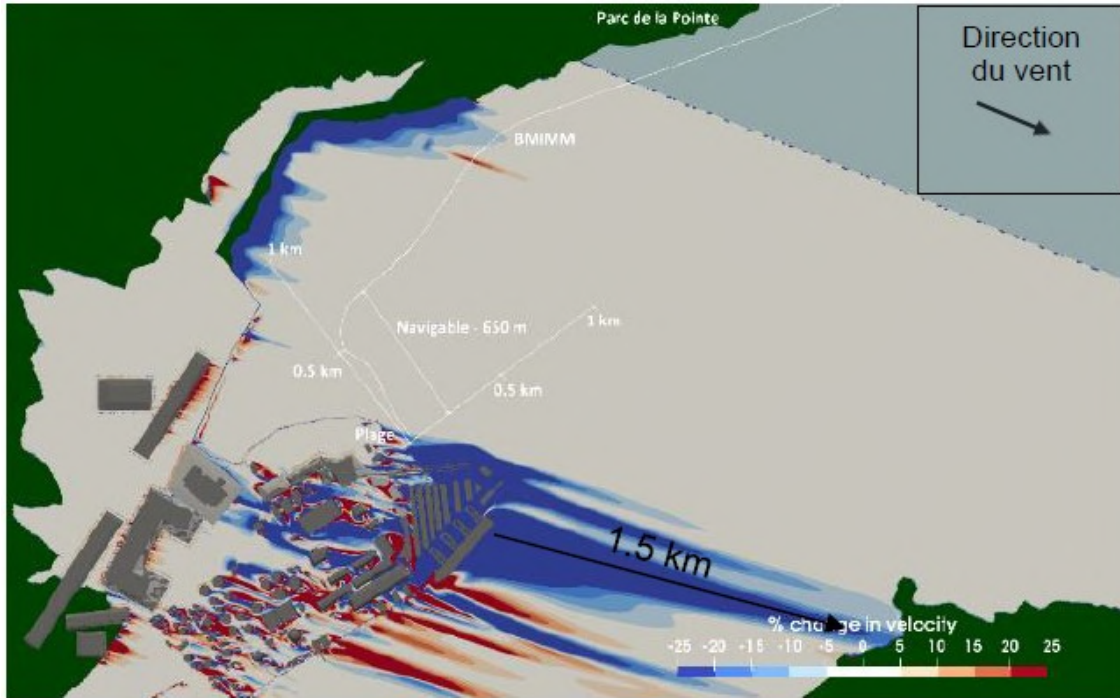


Figure 1-9 Modélisation du régime des vents en provenance de l'ONO à 4 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)

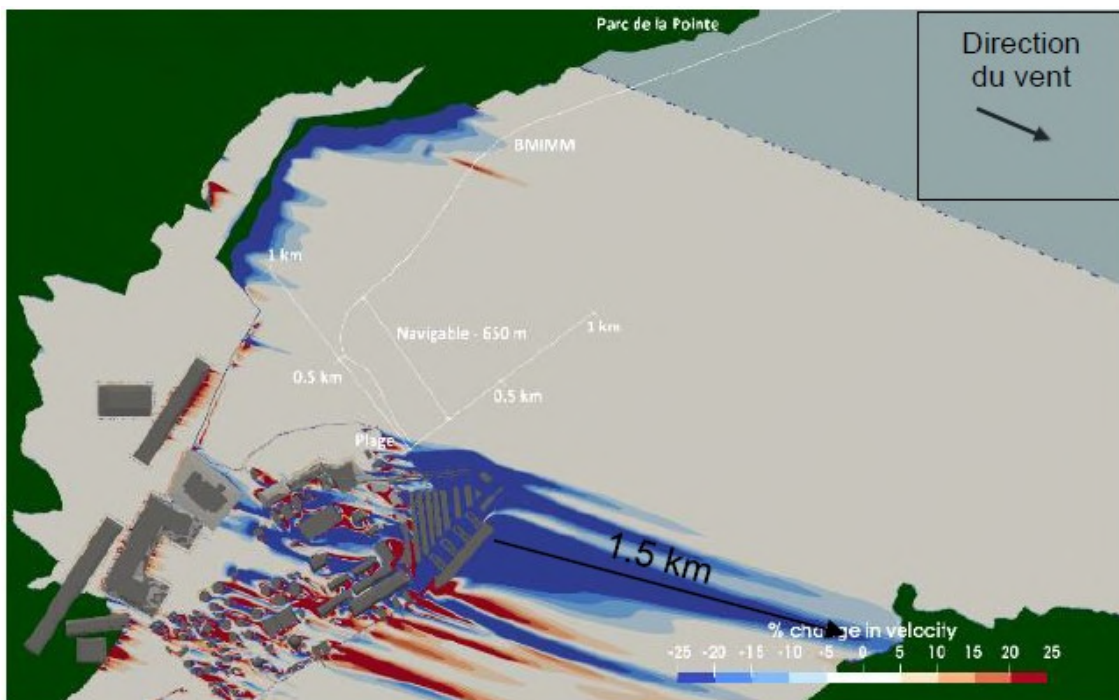


Figure 1-10 Modélisation du régime des vents en provenance de l'ONO à 10 m/s, comparaison entre l'état de référence et la phase d'exploitation (WSP, 2020)

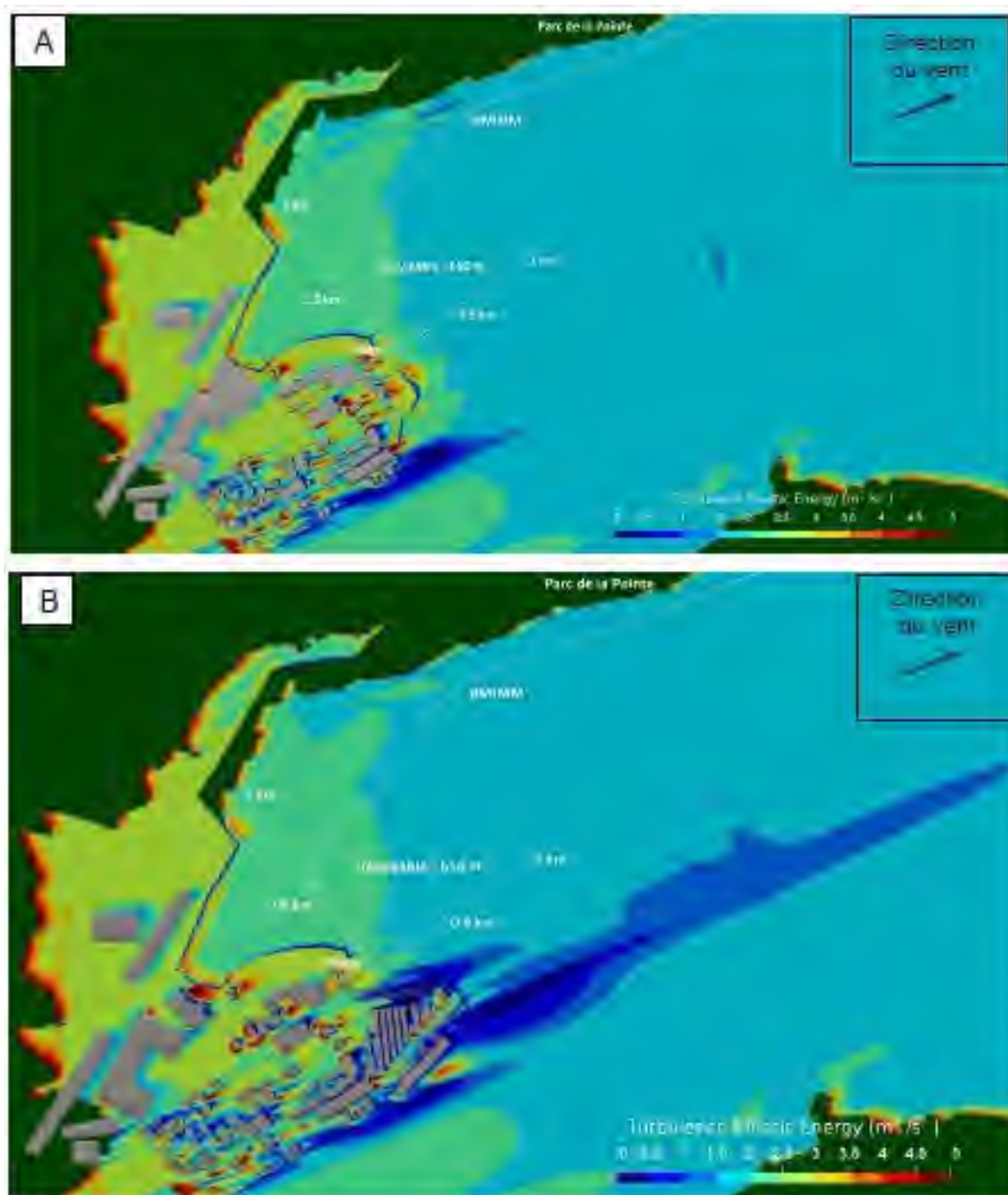


Figure 1-11 Résultats de turbulence pour le scénario de vent de l'OSO en conditions actuelles (A) et en phase d'exploitation (B) (WSP, 2020)

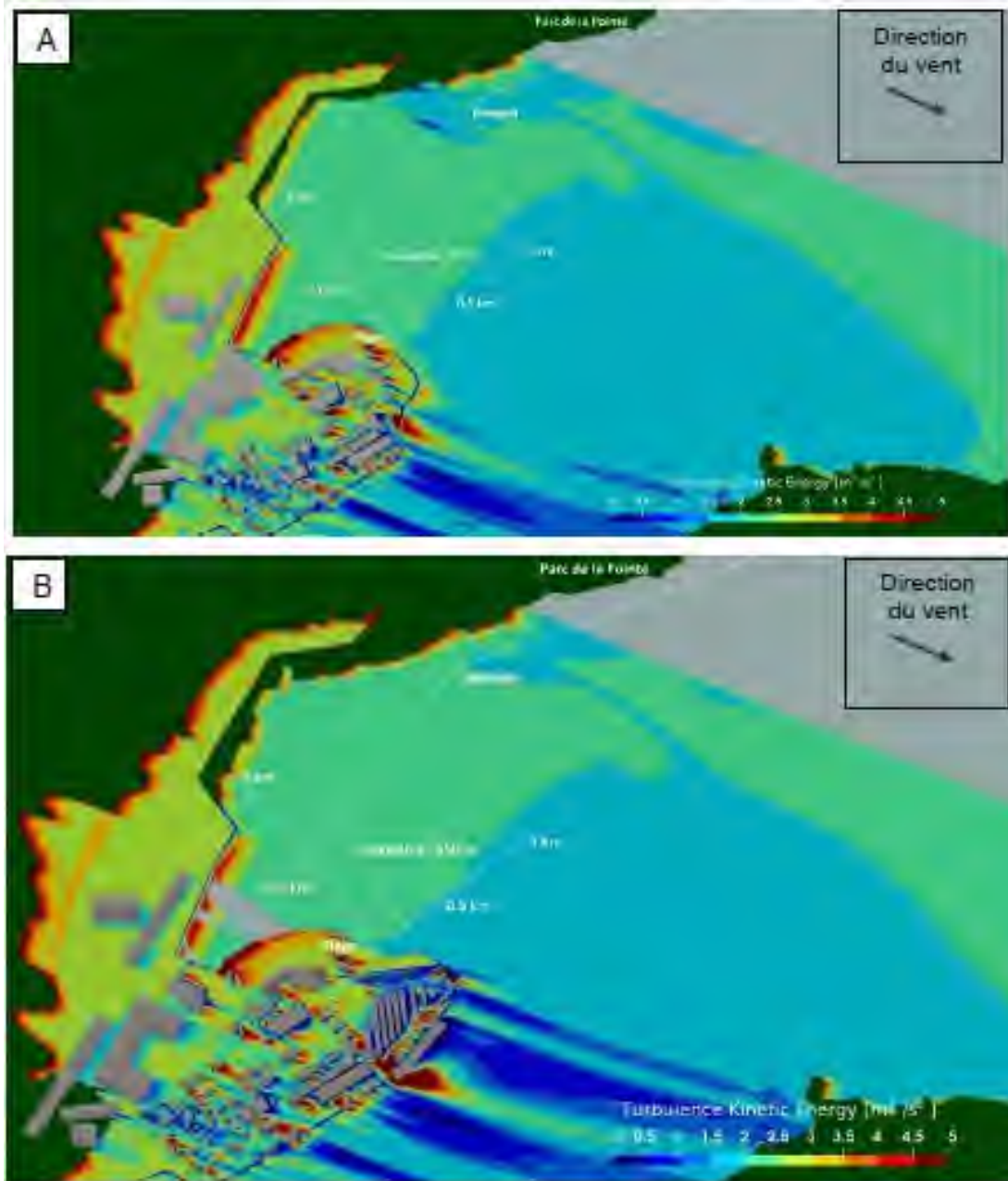


Figure 1-12 Résultats de turbulence pour le scénario de vent de l'ONO en conditions actuelles (A) et en phase d'exploitation (B) (WSP, 2020)

1.5.1.4 Évaluation de l'effet négatif résiduel

L'aménagement des nouvelles infrastructures causant la modification du régime des vents représente une valeur de l'effet environnemental résiduel jugée moyenne. Les effets seront limités à une modification relativement mineure des vents du secteur. Les vents auront un patron relativement similaire à l'état actuel, mais celui-ci sera quelque peu déplacé en raison de la présence des nouvelles infrastructures. L'effet sera donc d'une ampleur modérée et l'étendue de celui-ci s'applique à la zone d'étude. Comme ces modifications seront liées à l'implantation du nouveau quai et des nouveaux équipements d'exploitation, elles seront de longue durée et se produiront régulièrement. La probabilité d'occurrence est très élevée puisque les infrastructures ou les principaux équipements responsables des effets sont indispensables au bon fonctionnement des activités d'exploitation. Les effets ont été évalués dans le cadre d'une étude technique comportant l'utilisation de modèles approuvés. Ainsi, un niveau de confiance élevé est attribué à celle-ci.

EFFET SUR LES CONDITIONS CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES EN PHASE D'EXPLOITATION	
Nature	Négatif
Ampleur	Modérée
Étendue	Zone d'étude
Durée	Longue
Fréquence	Régulièrement
Réversibilité/irréversibilité	Irréversible
Valeur de l'effet environnemental résiduel	Moyenne
Incertitude scientifique	Niveau de confiance élevé
Probabilité d'occurrence	Fort probable
Importance de l'effet négatif résiduel	Non importante

Il importe de préciser que les critères d'évaluation des effets correspondent aux critères utilisés dans le *Document de réponses à la demande d'informations additionnelles de l'ACÉE du 24 avril 2017 – Terminal de conteneurs en eau profonde (Beauport 2020)* (Englobe, 2018). Les effets ou nuisances qui peuvent être causés par la modification du régime des vents seront traités plus spécifiquement dans d'autres feuillets, notamment les *Feuille 16 – Utilisation du territoire et de ses ressources* et *Feuille 18 – Plans sanitaire et socioéconomiques* (Englobe, 2020 [en préparation]).

1.6 ÉVALUATION DES EFFETS CUMULATIFS SUR LES CONDITIONS CLIMATIQUES ET MÉTÉOROLOGIQUES

À l'instar du projet Beauport 2020, les conditions climatiques et météorologiques n'ont pas été retenues comme une composante valorisée de l'environnement pour l'évaluation des effets cumulatifs dans le contexte du projet Laurentia, ce qui s'explique par le type d'effets anticipés sur le régime des vents. Par ailleurs, comme cette composante est associée à l'utilisation du territoire et de ses ressources en raison des effets anticipés sur les usagers de la Baie de Beauport, c'est plutôt cette composante qui a fait l'objet d'une évaluation des effets cumulatifs dans le contexte du projet Laurentia (voir le fascicule *Utilisation du territoire et de ses ressources*).

1.7 SURVEILLANCE ET SUIVI ENVIRONNEMENTAL

L'APQ mettra en place un programme de surveillance environnementale spécifique au projet Laurentia qui couvrira l'ensemble des travaux prévus pendant la phase de construction. De cette façon, elle pourra s'assurer de l'application concrète des mesures d'atténuation pendant les travaux. En raison de la nature des effets appréhendés sur les conditions climatiques et météorologiques, aucune activité de surveillance environnementale spécifique à cette composante environnementale n'est prévue dans le contexte du projet Laurentia, comme c'était le cas initialement (Beauport 2020).

De plus, un programme de suivi environnemental est prévu dans le contexte du projet Laurentia, lequel permettra d'évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation ou de mesurer certains des effets résiduels réels du projet de terminal en eau profonde. Compte tenu de la nature du projet et de son milieu d'insertion, aucun suivi environnemental n'est proposé spécifiquement pour les conditions climatiques et météorologiques.

L'APQ poursuivra toutefois les rencontres avec le FUBB selon une fréquence à déterminer. Au-delà de ces rencontres officielles, l'APQ restera disponible et invitera les membres du FUBB à leur faire part de toutes préoccupations liées aux effets du projet sur le régime des vents.

1.8 RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ASSOCIATION DES KITESURFEURS ET VÉLIPLANCHISTES DU QUÉBEC (AKVQ). 2017. *Mémoire sur le projet d'aménagement d'un quai multifonctionnel en eau profonde dans le Port de Québec*. 83 p. et annexes.
- BLOCKEN, B., JANSSEN, W.D. ET VAN HOOFF, T. 2012. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling & Software*, 30, pp.15-34.
- DADIOTI, R. ET REES, S. J., *Validation of open source CFD applied to building external flow*, 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec 7-9, 2015.
- ELSHAER, A., BITSUAMLAK, G. ET EL DAMATTY, A. 2017. Enhancing wind performance of tall buildings using corner aerodynamic optimization. *Engineering Structures*, 136, pp.133-148.
- ENGLOBE. 2018. *Document de réponses à la demande d'informations additionnelles de l'ACÉE du 24 avril 2017 – Terminal de conteneurs en eau profonde (Beuport 2020)*. Rapport déposé à l'Agence canadienne d'évaluation environnementale pour l'Administration portuaire de Québec (APQ). Volumes multiples.
- FRANKE, J. ed. 2007. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. Meteorological Inst.
- JUBAYER, C.M. ET HANGAN, H. 2018. A hybrid approach for evaluating wind flow over a complex terrain. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 175, pp.65-76.
- LASALLE. 2016a. *Port de Québec. Extension du secteur de Beauport. Étude sur modèle numérique des impacts éoliens*. Version finale révision 1, préparé pour l'Administration portuaire de Québec. 22 p. et annexes.
- LASALLE | NHC. 2016b. *Extension du secteur Beauport – nouvelles variantes d'aménagement des plages*. Réf. Lasalle | HNC no 08001443. Rapport présenté à Administration portuaire de Québec. 33 p. + annexes
- LASALLE | NHC. 2014. *Extension du secteur Beauport. Mise au point de la variante finale des plages. Modélisation numérique des conditions hydrosédimentologiques*. Rapport no 1873. Rapport présenté à Administration portuaire de Québec. 74 p. N° intrant annexe A : 043.
- LI, J., DELMAS, A., DONN, M. ET WILLIS, R., 2018. *Validation and comparison of different CFD simulation software predictions of urban wind environment*, Society for Modeling & Simulation International (SCS), Delft, the Netherlands. PARK, J., SUN, X., CHOI, J.I. ET RHEE, G.H. 2017. Effect of wind and buoyancy interaction on single-sided ventilation in a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial aerodynamics*, 171, pp.380-389.
- RICHARDS, P.J. ET HOXEY, R.P. 1993. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 46, pp.145-153.
- TOMINAGA, Y., MOCHIDA, A., YOSHIE, R., KATAOKA, H., NOZU, T., YOSHIKAWA, M. ET SHIRASAWA, T. 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11), pp.1749-1761.

WSP. 2018. *Port de Québec - Extension du secteur de Beauport – Étude sur modèle numérique des impacts éoliens*. Rapport de WSP Canada Inc. à l'Administration portuaire de Québec. 49 p. et annexes.

WSP. 2020. *Port de Québec - Extension du secteur de Beauport – Terminal de conteneurs Laurentia – Étude sur modèle numérique des impacts éoliens*. Rapport de WSP Canada Inc. à l'Administration portuaire de Québec. 28 p.

Annexe A Étude sur modèle numérique des impacts éoliens (WSP, 2020)

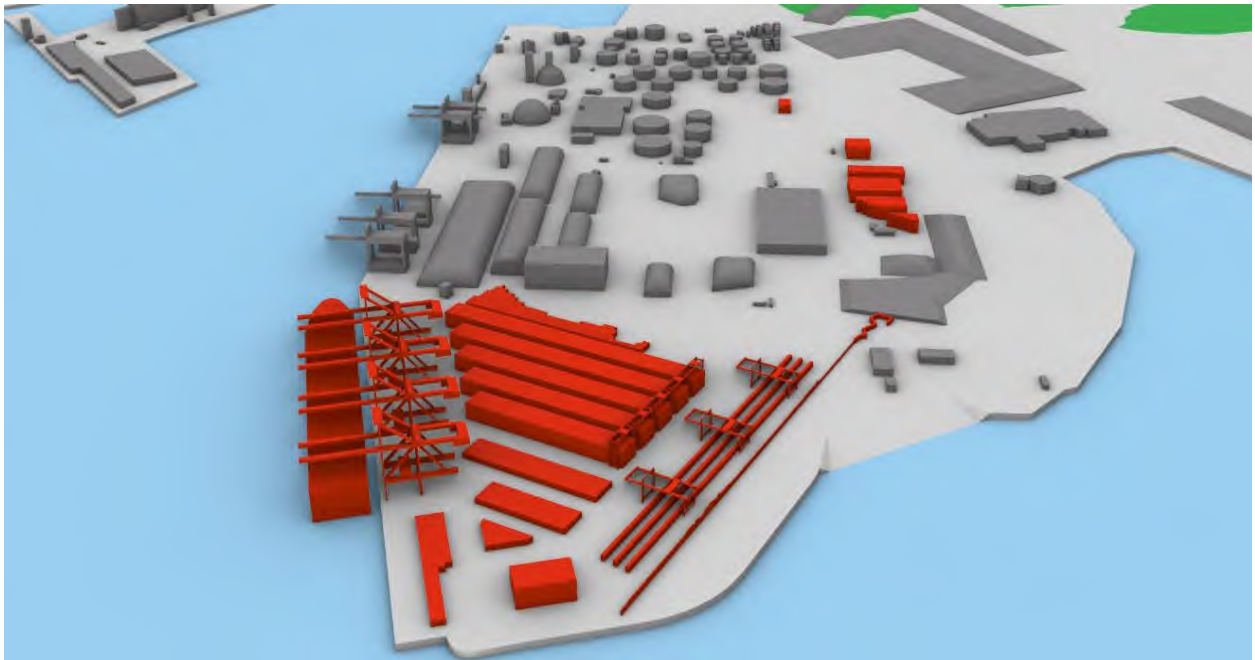
PORT DE QUÉBEC – EXTENSION DU SECTEUR DE BEAUPORT

Terminal de conteneurs Laurentia

ÉTUDE SUR MODÈLE NUMÉRIQUE DES IMPACTS ÉOLIENS

ADMINISTRATION PORTUAIRE DE QUÉBEC

JUIN 2020



PORT DE QUÉBEC – EXTENSION DU SECTEUR DE BEAUPORT

TERMINAL DE CONTENEURS LAURENTIA

ÉTUDE SUR MODÈLE NUMÉRIQUE DES IMPACTS ÉOLIENS

ADMINISTRATION PORTUAIRE DE QUÉBEC

VERSION POUR INFORMATION

PROJET N° : 171-16496-01
DATE : JUIN 2020

WSP CANADA INC.
1135, BOULEVARD LEBOURGNEUF
QUÉBEC (QUÉBEC) G2K 0M5

TÉLÉPHONE : +1 418-623-2254
TÉLÉCOPIEUR : +1 418-624-1857
WSP.COM

SIGNATURES

PRÉPARÉ PAR

<original signed by>

Noémie Blouin, ing., M.Sc.
N° OIQ : 5039486

RÉVISÉ PAR

<original signed by>

Steve Renaud, ing., M. Sc.
N° OIQ : 121069

Le présent rapport a été préparé par WSP Canada Inc. (WSP) pour le compte de l'Administration portuaire de Québec (APQ) conformément à l'entente de services professionnels. La divulgation de tout renseignement faisant partie du présent rapport incombe uniquement au destinataire prévu. Son contenu reflète le meilleur jugement de WSP à la lumière des informations disponibles au moment de la préparation du rapport. Toute utilisation que pourrait en faire une tierce partie ou toute référence ou toutes décisions en découlant sont l'entière responsabilité de ladite tierce partie. WSP n'accepte aucune responsabilité quant aux dommages, s'il en était, que pourrait subir une tierce partie à la suite d'une décision ou d'un geste basé sur le présent rapport. Cet énoncé de limitation fait partie du présent rapport.

L'original du document technologique que nous vous transmettons a été authentifié et sera conservé par WSP pour une période minimale de dix ans. Étant donné que le fichier transmis n'est plus sous le contrôle de WSP et que son intégrité n'est pas assurée, aucune garantie n'est donnée sur les modifications ultérieures qui peuvent y être apportées.

ÉMISSION/RÉVISION	PRÉPARÉ POUR	DATE
Préliminaire	AEIC et Administration portuaire de Québec	28 Février 2020
Pré-finale	AEIC et Administration portuaire de Québec	11 mars 2020
Finale	AEIC et Administration portuaire de Québec	9 juin 2020

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	CONTEXTE.....	1
1.2	MANDAT.....	1
2	PARAMÈTRES DE MODÉLISATION.....	2
2.1	DOMAINE D'ÉTUDE.....	2
2.2	MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN.....	2
2.3	SCÉNARIOS DE MODÉLISATION.....	6
3	OUTILS DE MODÉLISATION.....	10
3.1	LOGICIEL DE MODÉLISATION.....	10
3.2	DOMAINE MODÉLISÉ ET MAILLAGE.....	10
3.3	CONDITIONS LIMITES.....	13
3.4	MODÈLES DE TURBULENCE.....	15
4	RÉSULTATS.....	16
4.1	VITESSE DU VENT.....	16
4.1.1	SCÉNARIOS DE L'EST-NORD-EST (ENE).....	17
4.1.2	SCENARIOS DE L'OUEST-SUD-OUEST (OSO).....	17
4.1.3	SCENARIOS DE L'OUEST-NORD-OUEST (ONO).....	18
4.2	ÉNERGIE CINÉTIQUE TURBULENTE.....	25
5	CONCLUSIONS.....	31
6	REFERENCES.....	33

TABLEAUX

TABLEAU 2.1	SCÉNARIOS MODÉLISÉS	9
TABLEAU 5.1	SYNTHÈSE DES RÉSULTATS À 2 M AU-DESSUS DU SOL OU DU PLAN D'EAU POUR L'AMÉNAGEMENT PROPOSÉ POUR UN VENT IMPOSÉ DE 4 M/S ET 10 M/S.....	31

FIGURES

FIGURE 2.1	IMAGE SATELLITE (GOOGLE EARTH) DE L'ÉTENDUE DU DOMAINE, INCLUANT LA ZONE D'INTÉRÊT ET ZONE ÉLOIGNÉE (EXTÉRIEUR DE LA ZONE D'INTÉRÊT).....	2
FIGURE 2.2	PLAN DES AMÉNAGEMENTS PROJETÉS DU SECTEUR DE BEAUPORT DU PORT DE QUÉBEC.....	4
FIGURE 2.3	IMAGE AÉRIENNE DE L'AMÉNAGEMENT EXISTANT DU PORT.....	5
FIGURE 2.4	FIGURE CAD TRIDIMENSIONNELLE DU MODÈLE UTILISÉ POUR REPRÉSENTER L'AMÉNAGEMENT EXISTANT DU PORT	5
FIGURE 2.5	FIGURE CAD TRIDIMENSIONNELLE DU MODÈLE UTILISÉ POUR REPRÉSENTER L'AMÉNAGEMENT PROJETÉ DU PORT	6
FIGURE 2.6	ROSE DES VENTS À LA STATION BEAUPORT DE 2003-2020, DONNÉES RETENUES UNIQUEMENT DE MAI À NOVEMBRE ENTRE 6 :00 ET 20 :00.....	7
FIGURE 2.7	PHOTO AÉRIENNE ILLUSTRANT LES TROIS PROVENANCES DE VENT ÉTUDIÉES.....	8
FIGURE 3.1	SECTION DU MAILLAGE UTILISÉE DANS LE CADRE DE CETTE ÉTUDE.....	11

FIGURE 3.2	COMPARAISON DE LA MAGNITUDE DE LA VITESSE POUR DIFFÉRENTES DENSITÉS DE MAILLAGE	12
FIGURE 3.3	COMPARAISON L'ÉNERGIE CINÉTIQUE TURBULENTE POUR DIFFÉRENTES DENSITÉS DE MAILLAGE	12
FIGURE 3.4	VITESSE RELATIVE À L'ENTRÉE DU MODÈLE EN FONCTION DE L'ALTITUDE.....	14
FIGURE 3.5	INTENSITÉ DE LA TURBULENCE EN FONCTION DE L'ALTITUDE	14
FIGURE 4.1	RÉSULTATS D'UN VENT DE 4 M/S À 2 M AU-DESSUS DU PLAN D'EAU POUR LES SCÉNARIOS DE VENT PROVENANT DE L'EST-NORD-EST AU NIVEAU DE BASSE MER INFÉRIEURE DE MARÉE MOYENNE	19
FIGURE 4.2	RÉSULTATS D'UN VENT DE 10 M/S À 2 M AU-DESSUS DU PLAN D'EAU POUR LES SCÉNARIOS DE VENT PROVENANT DE L'EST-NORD-EST AU NIVEAU DE BASSE MER INFÉRIEURE DE MARÉE MOYENNE	20
FIGURE 4.3	RÉSULTATS D'UN VENT DE 4 M/S À 2 M AU-DESSUS DU PLAN D'EAU POUR LES SCÉNARIOS DE VENT PROVENANT DE L'OUEST-SUD-OUEST AU NIVEAU DE BASSE MER INFÉRIEURE DE MARÉE MOYENNE	21
FIGURE 4.4	RÉSULTATS D'UN VENT DE 10 M/S À 2 M AU-DESSUS DU PLAN D'EAU POUR LES SCÉNARIOS DE VENT PROVENANT DE L'OUEST-SUD-OUEST AU NIVEAU DE BASSE MER INFÉRIEURE DE MARÉE MOYENNE	22
FIGURE 4.5	RÉSULTATS D'UN VENT DE 4 M/S À 2 M AU-DESSUS DU PLAN D'EAU POUR LES SCÉNARIOS DE VENT PROVENANT DE L'OUEST-NORD-OUEST AU NIVEAU DE BASSE MER INFÉRIEURE DE MARÉE MOYENNE	23

FIGURE 4.6	RÉSULTATS D'UN VENT DE 10 M/S À 2 M AU-DESSUS DU PLAN D'EAU POUR LES SCÉNARIOS DE VENT PROVENANT DE L'OUEST-NORD-OUEST AU NIVEAU DE BASSE MER INFÉRIEURE DE MARÉE MOYENNE24
FIGURE 4.7	RÉSULTATS DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DE TURBULENCE SELON UNE VUE EN PLAN POUR LE SCÉNARIO DE L'ENE POUR L'AMÉNAGEMENT EXISTANT (A) ET L'AMÉNAGEMENT PROJETÉ (B)26
FIGURE 4.8	RÉSULTATS DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DE TURBULENCE SELON UNE VUE EN PLAN POUR LE SCÉNARIO DE L'OSO POUR L'AMÉNAGEMENT EXISTANT (A) ET L'AMÉNAGEMENT PROJETÉ (B)27
FIGURE 4.9	RÉSULTATS DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DE TURBULENCE SELON UNE VUE EN PLAN POUR LE SCÉNARIO DE L'ONO POUR L'AMÉNAGEMENT EXISTANT (A) ET L'AMÉNAGEMENT PROJETÉ (B)28
FIGURE 4.10	RÉSULTATS DE L'ÉNERGIE CINÉTIQUE DE TURBULENCE SELON UNE VUE TRANSVERSALE POUR LE SCÉNARIO DE L'OSO POUR L'AMÉNAGEMENT EXISTANT (A) ET L'AMÉNAGEMENT PROJETÉ (B).....29
FIGURE 4.11	RÉSULTATS DE L'INTENSITÉ DE TURBULENCE SELON UNE VUE TRANSVERSALE POUR LE SCÉNARIO DE L'OSO POUR L'AMÉNAGEMENT EXISTANT (A) ET L'AMÉNAGEMENT PROJETÉ (B)30

ANNEXES

ANNEXE A	AGRANDISSEMENT DES RÉSULTATS
ANNEXE B	RAPPORT ÉTUDE DE VENT DU GROUPE LASALLE 2016

1 INTRODUCTION

1.1 CONTEXTE

Dans le cadre de son projet Laurentia, anciennement Beauport 2020, l'Administration portuaire de Québec (APQ) prévoit l'extension de ses installations portuaires dans le secteur de la baie de Beauport. Le prolongement du nouveau terminal totalise 610 m, dont 450 m de ligne de quai. La profondeur à quai est de 16 m à marée basse et inclut l'ajout de nouveaux terrains à l'est des installations portuaires.

Différentes variantes du projet ont été étudiées à ce jour et l'aménagement retenu, le terminal Laurentia, inclut un terminal de conteneurs (différent de la version 2018) en excluant le brise-lames et la recharge de plage initialement planifiée dans le secteur de la Station nautique de la baie de Beauport. À la suite de consultations publiques et afin de réduire l'impact sur l'habitat du poisson, il a été préféré de conserver la plage dans sa configuration actuelle. Des impacts sont également appréhendés sur les conditions de vent dans la zone au nord et à l'est des nouvelles installations, ce qui pourrait affecter les conditions de navigation à voile. Le blocage des corridors de vent est notamment craint par les usagers de la baie de Beauport, ce qui entraînerait, selon eux, la formation de zone de turbulence à proximité de la plage, soit la zone la plus sécuritaire et la préférée pour les débutants dans la pratique des sports de voile.

1.2 MANDAT

WSP Canada Inc. (WSP) a été mandatée par l'APQ pour réaliser une évaluation de l'environnement éolien sur le site projeté du terminal Laurentia pour investiguer l'impact potentiel que l'expansion pourrait avoir sur la vitesse des vents locaux. Afin d'analyser les impacts potentiels du développement portuaire sur le microclimat local, la modélisation de la mécanique des fluides (ou CFD – computational fluid dynamics) sera mise à contribution pour la réalisation du mandat. Ceci requiert l'élaboration d'un modèle tridimensionnel pour comparer l'aménagement actuel et l'aménagement futur. Les patrons de vent des deux modèles sont par la suite analysés.

Cette étude vise à quantifier l'effet de l'expansion portuaire proposée en comparant la distribution spatiale des vitesses de vent entre les aménagements existants et projetés.

Des études de vent ont déjà été réalisées par le passé pour les autres variantes du projet :

- Études du Groupe-Conseil Lasalle (2014 et 2016) portant sur un terminal de vrac et incluant le brise-lames et la recharge de plage;
- Étude de WSP (2018) portant sur la configuration antérieure du terminal de conteneurs.

Ces études doivent donc être mises à jour selon la nouvelle configuration du terminal de conteneurs, qui conserve la configuration actuelle de la plage, et doivent répondre aux questionnements des utilisateurs de la baie de Beauport.

2 PARAMÈTRES DE MODÉLISATION

2.1 DOMAINE D'ÉTUDE

L'encadré blanc de la Figure 2.1 présente l'étendue du domaine modélisé. Le modèle tridimensionnel inclut toutes les installations portuaires du Port de Québec, le fleuve Saint-Laurent, la pointe de l'Île d'Orléans ainsi qu'une section de la rive au niveau de la Ville de Lévis. Le modèle s'étend sur environ 8 km dans toutes les directions à partir du centre du port (superficie totale de 16 km X 16 km). Il était important de sélectionner un domaine assez grand pour inclure les particularités topographiques en périphérie du site à l'étude, comme les collines environnantes atteignant des élévations d'environ 100 m, ce qui influence les corridors de vent. La zone d'intérêt (encadré rouge) correspond à un rayon de 2000 m centré sur le futur terminal Laurentia. Les bâtiments et la topographie de cette zone seront modélisés explicitement, alors que les obstructions du reste du domaine modélisé, soit la zone de champ lointain, seront prises en compte en utilisant un modèle mathématique assignant une valeur de rugosité en fonction du type de terrain.



Figure 2.1 Image satellite (Google Earth) de l'étendue du domaine, incluant la zone d'intérêt et zone éloignée (extérieur de la zone d'intérêt)

2.2 MODÈLE NUMÉRIQUE DE TERRAIN

Le modèle numérique de terrain a été construit en utilisant plusieurs sources de données :

- cartes numériques de la Ville de Québec et ses environs, incluant la Ville de Lévis (1:20000, isobathes aux 10 m) afin de représenter la topographie générale des zones du domaine les plus éloignées du port;
- relevé LiDAR fourni par la Ville de Québec;

- plans DWG fournis par l'APQ des installations existantes, spécifiant la hauteur de chaque bâtiment ou réservoir;
- plans DWG fournis par l'APQ de l'aménagement projeté (158100307-VR-001-Laurentia_200204.dwg).

Le modèle numérique de terrain prend en compte la topographie générale et les larges objets (édifices, réservoirs, piles de vrac et conteneurs, etc.) qui pourraient avoir un effet sur le vent. Les objets plus petits, comme la fourniture des rues, des petits équipements, etc., ne sont pas pris en compte.

La Figure 2.2 correspond au plan des aménagements projetés pour le secteur de Beauport du port de Québec. Les encadrés rouges illustrent la localisation de la baie de Beauport ainsi que le nouveau quai projeté) incluant les installations portuaires requises s'y rattachant. Celles-ci présentent diverses hauteurs :

- la hauteur du nouveau quai est conservée (5,36 m, dans le système géodésique);
- le projet prévoit l'aménagement d'un parc à conteneurs où la hauteur des piles est variable :
 - les piles de conteneurs vides ont une hauteur équivalente à 6 conteneurs, soit 17,4 m;
 - les piles de conteneurs pleins ont une hauteur équivalente à 6 conteneurs, soit 17,4 m;
 - les piles de conteneurs réfrigérés ont une hauteur équivalente à 2 conteneurs, soit 5,8 m.
- le nouveau terminal comprend la construction de nouveaux bâtiments :
 - le bâtiment d'administration et d'opération (17,5 m de hauteur);
 - l'atelier principal (19,8 m de hauteur);
 - l'atelier satellite (12 m de hauteur).
- le talus existant de 6 m de hauteur est prolongé par un mur-écran acoustique (hauteur variant entre 3 et 8.5 m) ;
- la présence d'un seul navire porte-conteneurs de 6500 EVP (approximativement 375 m de longueur, 50 m de largeur et 30 m de hauteur par rapport à la surface du quai)¹ est prise en compte dans le modèle de terrain.

¹ Selon commentaires de Hugues Paris, lors d'une réunion avec la FUBB

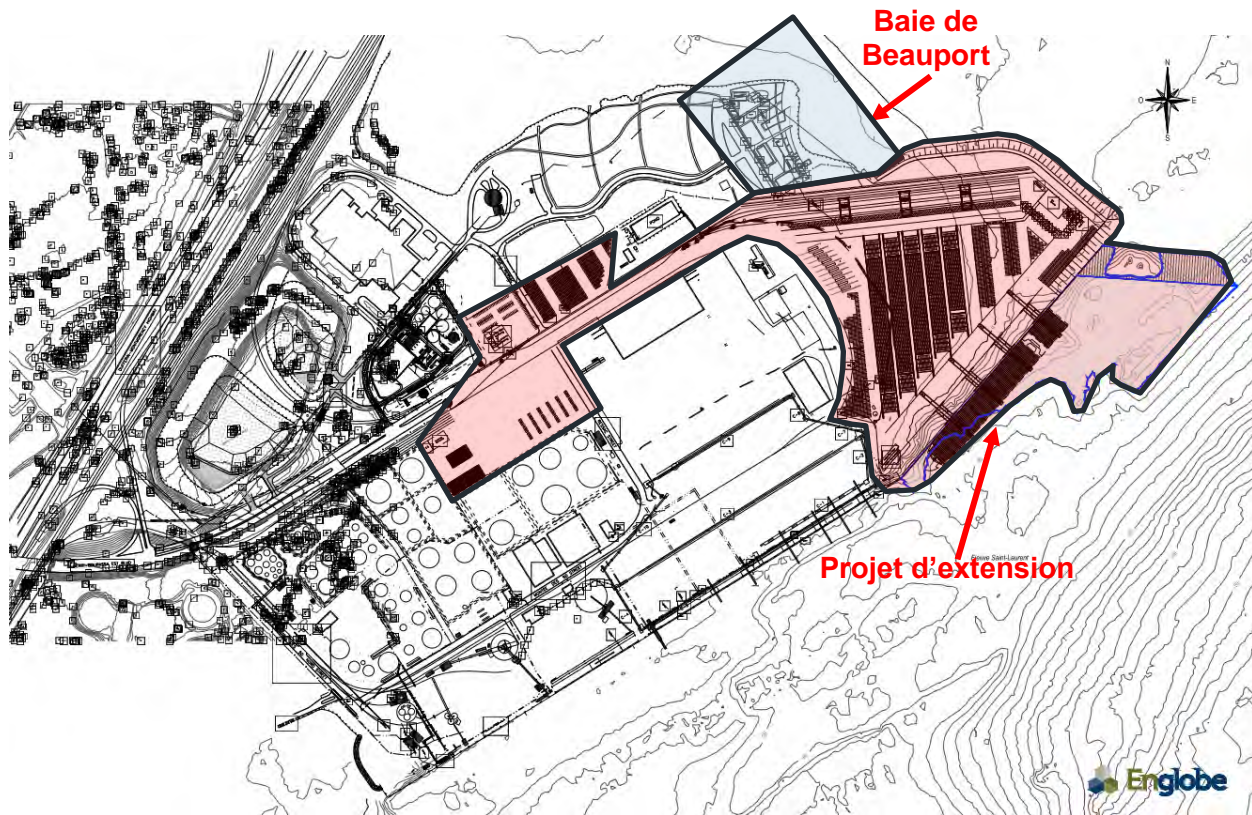


Figure 2.2 Plan des aménagements projetés du secteur de Beauport du port de Québec

De plus, les formes particulières de certains équipements, tels que les grues de quai (86 m de hauteur), les ponts roulants sur rail (32 m de hauteur), les grues sur rail en porte-à-faux (28 m de hauteur) présents à certains terminaux, les piles de vrac, etc., ont été représentées le plus fidèlement possible.

Les bâtiments environnants ont également été inclus pour tenir compte de la perturbation qu'ils ont sur le flux d'air en amont du site. Les détails des caractéristiques de ces bâtiments sont réduits plus la distance avec le site d'intérêt augmente. La Figure 2.3 représente une image aérienne de l'aménagement existant du port avec laquelle il est possible de comparer le modèle numérique de terrain pour l'aménagement existant (Figure 2.4). Il peut être observé que les réservoirs, les piles de vrac et les bâtiments ont tous été représentés. La Figure 2.5, quant à elle, représente le modèle numérique de terrain utilisé pour la modélisation de l'aménagement proposé. Les principaux éléments de l'extension du port sont illustrés en rouge.



Figure 2.3 Image aérienne de l'aménagement existant du port



Figure 2.4 Figure CAD tridimensionnelle du modèle utilisé pour représenter l'aménagement existant du port

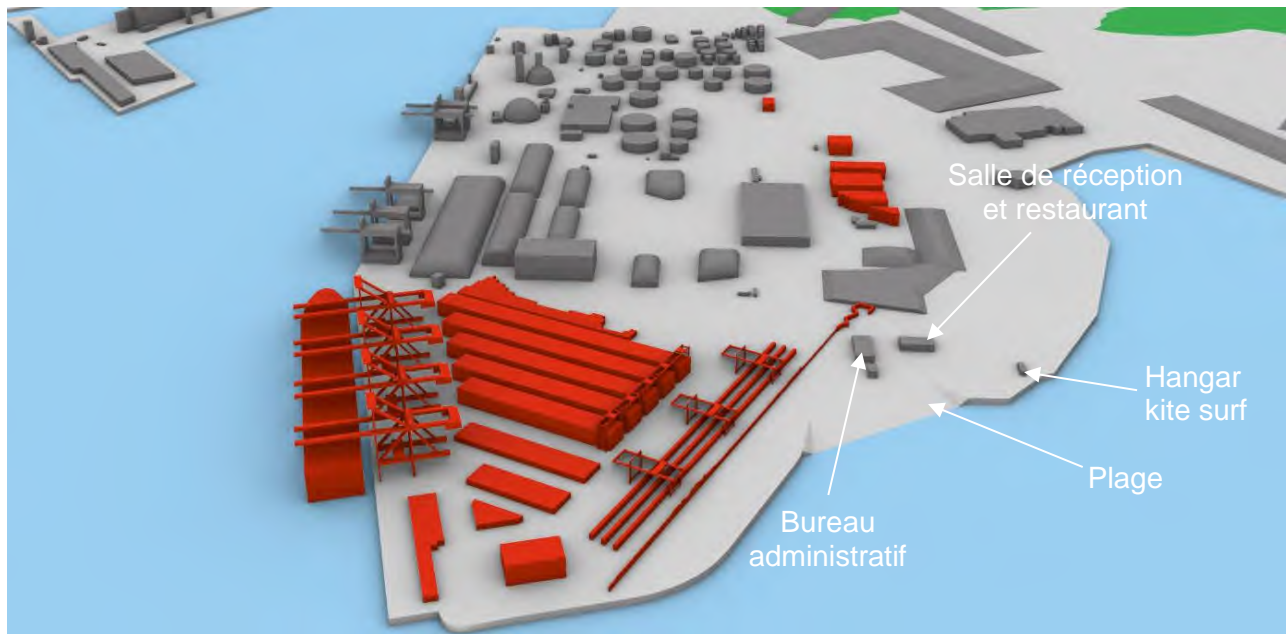


Figure 2.5 Figure CAD tridimensionnelle du modèle utilisé pour représenter l'aménagement projeté du port

2.3 SCÉNARIOS DE MODÉLISATION

Des vents 8 et 15 nœuds (4 à 8 m/s) sont jugés intéressants pour la planche à voile (AKVQ, 2017 et validation en décembre 2019). En période estivale, les débutants peuvent profiter du plan d'eau dès que les vents sont supérieurs à 4 m/s. Des vents d'intensité supérieure sont intéressants pour les plus expérimentés, à partir de 8 m/s, mais idéalement plus élevés. Des intensités de vent de 4 m/s et de 10 m/s à une élévation de référence de 10 m au-dessus du niveau d'eau seront donc retenues pour les différents scénarios de modélisation.

Les données horaires de la station de Beauport de 2003 à 2020 ont été utilisées dans le cadre de cette étude. Seules les données de vents durant la période d'utilisation du plan d'eau, soit entre **mai et novembre**, et des conditions de vents durant le jour uniquement (**6 :00 à 20 :00**) ont été retenues pour l'analyse statistique. Dans les études précédentes, les données de la station de l'aéroport de Québec avaient plutôt été utilisées, vu le nombre plus élevé d'années de suivi. De plus, nos analyses précédentes indiquaient des comportements similaires aux deux stations de vent. Cependant, la station de Beauport possède maintenant plus de 17 années de suivi, ce qui en fait une longue série, plus représentative des changements récents du climat. Il est d'autant plus de notre intérêt d'utiliser des mesures de vents le plus près possible de la zone d'intérêt.

Des méthodes d'estimation du maximum de vraisemblance ont été utilisées pour ajuster les données à une distribution de probabilité de Weibull à deux paramètres, à savoir :

$$P(U) = pe^{-\frac{U}{c}k}$$

où les coefficients p , c et k sont respectivement la probabilité de la direction du vent à subvenir (p), le paramètre de dispersion (c) et le paramètre de forme (k).

À partir de cette analyse statistique, il sera possible de déterminer la probabilité qu'un seuil de vitesse ($V=4$ m/s, 10 m/s) soit dépassé.

La Figure 2.6 illustre la rose des vents pour la période d'utilisation du plan d'eau à la baie de Beauport. Il peut être observé que les vents du secteur ouest-sud-ouest (OSO) prévalent 39 % du temps, alors que 27 % du temps, le vent provient du secteur est-nord-est (ENE).

Les vents les plus intéressants pour les véliplanchistes et kitesurfers proviennent de ONO et de l'ENE (mémoire du FUBB, document). L'intensité et la stabilité des vents de l'OSO sont, en conditions existantes, déjà jugés par les utilisateurs comme étant affectés par les bâtiments et autres infrastructures du port (rencontre de la FUBB, 14-11-2019).

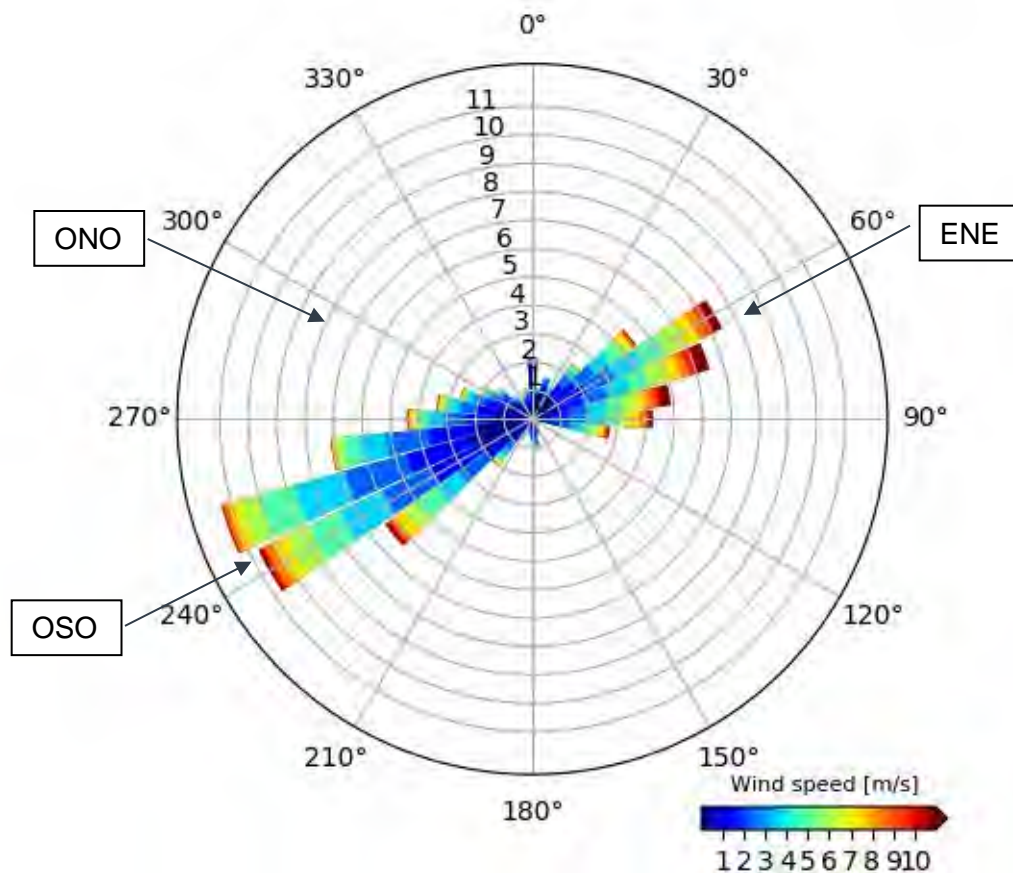


Figure 2.6 Rose des vents à la station Beauport de 2003-2020, données retenues uniquement de mai à novembre entre 6 :00 et 20 :00

La provenance de l'ouest-nord-ouest (ONO), dont la fréquence d'occurrence est de 12 %, est aussi analysée. Ces secteurs incluent les directions avoisinantes immédiates, par exemple, la direction OSO couvre les statistiques des directions allant du sud-ouest à l'ouest. La Figure 2.7 illustre les trois directions de vent par rapport au domaine d'étude.



Figure 2.7 Photo aérienne illustrant les trois provenances de vent étudiées

12 scénarios ont été simulés, soit toutes les combinaisons des facteurs suivants :

- 2 intensités de vent :
 - 4 m/s, vitesse de vent favorable aux débutants;
 - 10 m/s, vitesse de vent recherchée par les utilisateurs plus expérimentés.
- 3 directions de vent :
 - ENE;
 - OSO;
 - ONO.
- 1 niveau d'eau :
 - basse mer inférieure de marée moyenne (BMIMM), soit -1,5 m dans le système géodésique.
- 2 géométries (actuelle et future).

Il est important de noter que la géométrie future inclut la présence d'un navire amarré afin de représenter le scénario engendrant la modification la plus importante au niveau du régime des vents.

Le Tableau 2.1 résume tous les scénarios étudiés.

Tableau 2.1 Scénarios modélisés

SCÉNARIO	VITESSE DU VENT	AMÉNAGEMENT	DIRECTION DU VENT	NIVEAU D'EAU
1	4 m/s	Existant	ENE (67°)	BMIMM (Basse mer inférieure de marée moyenne)
2			OSO (247.5°)	
3			ONO (292.5°)	
4		Proposé	ENE (67°)	
5			OSO (247.5°)	
6			ONO (292.5°)	
7	10 m/s	Existant	ENE (67°)	
8			OSO (247.5°)	
9			ONO (292.5°)	
10		Proposé	ENE (67°)	
11			OSO (247.5°)	
12			ONO (292.5°)	

3 OUTILS DE MODÉLISATION

3.1 LOGICIEL DE MODÉLISATION

Dans le cadre de cette étude, le logiciel OpenFOAM (Engys version HelyxCORE-3.0.1) qui est reconnu mondialement dans le domaine du CFD (www.openfoam.com), a été utilisé pour effectuer ces calculs. Il a fait l'objet de nombreuses validations dans le domaine de la modélisation des environnements éolien externes, tel que pour l'étude des bâtiments (Li et al., 2018; Dadioti et al., 2015). Il est possible de trouver de nombreuses publications sur «OpenFOAM» dans les articles du Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics.

Depuis environ 3 ans, WSP a délaissé progressivement le modèle STARR-CMM+ (utilisé précédemment dans ce projet) pour prioriser l'utilisation d'OpenFoam en raison de sa plus large utilisation dans les universités à travers le monde, de son prix d'acquisition et de maintenance plus faible et de la vaste littérature disponible portant sur les études de vent. De plus, il est plus facile de recruter des professionnels ayant des connaissances d'OpenFoam. Le modèle a été validé par WSP au cours des dernières années, notamment à partir d'essais en soufflerie, pour des problématiques d'aérodynamisme externe, tel que le présent mandat. Plus d'une dizaine de mandats similaires ont été réalisés par WSP durant cette période.

3.2 DOMAINE MODÉLISÉ ET MAILLAGE

Le site d'intérêt s'étend sur 4 km dans l'axe horizontal et atteint jusqu'à 100 m en élévation. Le domaine modélisé est centré sur la baie de Beauport et couvre une distance de 16 km dans l'axe du fleuve Saint-Laurent et une distance de 16 km perpendiculaire à cet axe. Le domaine inclut tous les principaux éléments topographiques qui peuvent influencer la distribution des vents, tel que le fleuve Saint-Laurent, ses embranchements et ses falaises escarpées, l'île d'Orléans, les vallées des principales rivières, dont la Saint-Charles qui se déversent dans le port.

L'*European Cooperation in Science and Technology*, le COST (Franke, 2007), suggère que la zone d'influence d'un bâtiment est d'une distance minimale de 10 fois la hauteur du bâtiment étudié (H_n). L'Architectural Institute of Japan (AIJ, Tominaga et al 2008) recommande plutôt une distance de 5 fois la hauteur (H_n).

Tous les bâtiments et infrastructures en élévation qui se trouvent à moins d'une distance de $10H_n$ ont été représentés dans le modèle numérique. En fait, toutes les structures imposantes présentes sur les terrains du port de Québec, qui couvrent une distance de plus de 1 km vers l'ouest à partir de l'extrémité du terminal existant, ont été représentés. Puisque tous les bâtiments existants et projetés ne dépassent pas une hauteur de 86 m et puisque ceux-ci ont été inclus dans le modèle numérique de terrain, le modèle utilisé respecte les recommandations de Franke (2007) et de Tominaga et al. (2008).

En altitude, le modèle s'étend sur hauteur $4,5 H_n$ au-dessus de la plus haute structure (avec $H_n = 86$ m). Puisque seulement quelques structures ouvertes ont une hauteur de 86 m (grues) par rapport à la majorité des bâtiments et des empilements de conteneurs qui ont moins de 20 m de haut, on peut considérer que le blocage au niveau de la plus haute structure est faible. Franke (2007) indique que dans de telles conditions, une hauteur de $4 H_n$ est suffisante.

Chaque simulation utilise des méthodes numériques pour résoudre les équations gouvernantes de la mécanique des fluides autour du site d'intérêt. La méthode CFD utilisée exige que ce volume soit divisé en volumes plus petits ou en maillage. Ces mailles sont nominalelement hexaédriques et réduisent leur taille d'environ 25 m dans le champ lointain à 0,1 m près des différents éléments de l'aménagement projeté, afin de résoudre avec assez d'exactitude l'écoulement de fluides. De minces couches de cellules prismatiques ont été ajoutées au sol et aux bâtiments pour résoudre les grands gradients de l'écoulement près des obstructions solides. Le nombre total de cellules s'élève à ~41 millions.

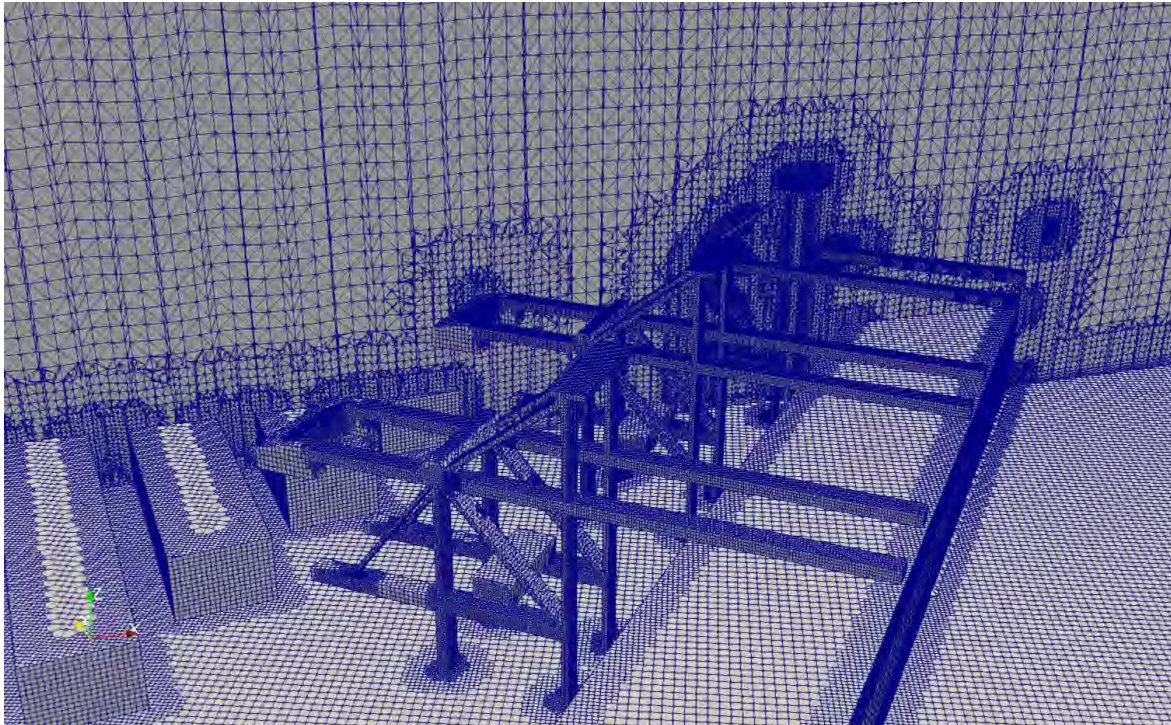


Figure 3.1 Section du maillage utilisée dans le cadre de cette étude

Une étude d'indépendance du maillage a été réalisée pour déterminer la dépendance de la solution par rapport au maillage utilisé dans l'étude. En pratique, de nombreux paramètres sont définis lors de la construction du maillage, mais ils dépendent tous d'une taille globale de cellules. Par conséquent, pour évaluer efficacement l'indépendance des mailles, une simulation a été effectuée sur trois maillages où la taille de base a été réduite de 20% à chaque fois.

Les Figure 3.2 et Figure 3.3 illustrent la comparaison entre la magnitude de vitesse (U/U_{ref}) et l'énergie cinétique turbulente (k/U^2) le long d'une ligne pour différentes densités de maillage. L'abscisse des graphiques ci-dessous représente la position relative (X) sur la longueur totale de la ligne du maillage (D). Il peut être conclu que les maillages fin et moyen produisent des résultats similaires, ce qui signifie que l'indépendance de la densité du maillage est atteinte avec le maillage moyen. Ce dernier peut donc être utilisé avec confiance dans le cadre de cette étude.

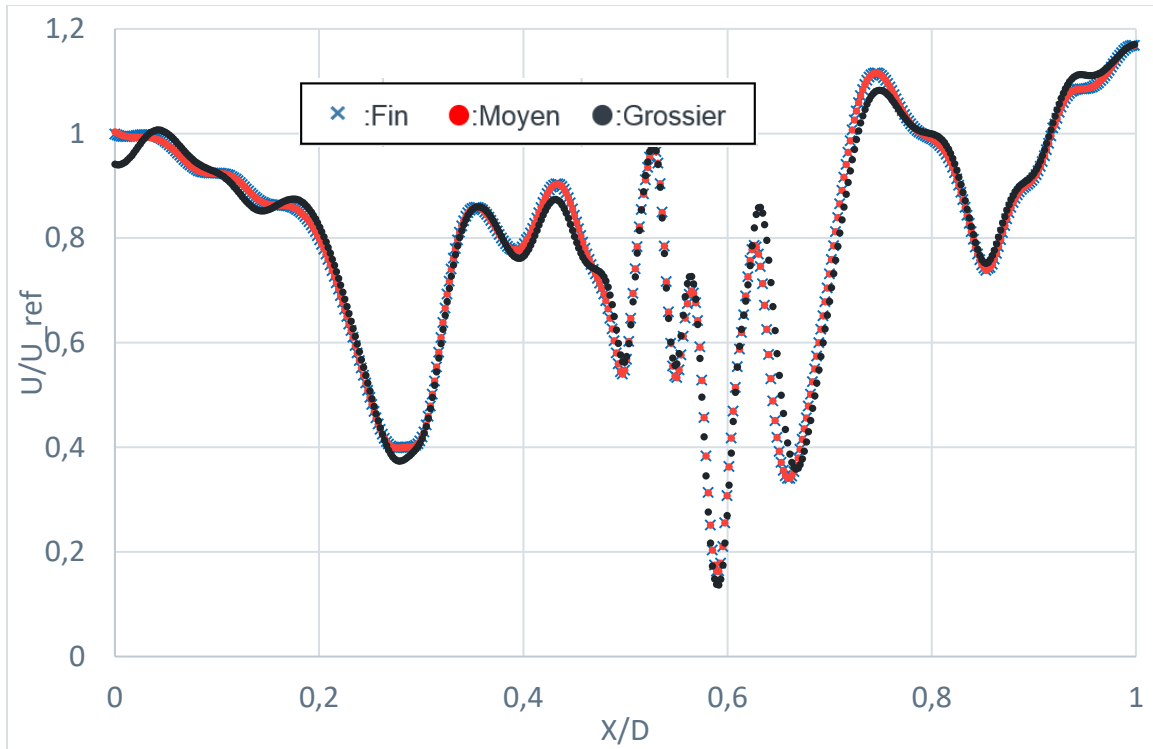


Figure 3.2 Comparaison de la magnitude de la vitesse pour différentes densités de maillage

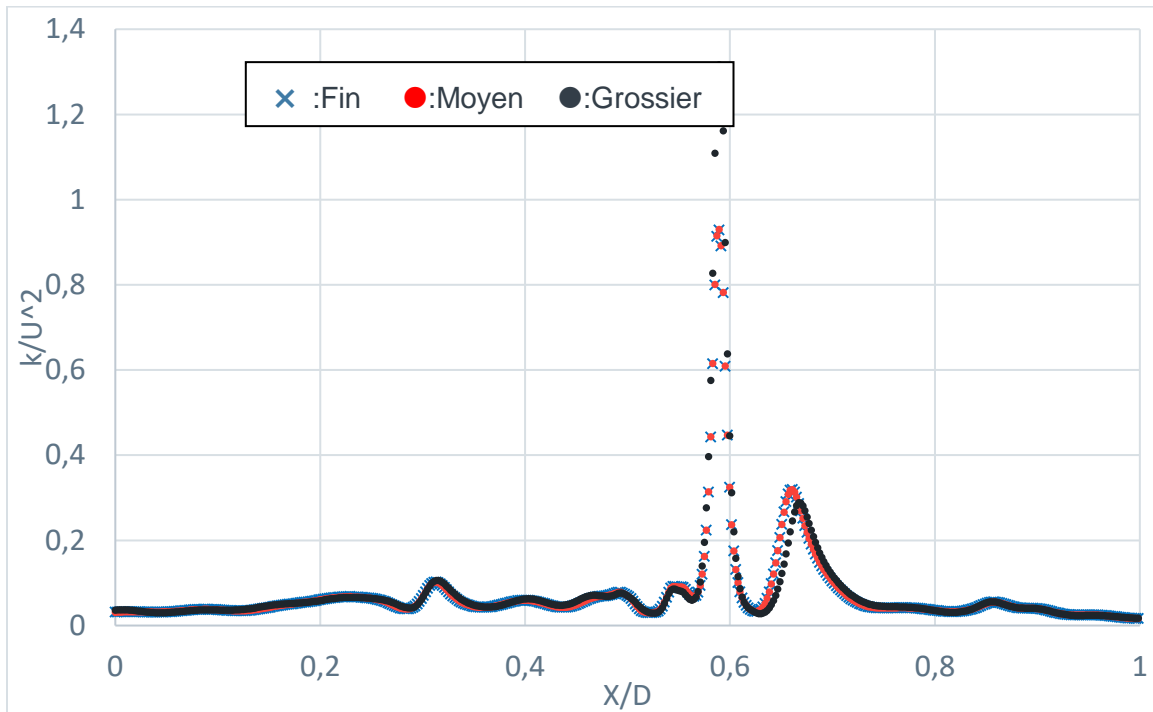


Figure 3.3 Comparaison l'énergie cinétique turbulente pour différentes densités de maillage

3.3 CONDITIONS LIMITES

La zone d'intérêt est construite au centre du domaine. Une condition « non-slip » aux limites est appliquée au sol et aux bâtiments et le champ d'écoulement est explicitement modélisé autour des obstacles. Dans un rayon de 500 m du centre du terminal, la rugosité des bâtiments et du terrain a une rugosité de $z_0 = 0.02m$. Dans la zone de champ lointain (far-field), les obstructions sont estimées en utilisant un modèle mathématique qui ajuste le champ d'écoulement pour approximer la rugosité de l'environnement avoisinant. Les valeurs de rugosité varient entre $z_0 = 0.005 \rightarrow 0.3$, dépendamment de la classification de type de terrain (ESDU) (Jensen, 1984). La sortie et les côtés du domaine sont prolongés d'une distance suffisante pour que les gradients aux limites soient minimales et que le taux de blocage soit maintenu aussi bas que possible. Une condition de glissement est imposée aux faces parallèles aux flux, tandis que la face aval est représentée par une sortie de pression à gradient nul.

Des conditions frontières atmosphériques sont appliquées à l'entrée du modèle en prenant compte un profil logarithmique, dont la forme est ajustée en fonction des conditions du site en amont. Cette étape a été réalisée par analyse visuelle du terrain en amont afin d'obtenir une rugosité aérodynamique représentative qui a ensuite été utilisée dans la formulation ABL (atmospheric boundary layer). La vitesse et la turbulence spécifiées à l'entrée sont spécifiques à la topographie et au terrain du site.

Vitesse à l'entrée

Le profil de vitesse est dépendant sur la hauteur (z) :

$$u(z) = \frac{u_\tau}{\kappa} \ln \frac{z}{z + z_0}$$

où :

$$u_\tau = \frac{\kappa U_{ref}}{\ln \left(\frac{z_{ref} + z_0}{z_0} \right)}$$

où u_τ est la vitesse de friction, $\kappa = 0,41$ est la constante de von Karman et z_0 est la hauteur de rugosité, qui est dépendant sur la hauteur moyenne du terrain urbain entourant le site à l'étude, $Z_{ref} = 10$ m et $U_{ref} = 4$ et 10 m/s.

Le graphique suivant présente la forme de l'équation logarithmique de la vitesse relative en fonction de l'altitude.

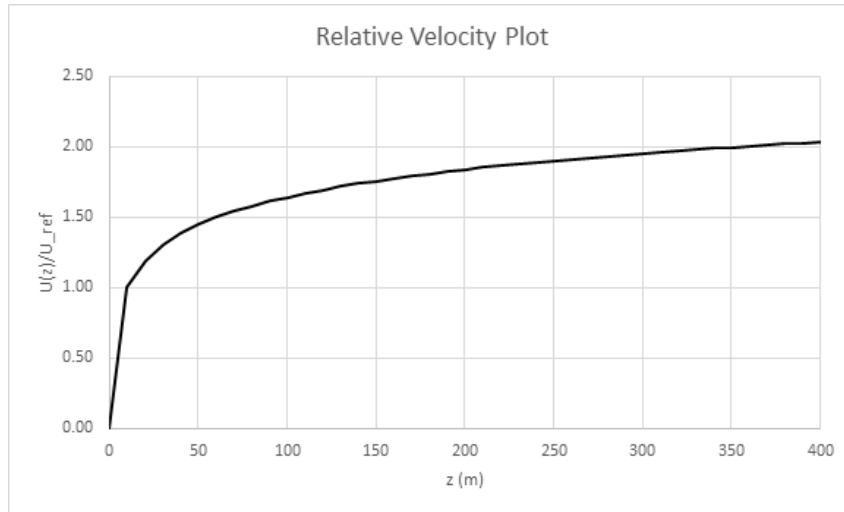


Figure 3.4 Vitesse relative à l'entrée du modèle en fonction de l'altitude

Turbulence à l'entrée

La turbulence à la frontière amont (entrée) est définie par le modèle k-epsilon :

$$k = \frac{u_t^2}{\sqrt{C_\mu}}$$

$$\epsilon = \frac{u_t^3}{\kappa(z + z_0)}$$

Où $\kappa = 0.41$ (constante de Von Karman), z est la hauteur au-dessus du sol, $z_{ref} = 10m$, z_0 est la rugosité à l'entrée du modèle (varie entre 0,005 et 0,3 selon la classification du terrain (ESDU), qui varie en fonction de la direction, et $U_{ref} = 4$ ou 10 m/s.

Le profil de la turbulence (intensité de la turbulence) en fonction de l'altitude est ajusté en fonction de la topographie et de la direction du vent. À titre d'exemple, la figure suivante présente le profil de turbulence imposé à l'entrée du modèle pour la direction ouest-sud-ouest.

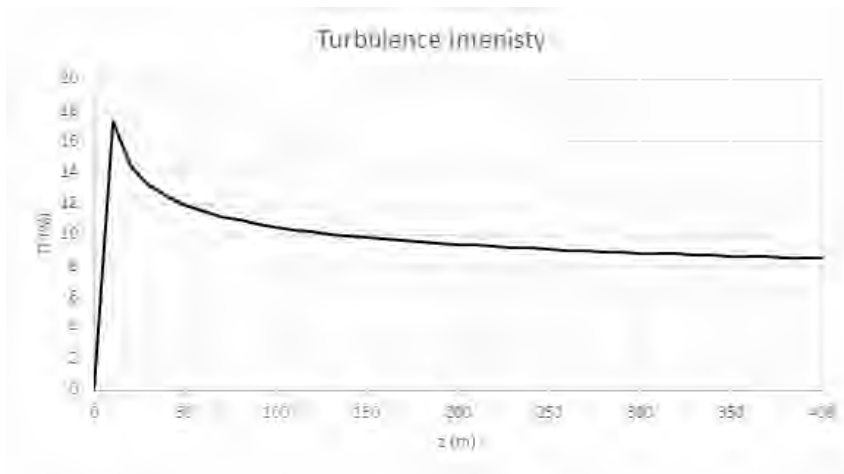


Figure 3.5 Intensité de la turbulence en fonction de l'altitude

3.4 MODÈLES DE TURBULENCE

Chaque simulation utilise des méthodes numériques pour résoudre les équations régissant la mécanique des fluides autour d'un site d'intérêt. Ces équations de Navier-Stokes sont un ensemble d'équations différentielles partielles décrivant la conservation de la masse et de la quantité de mouvements dans un fluide. Lorsque les champs moyens sont d'intérêt, ces équations peuvent être moyennées dans le temps en utilisant une méthode connue sous le nom des équations de « Reynolds-Averaged Navier-Stokes (RANS) ». Ce sont les équations résolues dans le cadre de cette étude. Dans les équations de RANS, l'instabilité du flux est modélisée à l'aide de relations mathématiques connues sous le nom de modèles de fermeture ou modèles de turbulence. Les modèles de turbulence sont considérés comme des approximations d'ingénierie, et comme toute hypothèse utilisée dans un modèle (physique ou numérique), un écart par rapport à la réalité sera introduit. Pour les flux autour des corps non profilés, les méthodes RANS fonctionnent généralement bien autour des zones de séparation à haute vitesse, mais ont du mal à prédire avec précision les régions d'accélération du vent. Cependant, les simulations utilisant ces approximations sont en accord étroit avec les expériences, à condition qu'une résolution de grille suffisante soit maintenue. Dans ce cas, la version de la théorie renormalisée (RNG) du modèle k- ϵ , qui introduit des équations pour l'énergie cinétique turbulente et le taux de dissipation turbulente, est utilisée comme modèle de turbulence.

Les valeurs de turbulence sont définies sur la base de la formulation de l'énergie cinétique de turbulence et de taux de dissipation de la turbulence de Richards et Hoxey (1993):

$$k = \frac{u_{\tau}^2}{\sqrt{C_{\mu}}}, \quad \epsilon = \frac{u_{\tau}^3}{\kappa(z+z_0)}$$

où u_{τ} est la vitesse de friction, z_0 est la rugosité aérodynamique au sol et C_{μ} et κ (constante de von Karman) sont des constantes.

L'algorithme SIMPLE, tel qu'implémenté dans le logiciel OpenFOAM (Engys version HelyxCORE-3.0.1), est utilisé pour résoudre itérativement les équations. La discrétisation spatiale était de second ordre en amont pour les termes convectifs et une méthode hybride Gauss/moindres carrés (Least Squares) sera utilisée pour les gradients secondaires. La solution a été considérée comme convergente lorsque les résidus, c'est-à-dire le changement relatif d'une itération à la suivante, a été de 10^{-5} pour le momentum et 10^{-4} pour la pression.

4 RÉSULTATS

La section suivante présente les résultats des six cas de simulations pour les deux géométries étudiées. Les résultats sont classés par direction, puis par intensité du vent. La distribution spatiale de la vitesse du vent, ainsi que le nombre d'heures pour lesquelles les vitesses de vent (4 m/s et 10 m/s) sont dépassées, sont présentés pour l'ensemble du secteur du port incluant le secteur de la plage de la baie de Beauport. Deux modèles d'élévation ont été élaborés, pour les aménagements existants et projetés.

De plus, pour chaque scénario, une comparaison des résultats entre l'aménagement existant et l'aménagement proposé a été réalisée. Cette comparaison est présentée sous forme de pourcentage de changement de la vitesse du vent ainsi qu'en différence du nombre d'heures excédant la vitesse du vent.

Puisque les impacts les plus importants sur la vitesse de vent sont observés près du sol, notre analyse détaillée a été réalisée à partir des résultats de la vitesse extraite à 2 m au-dessus de l'élévation du sol ou de l'eau (voir Figure 4.1 à Figure 4.6). Logiquement, il y aura toujours une réduction de vitesse là où se trouvent les bâtiments et infrastructures sur le nouveau port, étant donné que leur présence créera indéniablement des obstacles aux corridors de vent actuels et du fait que la hauteur du sol a été augmentée de plusieurs mètres (différence de 6,9 m entre le niveau d'eau et l'élévation du quai).

Les hauts fonds situés au nord de la baie de Beauport sont non navigables à marée basse et restreignent naturellement l'aire de navigation. Ceux-ci sont identifiés sur les figures de résultats de modélisation en superposant la limite de la basse mer inférieure de marée moyenne (BMIMM). Des axes indiquant la distance vers le large et vers le nord sont également superposés afin de faciliter l'évaluation des distances. Le parc de la Pointe, sur la rive nord de la baie, est également identifié afin de faciliter le repérage par les utilisateurs qui utilisent souvent ce repère pour naviguer. Une distance de 650 m est identifiée sur les figures de résultats qui montrent l'espace disponible entre la future limite sud de la plage (limitée par les nouvelles installations portuaires) et la limite de la zone navigable au nord.

Enfin, l'impact des nouveaux aménagements sur la turbulence des vents est évalué pour les trois provenances de vents les plus importantes pour les utilisateurs, soit celles de l'ENE, du OSO et du ONO.

4.1 VITESSE DU VENT

Les Figure 4.1 à Figure 4.6 illustrent les résultats obtenus pour les différentes directions de vent et pour des conditions de 4 m/s et 10 m/s à 10 m de hauteur à l'entrée du modèle. À la première ligne de chaque figure, le paramètre illustré est la vitesse du vent sur l'ensemble du domaine. À la deuxième ligne, les résultats sont plutôt présentés en termes du nombre d'heures où la vitesse du vent est dépassée.

Pour plus de clarté, une version agrandie des figures de résultat est présentée à l'annexe A.

4.1.1 SCÉNARIOS DE L'EST-NORD-EST (ENE)

Les vents en provenance de l'ENE sont présents environ 27 % du temps durant la période d'utilisation pour la navigation de plaisance (définie à la section 2.3). Ils proviennent du nord de l'île d'Orléans et traversent la baie de Beauport avant d'atteindre la plage, puis les infrastructures portuaires. En conditions existantes et un vent imposé à l'entrée du modèle de 4 m/s, la vitesse du vent varie autour de 2,5 à 3,0 m/s près de la plage. Pour un vent imposé à l'entrée du modèle de 10 m/s, elle est de 6 à 7 m/s. Avec l'ajout du Terminal Laurentia, une augmentation de l'ordre de 5 à 10% est perçue pour le secteur près de la plage (Figure 4.1 et Figure 4.2). Cette variation se traduit en une augmentation allant jusqu'à 0,3 m/s pour un vent imposé de 4 m/s, et jusqu'à 0,7 m/s pour un vent imposé de 10 m/s. Ceci est principalement causé par l'ajout du mur au sud de la baie de Beauport, qui fait diverger le vent et en augmente sa vitesse.

Cette augmentation de l'intensité des vents amène un faible accroissement du nombre d'heures où les conditions minimales de pratique de la voile sont présentes sur une année : 4 à 8 heures de plus pour les débutants (vitesse de 4 m/s) et environ 15 heures pour les plus expérimentés (vitesse de 10 m/s). Pour le secteur de la plage, l'impact est quasi imperceptible.

Les impacts des nouvelles installations sur les vents dans la zone de pratique des sports de la voile de la baie de Beauport (zone au nord-est de la plage) sont négligeables pour un vent en provenance de l'est-nord-est. L'impact se limite donc à la présence directe des installations portuaires. Près de la plage, la zone de navigation disponible au nord-est est de l'ordre de 650 m et s'élargit graduellement vers le large en suivant les installations. À l'extrémité du terminal, la largeur est d'environ 900 m puis revient à sa pleine largeur.

4.1.2 SCENARIOS DE L'OUEST-SUD-OUEST (OSO)

Les vents en provenance de l'OSO sont dominants et présents environ 37% du temps durant la période d'utilisation pour la navigation de plaisance (définie à la section 2.3). Pour cette direction, les vitesses de vent près de la plage en conditions existantes sont très variables (près d'être nulles à certains endroits), mais s'intensifient rapidement à 150 m de la plage. En conditions existantes et un vent imposé à l'entrée du modèle de 4 m/s, la vitesse du vent varie de 1 à 3 m/s près de la plage. Pour un vent imposé de 10 m/s, elle est de 4 à 6 m/s. L'implantation des nouvelles installations engendre des augmentations variables de 10 à 50% devant la plage, mais qui sont essentiellement attribuables à de léger déplacement de corridors de vent (Figure 4.3 et Figure 4.4). Ces variations se traduisent en des augmentations ponctuelles jusqu'à 1,5 m/s et 3 m/s respectivement pour un vent imposé à l'entrée du modèle de 4 m/s et de 10 m/s..

L'impact le plus important mesuré pour cette direction se trouve à l'est des nouvelles infrastructures portuaires. La Figure 4.3 et la Figure 4.4 présentent la zone potentiellement impactée qui s'étend sur 2 500 m à l'est du nouveau terminal, où des réductions de vitesses de plus de 10% sont observées. Ce pourcentage de réduction de la vitesse atteint jusqu'à 75% près de l'extrémité est du terminal et jusqu'à 40% à 750 m de l'extrémité. En conditions existantes et un vent imposé à l'entrée du modèle de 4 m/s, la vitesse du vent est de 3 m/s jusqu'à 750 m à l'est du terminal et subit donc une réduction jusqu'à 2,25 m/s en conditions futures. Pour un vent imposé de 10 m/s, la vitesse passe de 8,0 à 2,0 m/s à l'extrémité est du terminal et à 4,8 m/s à 750 m. La raison de cette réduction de vitesse est que le nouveau terminal, en particulier ses équipements, est significativement plus élevé que la plage et le plan d'eau environnants. Les vents provenant des terres sont déviés en hauteur par la présence des

grues et des piles de conteneurs. En raison de leur inertie, les vents ont besoin d'une longue distance pour revenir au niveau de l'eau.

Cette réduction de vitesse à l'est des futures installations se traduit aussi en termes du nombre d'heures où les vitesses de vents excèdent 4 m/s et 10 m/s (intensités minimales de vent pour la pratique de la voile par les débutants et les plus expérimentés). À 750 m de l'extrémité du terminal, une réduction d'environ 100 heures est observée pour les deux vitesses de vent, alors qu'en conditions existantes, on pouvait compter sur environ 200 heures.

Les impacts sont négligeables dans la zone de navigation de plaisance au nord-est de la plage de la baie de Beauport. Par contre, au sud, la réduction importante de la vitesse du vent dans le prolongement des installations portuaires vers l'est-nord-est amène une coupure au large du corridor favorable à la navigation de plaisance.

4.1.3 SCENARIOS DE L'OUEST-NORD-OUEST (ONO)

Les vents en provenance de l'ouest-nord-ouest (ONO) sont peu fréquents et sont présents environ 12% du temps durant la période de navigation. En conditions existantes, les vents près de la plage sont très similaires à ceux rencontrés au centre de la baie. Une réduction des vents allant jusqu'à 25% dans les zones proches de la plage est observée, mais sur une bande très restreinte le long de la plage. En conditions existantes et un vent imposé à l'entrée du modèle de 4 m/s, la vitesse du vent varie de 1 à 2,5 m/s près de la plage, et subit donc une réduction jusqu'à 0,6 m/s en conditions futures. Pour un vent imposé de 10 m/s, la vitesse du vent en bordure de la plage varie de 4 à 6 m/s et est réduite de 1,5 m/s pour l'aménagement projeté. D'un point de vue statistique, le nombre d'heures où les vents sont supérieurs à 4 m/s diminue de 10 à 15 heures dans cette zone. Pour un vent de 10 m/s, le nombre d'heures diminue de 5 heures. Pour le secteur de la plage, l'implantation du nouveau terminal aura donc peu d'influence sur les activités nautiques de la baie de Beauport.

L'impact observé le plus important est cependant au sud-est des nouvelles infrastructures portuaires. La zone potentiellement impactée s'étend sur 1500 m pour les deux vitesses de référence pour la navigation de plaisance (définie à la section 2.3) de 4 m/s et de 10 m/s (Figure 4.5 et Figure 4.6). Ceci est dû à l'obstruction qu'engendre les nouvelles installations au niveau du port, soit les navires et les conteneurs, qui dévient les courants d'air plus haut en altitude.

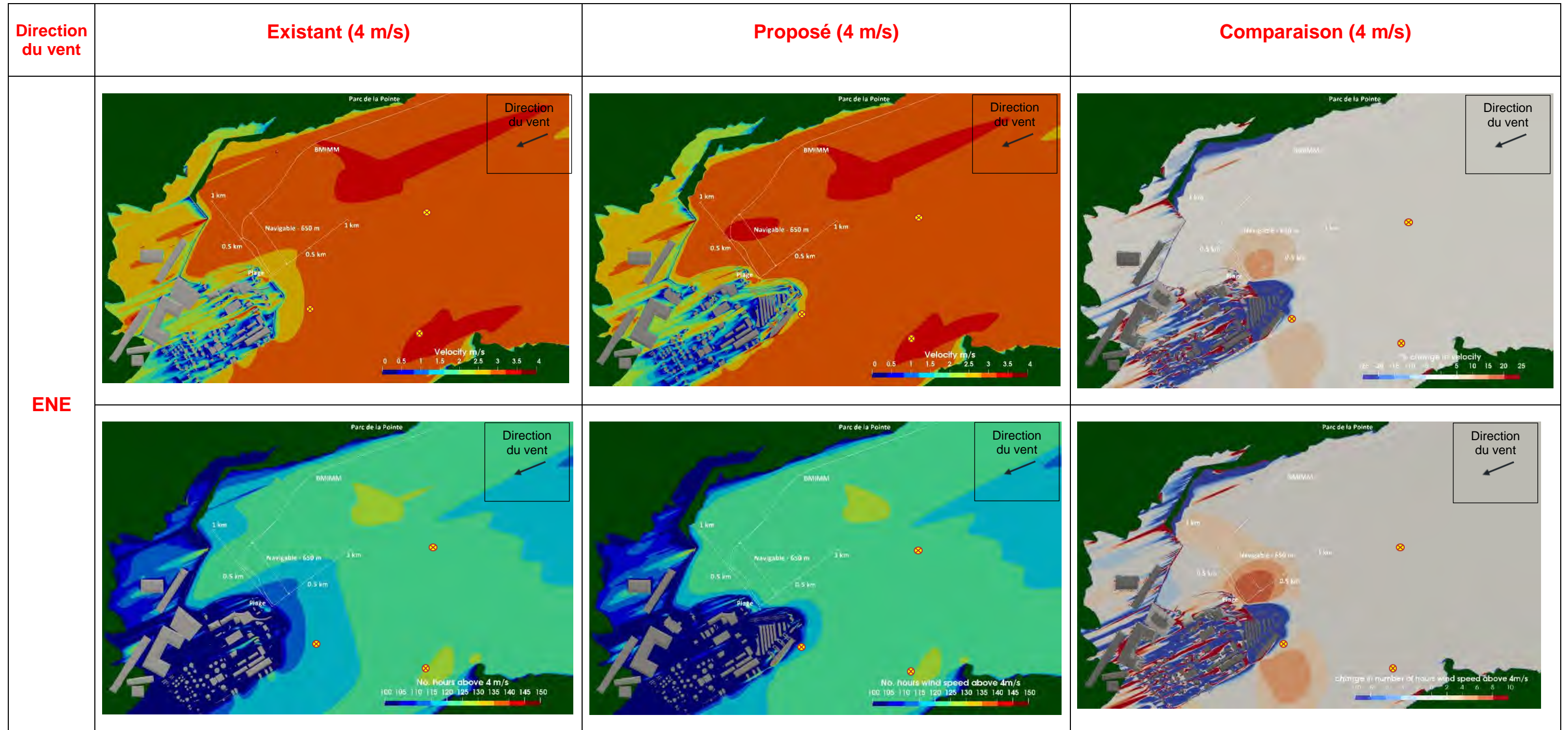


Figure 4.1 Résultats d'un vent de 4 m/s à 2 m au-dessus du plan d'eau pour les scénarios de vent provenant de l'est-nord-est au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

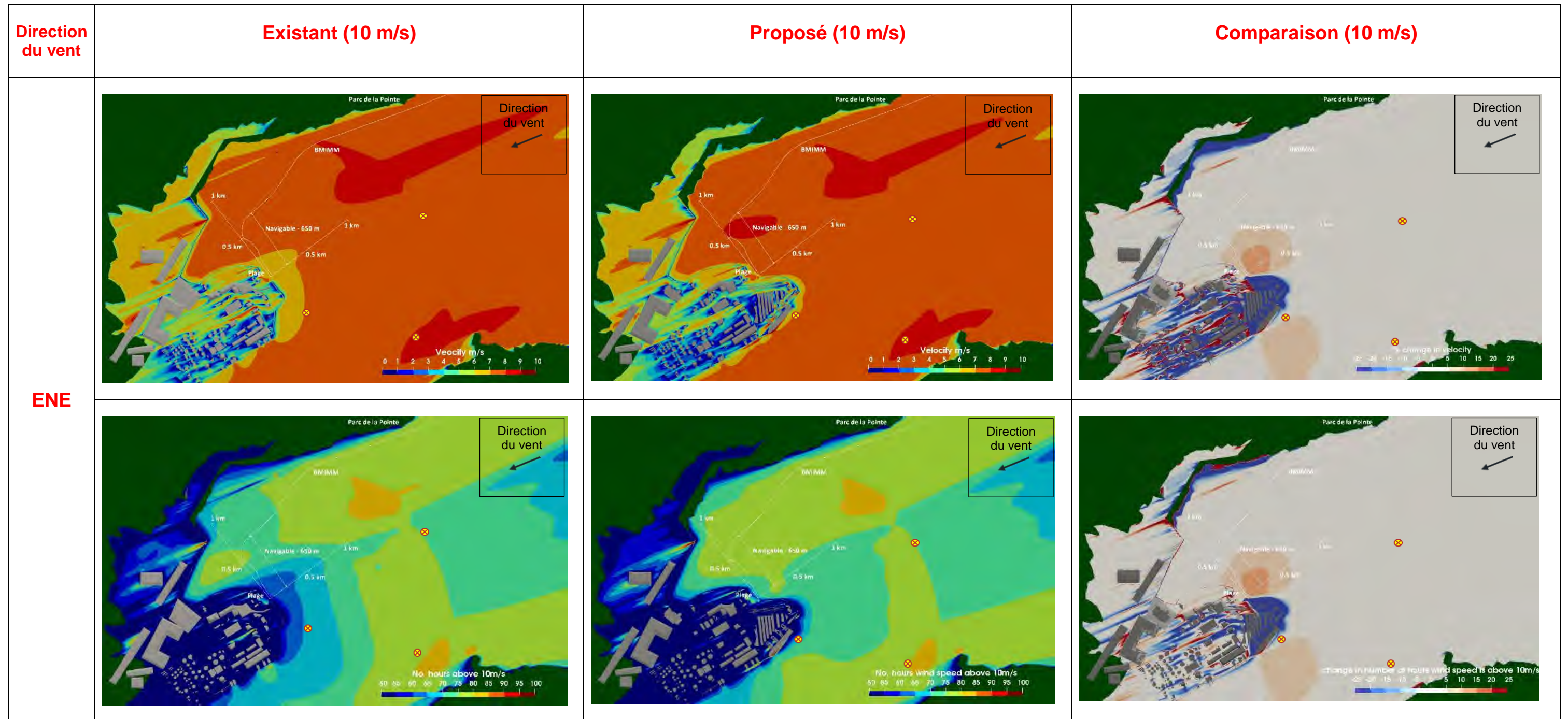


Figure 4.2 Résultats d'un vent de 10 m/s à 2 m au-dessus du plan d'eau pour les scénarios de vent provenant de l'est-nord-est au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

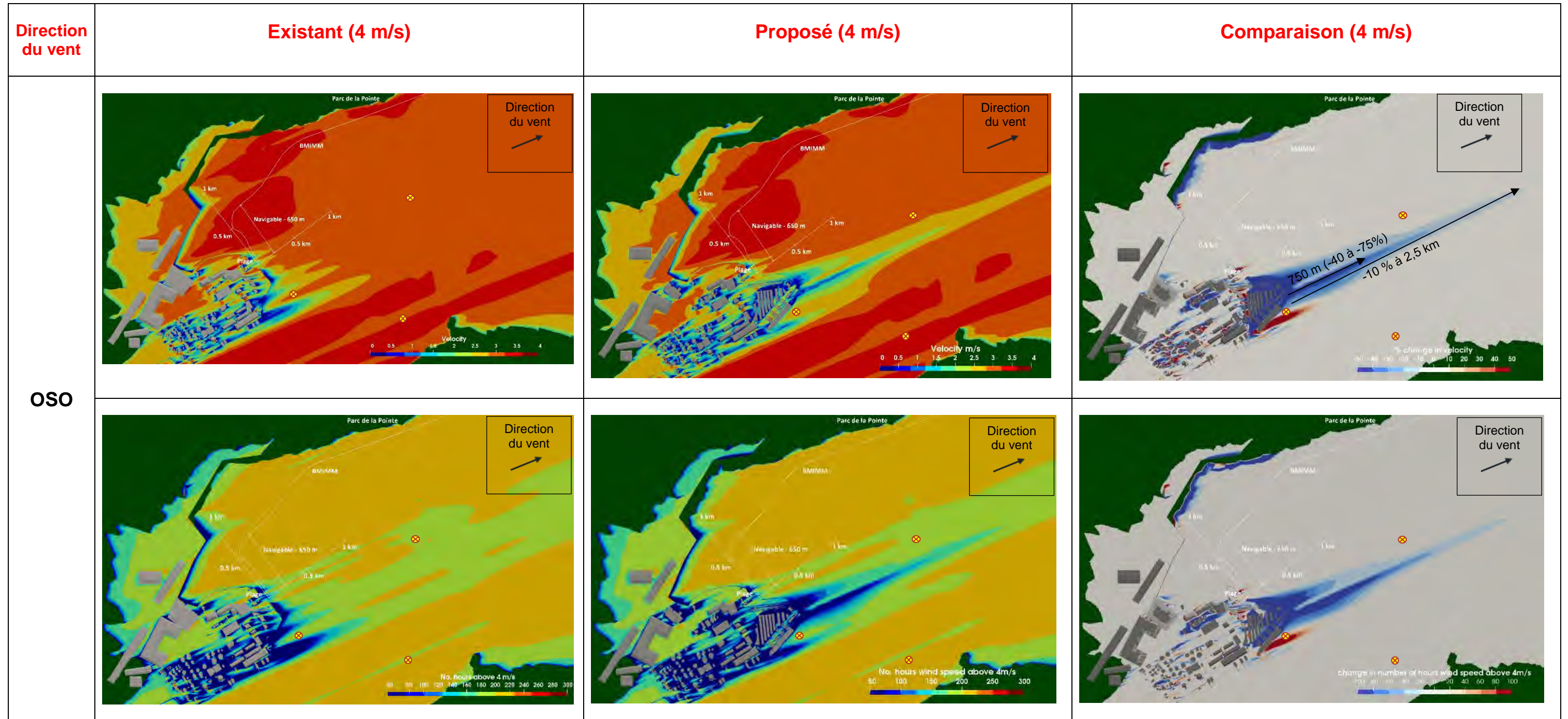


Figure 4.3 Résultats d'un vent de 4 m/s à 2 m au-dessus du plan d'eau pour les scénarios de vent provenant de l'ouest-sud-ouest au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

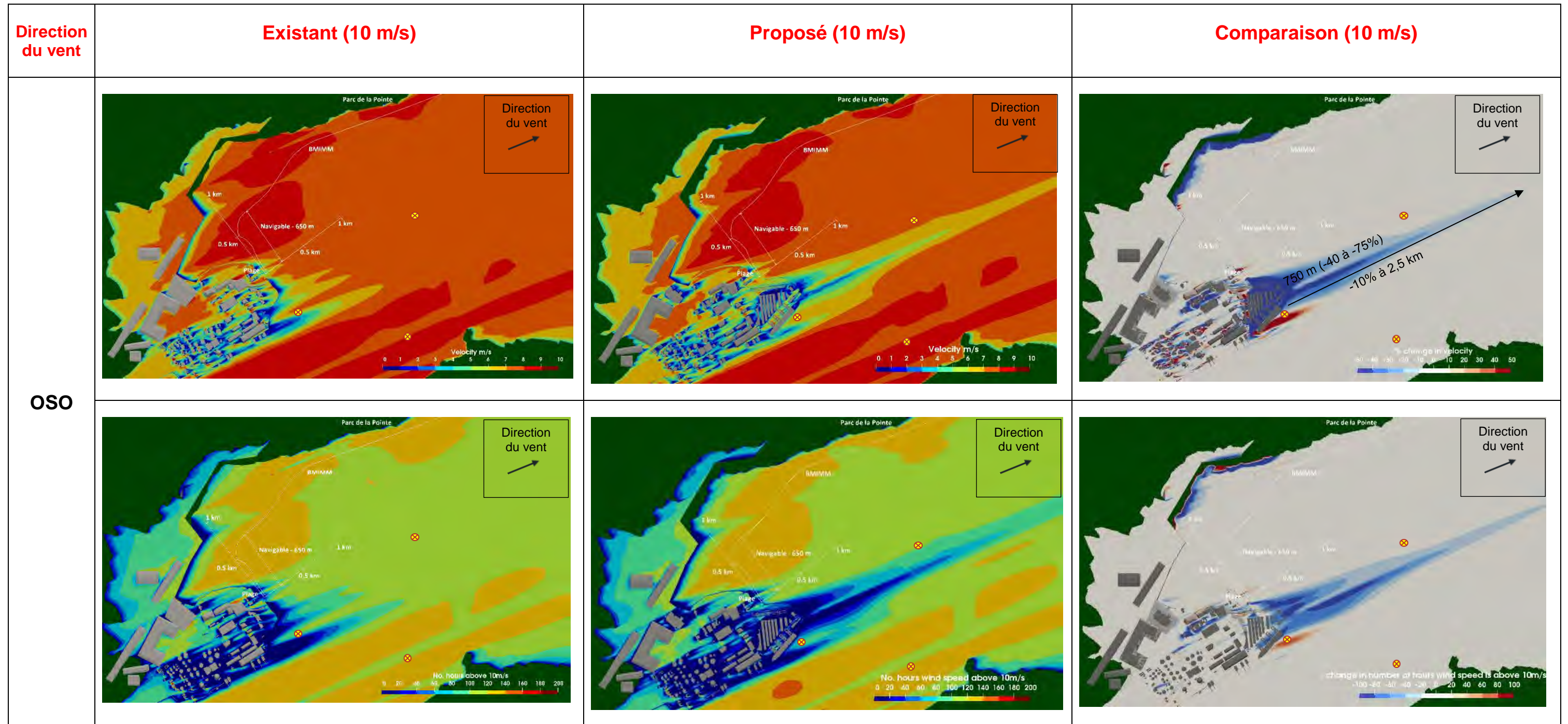


Figure 4.4 Résultats d'un vent de 10 m/s à 2 m au-dessus du plan d'eau pour les scénarios de vent provenant de l'ouest-sud-ouest au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

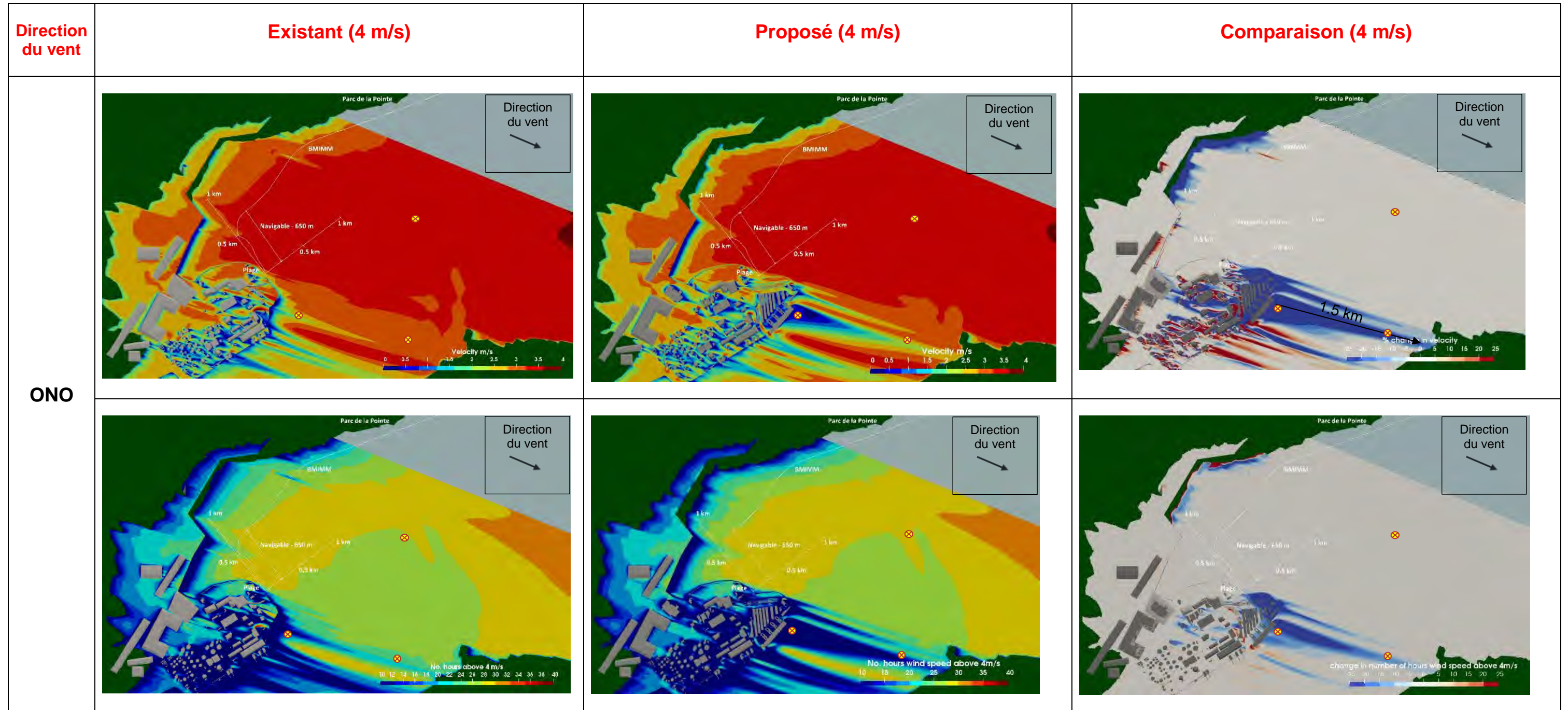


Figure 4.5 Résultats d'un vent de 4 m/s à 2 m au-dessus du plan d'eau pour les scénarios de vent provenant de l'ouest-nord-ouest au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

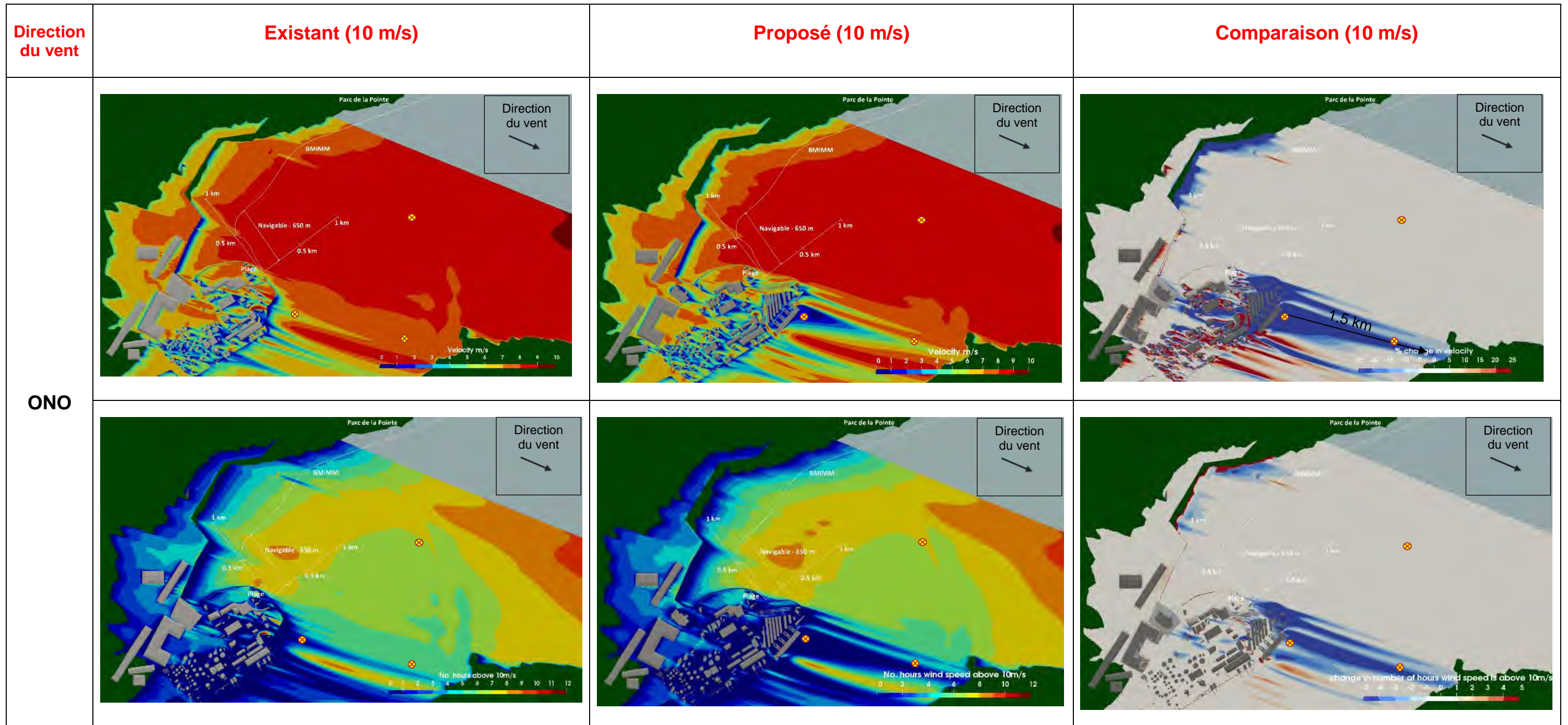


Figure 4.6 Résultats d'un vent de 10 m/s à 2 m au-dessus du plan d'eau pour les scénarios de vent provenant de l'ouest-nord-ouest au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

4.2 ÉNERGIE CINÉTIQUE TURBULENTE

Les Figure 4.7 à Figure 4.9 illustrent l'énergie cinétique de turbulence pour les scénarios de l'ENE, de l'OSO et de l'ONO à 2 m au-dessus du sol ou du plan d'eau, à un niveau de basse mer inférieure de marée moyenne (BMIMM), en conditions actuelles et futures. L'énergie cinétique turbulente est une quantité qui varie en fonction de l'intensité moyenne du vent. En somme, plus le vent est fort, plus l'énergie cinétique de turbulence peut être intense selon les perturbations.

On peut voir que pour les directions du vent ENE, il y a une très légère augmentation de l'énergie turbulente cinétique autour de la plage pour l'aménagement proposé. Alors que pour les directions du vent de l'OSO et de l'ONO, la turbulence diminue dans le sillage des du terminal, à une élévation de 2 m au-dessus du plan d'eau..

Afin de mieux expliquer ces résultats et de décrire la turbulence engendrée par les structures implantées dans le nouveau terminal, des coupes transversales de l'énergie cinétique turbulence et de l'intensité de la turbulence sont présentées à la Figure 4.10 et Figure 4.11. L'intensité de turbulence, exprimée en pourcentage (%), représente le rapport entre la moyenne quadratique des variations de vitesse et la vitesse moyenne. Elle fournit donc une valeur relative de la turbulence pour une intensité de vent donné.

Les deux coupes transversales montrent bien que, près du terminal, les structures implantées dans le terminal projeté tendent à générer de la turbulence en altitude, alors que près de la surface de l'eau, la turbulence est réduite. En effet, puisque le courant est dévié en altitude, la turbulence est observé dans cette zone, alors que près de l'eau, les faibles vents sont accompagnés de faible turbulence.

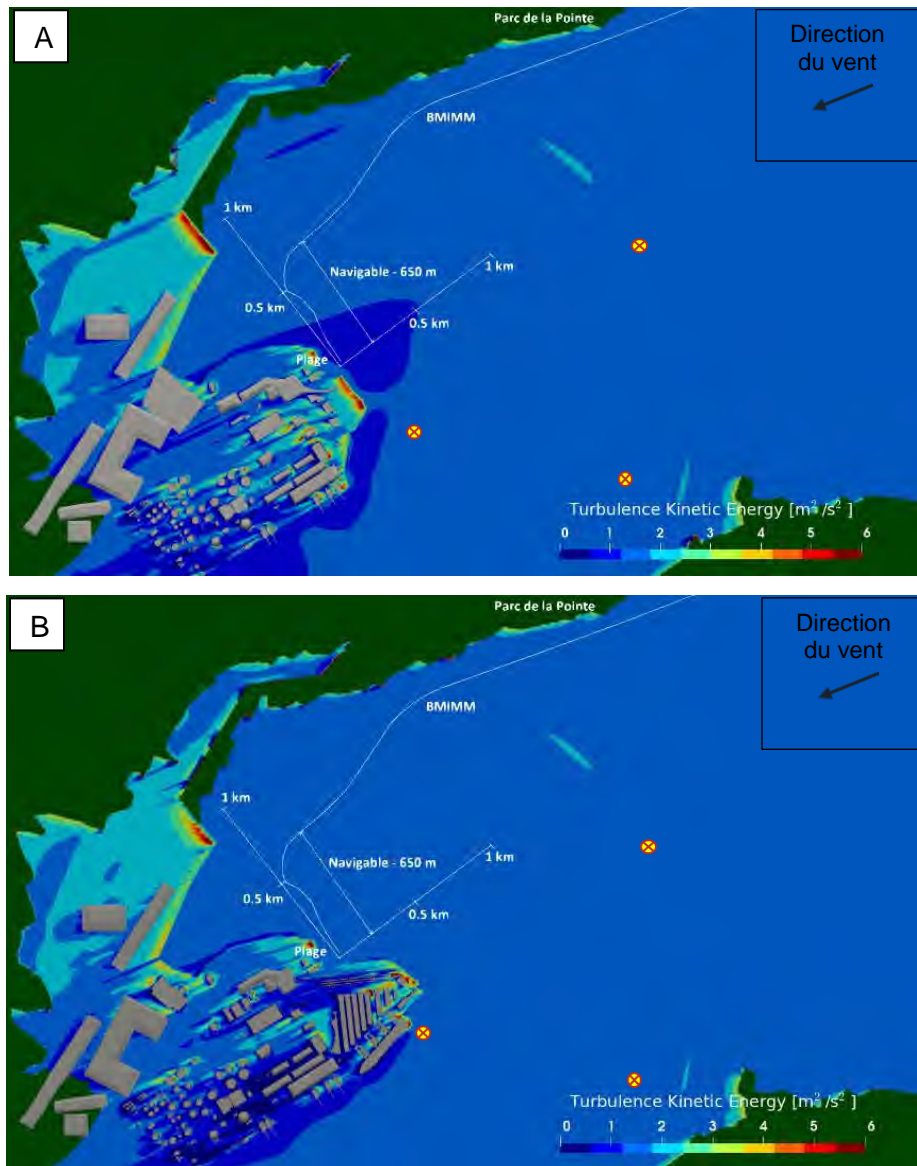


Figure 4.7 Résultats de l'énergie cinétique de turbulence selon une vue en plan pour le scénario de l'ENE pour l'aménagement existant (A) et l'aménagement projeté (B)

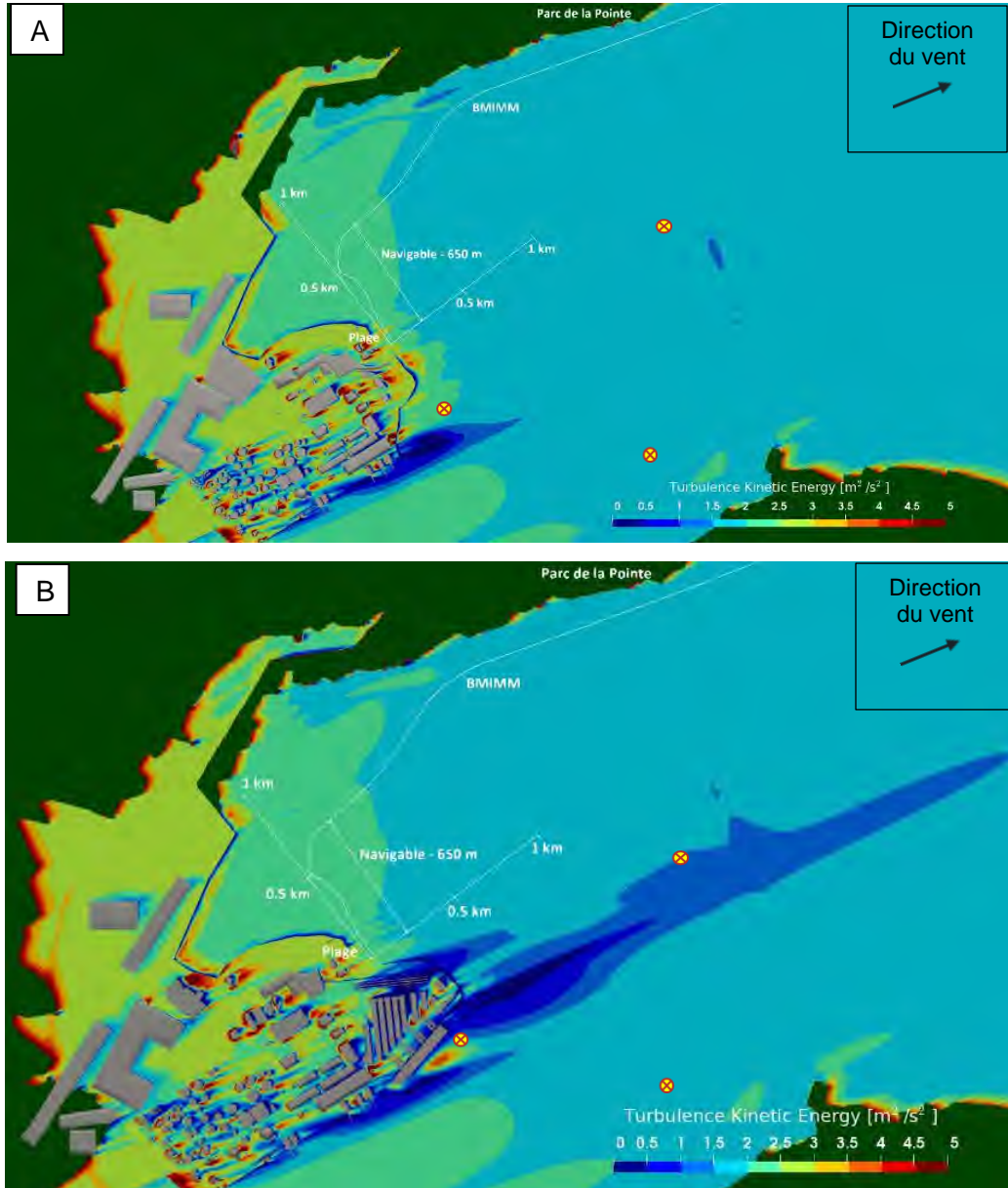


Figure 4.8 Résultats de l'énergie cinétique de turbulence selon une vue en plan pour le scénario de l'OSO pour l'aménagement existant (A) et l'aménagement projeté (B)

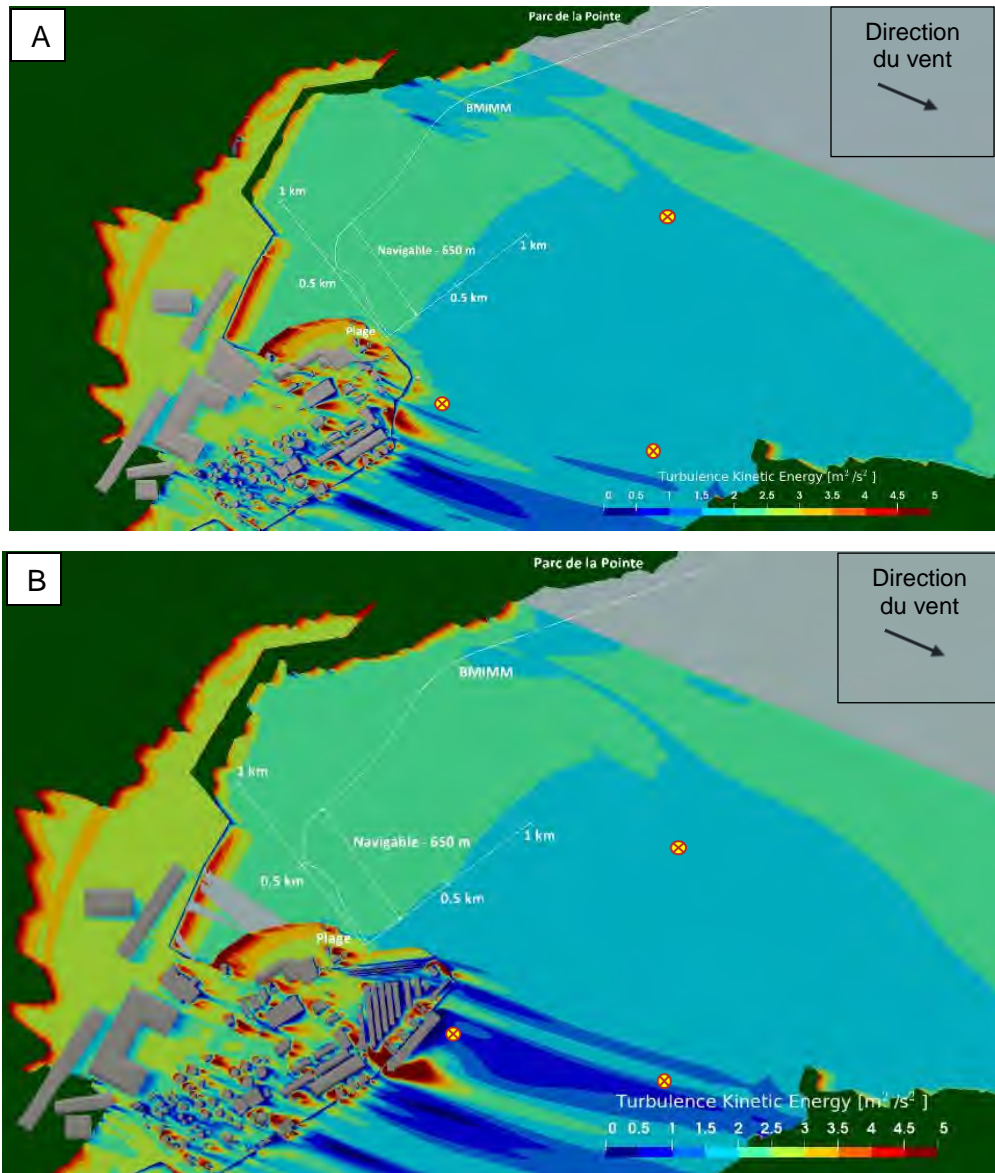


Figure 4.9 Résultats de l'énergie cinétique de turbulence selon une vue en plan pour le scénario de l'ONO pour l'aménagement existant (A) et l'aménagement projeté (B)

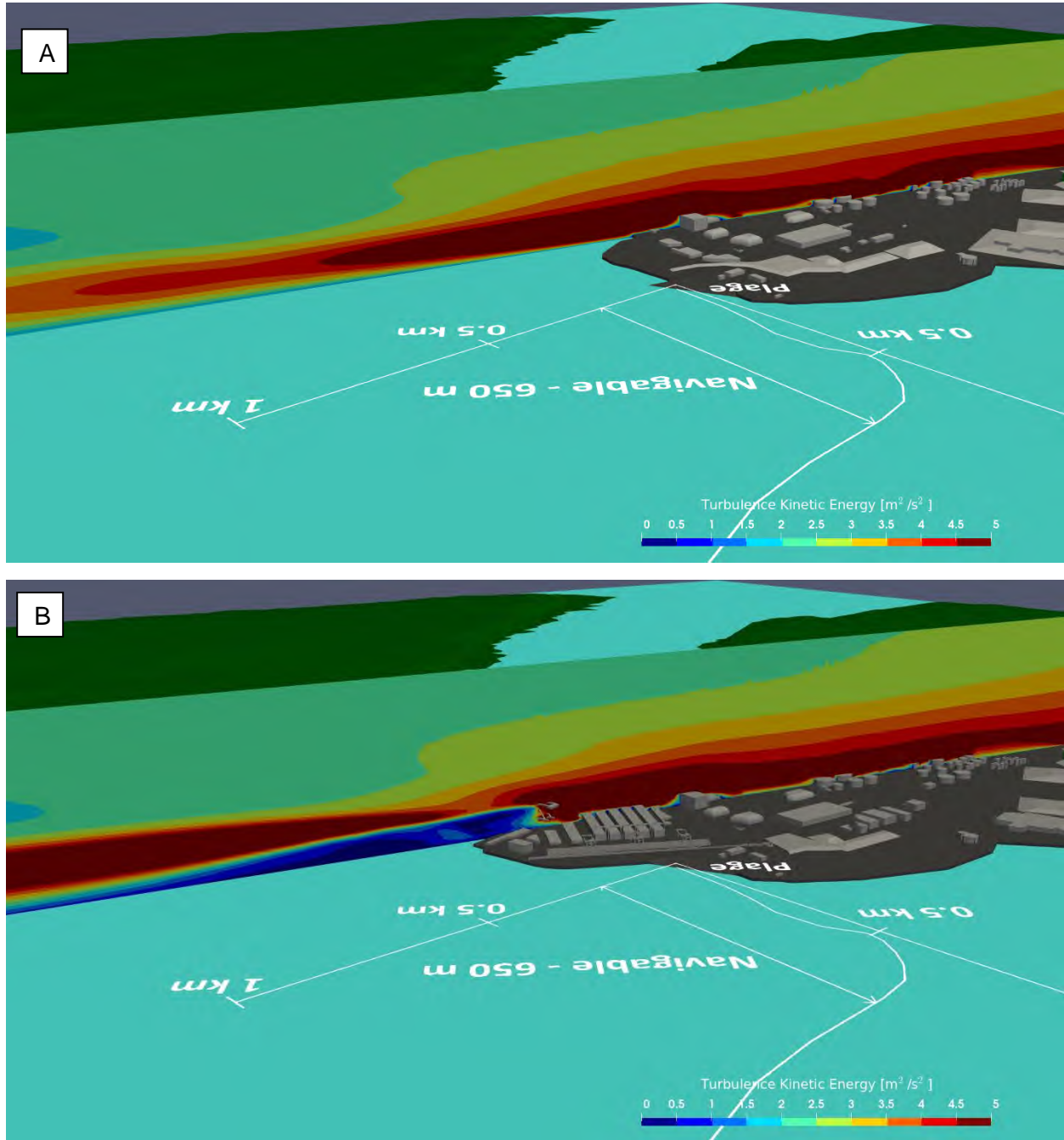


Figure 4.10 Résultats de l'énergie cinétique de turbulence selon une vue transversale pour le scénario de l'OSO pour l'aménagement existant (A) et l'aménagement projeté (B)

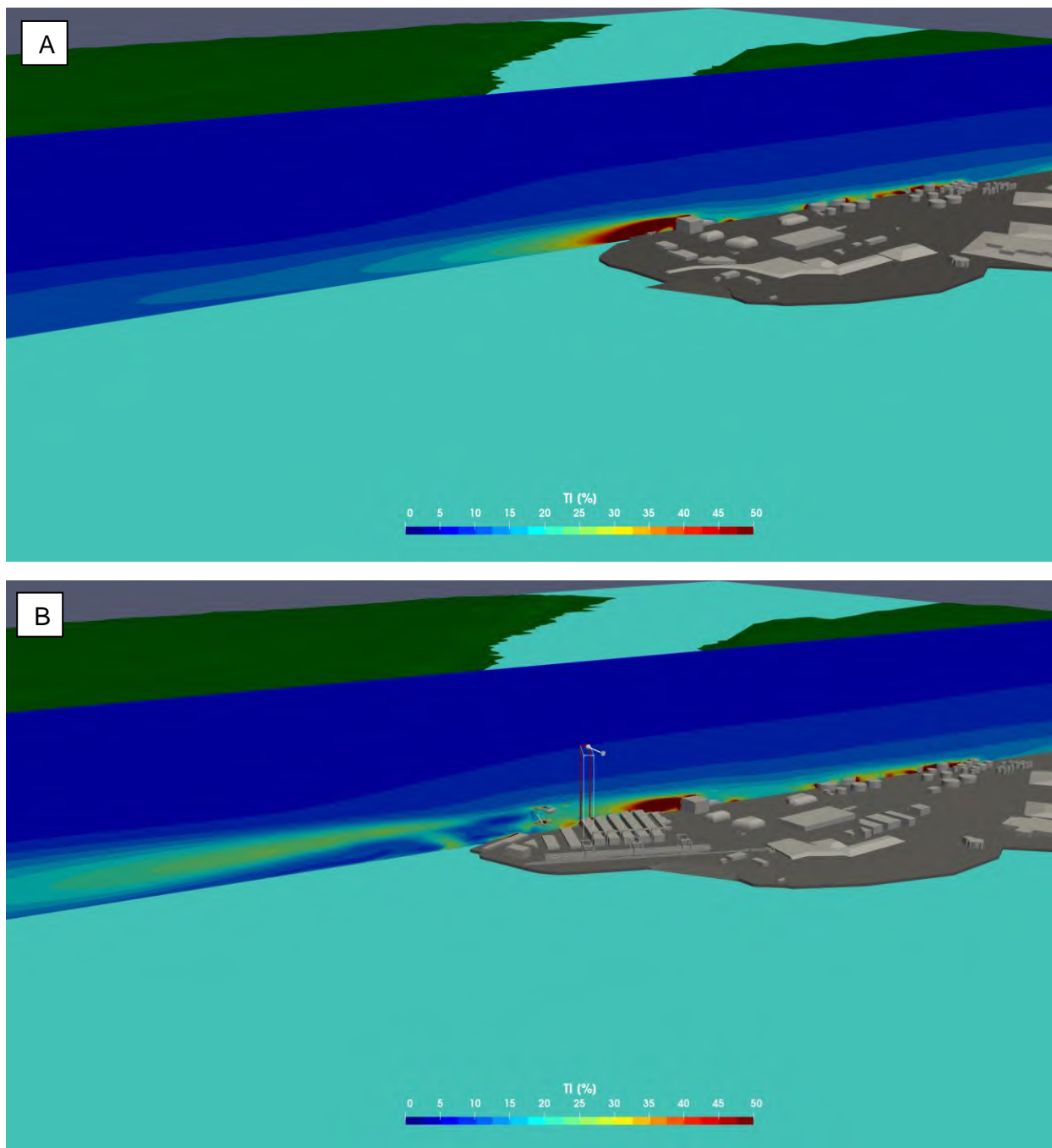


Figure 4.11 Résultats de l'intensité de turbulence selon une vue transversale pour le scénario de l'OSO pour l'aménagement existant (A) et l'aménagement projeté (B)

5 CONCLUSIONS

Les résultats de toutes les simulations sont résumés au Tableau 5.1 en termes d'impact sur la vitesse du vent.

Tableau 5.1 Synthèse des résultats à 2 m au-dessus du sol ou du plan d'eau pour l'aménagement proposé pour un vent imposé de 4 m/s et 10 m/s

Direction du vent	Impact sur l'énergie cinétique turbulent près de la plage	Impact sur la vitesse du vent dans la zone de navigation au large de la plage	Impact sur la vitesse du vent dans la zone de navigation près de la plage	Impact sur la vitesse du vent à l'est et au sud du nouveau terminal
ENE (67°)	Légère augmentation	Aucun impact	Augmentation de la vitesse du vent de 5 à 10%	Aucun impact
OSO (247.5°)	Légère augmentation	Aucun impact	Augmentation locale de la vitesse du vent de 10 à 50% dû au déplacement du corridor de vent	Réduction de la vitesse du vent à l'est de 10% à 2,5 km), de 40% à 750 m et de 75% près de l'extrémité est du terminal
ONO (292.5°)	Diminution	Aucun impact	Diminution locale de la vitesse du vent de 25 % le long de la plage	Réduction de la vitesse au sud de 25% à 75% sur 1,5 km

Les principaux impacts appréhendés de l'implantation des nouvelles infrastructures portuaires sur les vents sont :

- Une augmentation de la vitesse du vent de 5 à 10% dans la section devant la plage, pour les vents en provenance l'ENE, soit une augmentation jusqu'à 0,3 m/s et 0,7 m/s respectivement pour les scénarios de vent imposé à l'entrée du modèle de 4 et 10 m/s;
- Une augmentation de la vitesse du vent de 10 à 50% dans la section devant la plage, pour les vents en provenance de l'OSO, soit une augmentation jusqu'à 1,5 m/s et 3 m/s respectivement pour une vitesse de vent imposée de 4 et 10 m/s;
- Pour les scénarios de vent de l'OSO, une réduction de la vitesse du vent à l'extrémité est du terminal projeté de 40 à 75% sur les 750 m premiers mètres au nord-est des installations, soit une réduction jusqu'à 6 m/s pour un vent imposé de 10 m/s. À 2 500 m du terminal, la diminution atteint 10%;
- Une réduction de l'intensité du vent de 25% près de la plage, soit une réduction jusqu'à 0,6 m/s pour une vitesse de vent imposée de 4 m/s et jusqu'à 1,5 m/s pour un vent imposé de 10 m/s, lors de vents en provenance de l'ONO, lesquels sont peu fréquents (environ 12 % du temps durant la période de navigation);

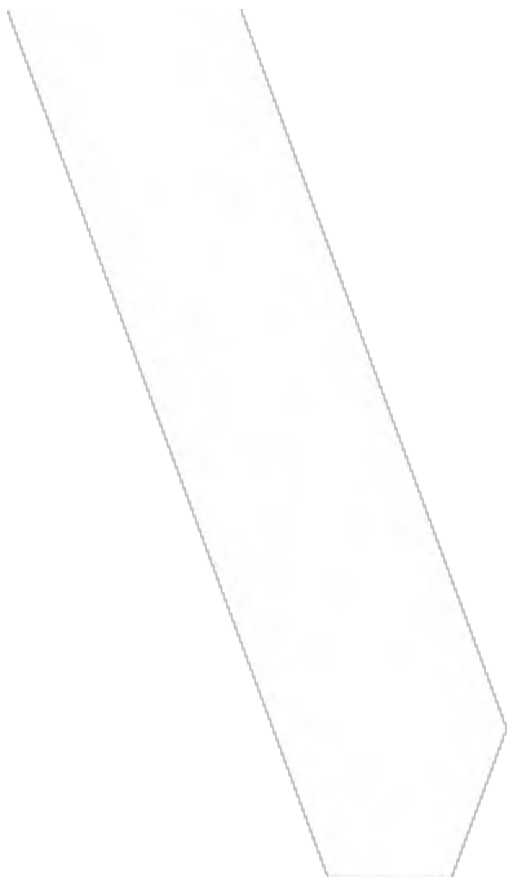
- Une réduction de la vitesse du vent entre 25 et 75% à 1 500 m au sud-est du terminal projeté pour les scénarios de vent de l'ONO;
- Des conditions de turbulence future similaires à celles prévalant actuellement dans le secteur de la plage.

Il est à noter que les impacts sur les vents sont faibles au niveau de la zone de navigation située au nord-est de la plage de la baie de Beauport, soit entre la plage et la batture au nord. Au niveau des activités de navigation à la voile, la présence physique du terminal limitera la largeur navigable à marée basse au nord, laquelle passe d'environ 650 m près de la plage jusqu'à 900 m à l'extrémité du terminal. Pour un vent provenant de l'ouest-sud-ouest, l'impact du terminal sera également d'étendre vers le large (au nord-est) des conditions moins favorables pour la navigation à la voile en raison d'une baisse importante de l'intensité du vent estimée entre 40 et 75% à 750 m du terminal et diminuant graduellement à 10% à 2,5 km des installations.

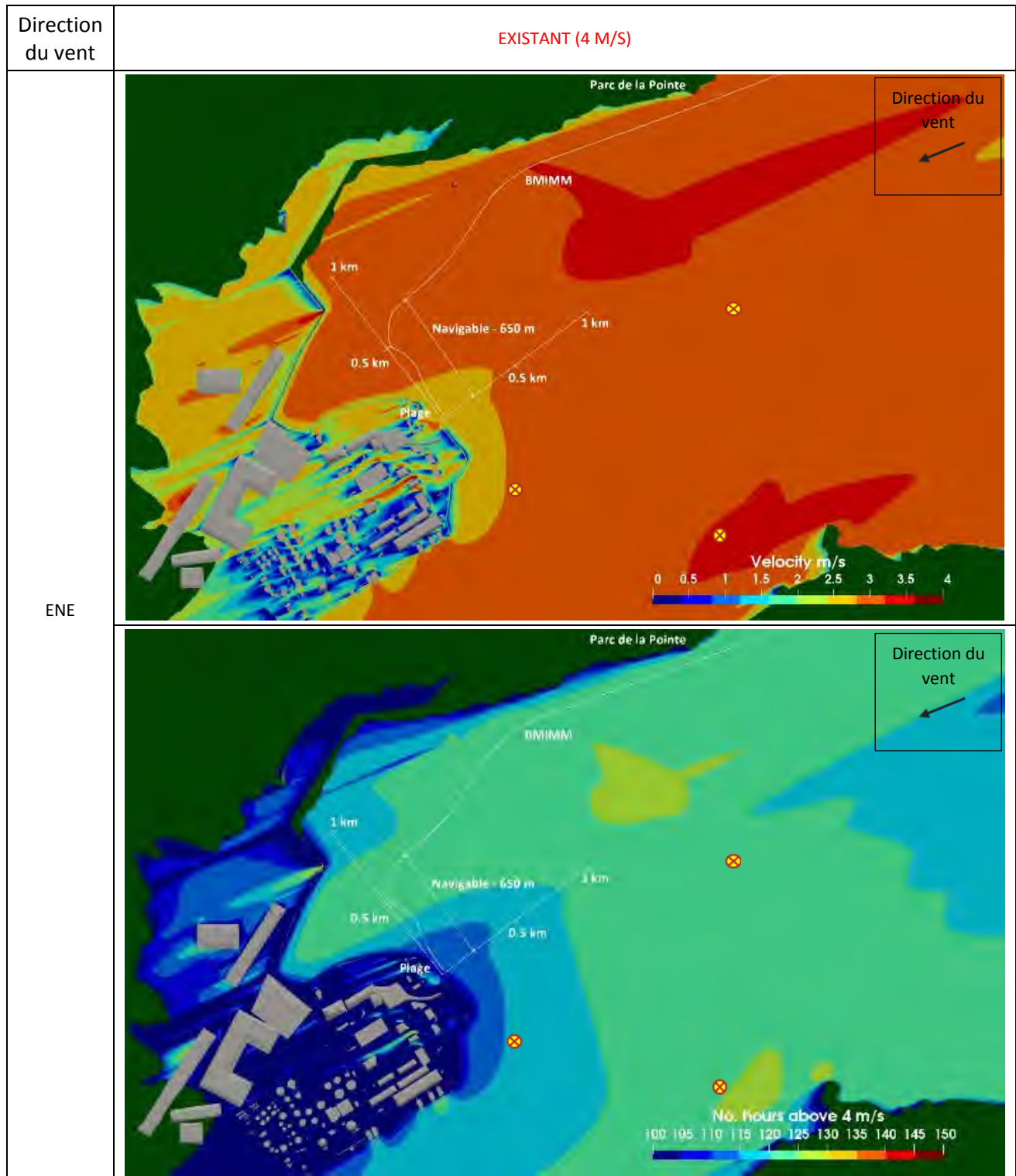
6 REFERENCES

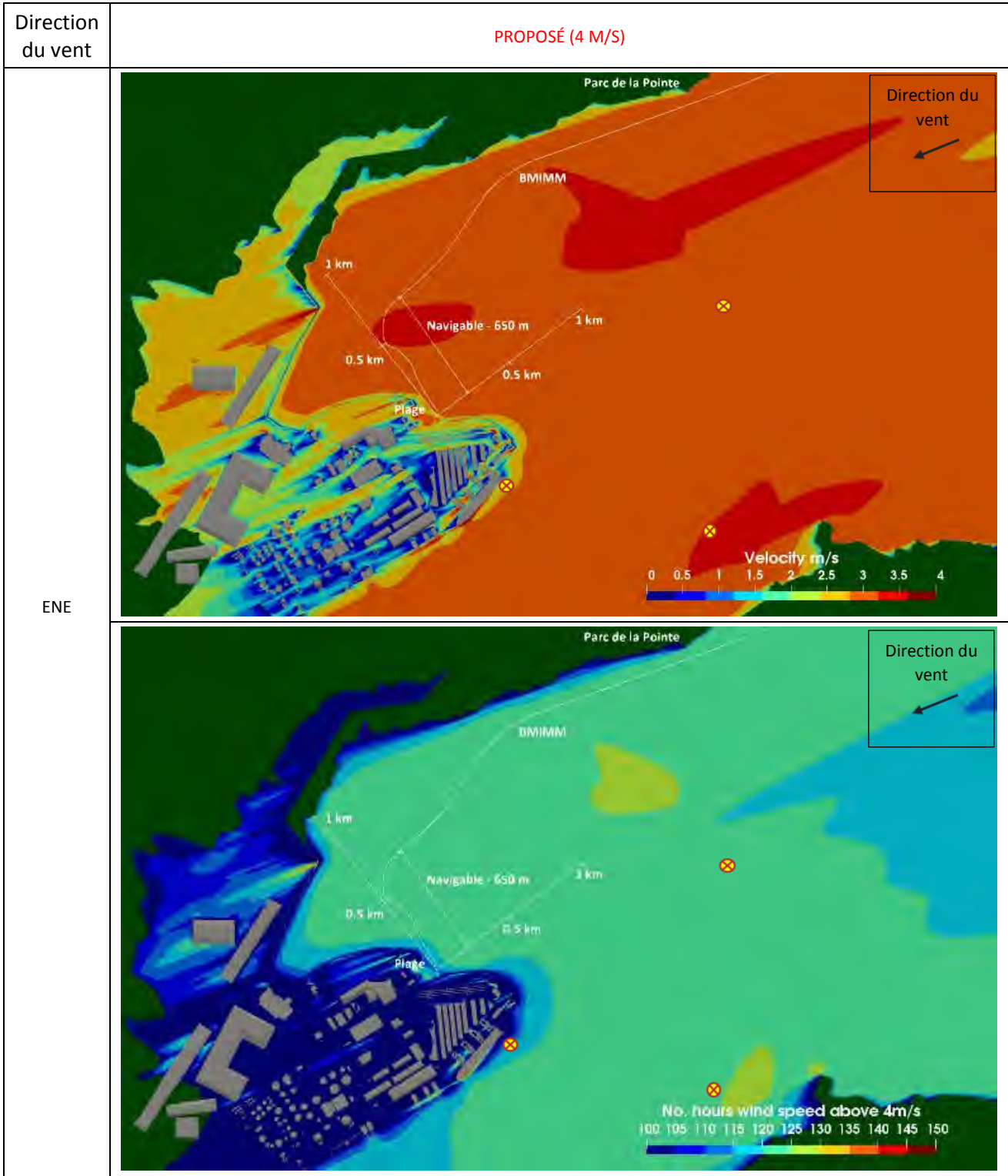
- Blocken, B., Janssen, W.D. and van Hooff, T., 2012. CFD simulation for pedestrian wind comfort and wind safety in urban areas: General decision framework and case study for the Eindhoven University campus. *Environmental Modelling & Software*, 30, pp.15-34.
- Dadioti, Ralou, Rees, Simon J., *Validation of open source CFD applied to building external flow*, 14th Conference of International Building Performance Simulation Association, Hyderabad, India, Dec 7-9, 2015.
- Elshaer, A., Bitsuamlak, G. and El Damatty, A., 2017. Enhancing wind performance of tall buildings using corner aerodynamic optimization. *Engineering Structures*, 136, pp.133-148.
- Franke, J. ed., 2007. *Best practice guideline for the CFD simulation of flows in the urban environment*. Meteorological Inst.
- Jensen, N., Petersen, E. and Troen, I. (1984), *Extrapolation of mean wind statistics with special regard to wind energy applications*, Technical report, World Climate Applications Programme (WMO/TD-No.15), World Meteorological Organization.
- Jubayer, C.M. and Hangan, H., 2018. A hybrid approach for evaluating wind flow over a complex terrain. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 175, pp.65-76.
- Li, J., Delmas, A., Donn, M., Willis, R., 2018, Validation and comparison of different CFD simulation software predictions of urban wind environment, Society for Modeling & Simulation International (SCS), Delft, the Netherlands.
- Park, J., Sun, X., Choi, J.I. and Rhee, G.H., 2017. Effect of wind and buoyancy interaction on single-sided ventilation in a building. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 171, pp.380-389.
- Richards, P.J. and Hoxey, R.P., 1993. Appropriate boundary conditions for computational wind engineering models using the k- ϵ turbulence model. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 46, pp.145-153.
- Tominaga, Y., Mochida, A., Yoshie, R., Kataoka, H., Nozu, T., Yoshikawa, M. and Shirasawa, T., 2008. AIJ guidelines for practical applications of CFD to pedestrian wind environment around buildings. *Journal of wind engineering and industrial aerodynamics*, 96(10-11), pp.1749-1761.

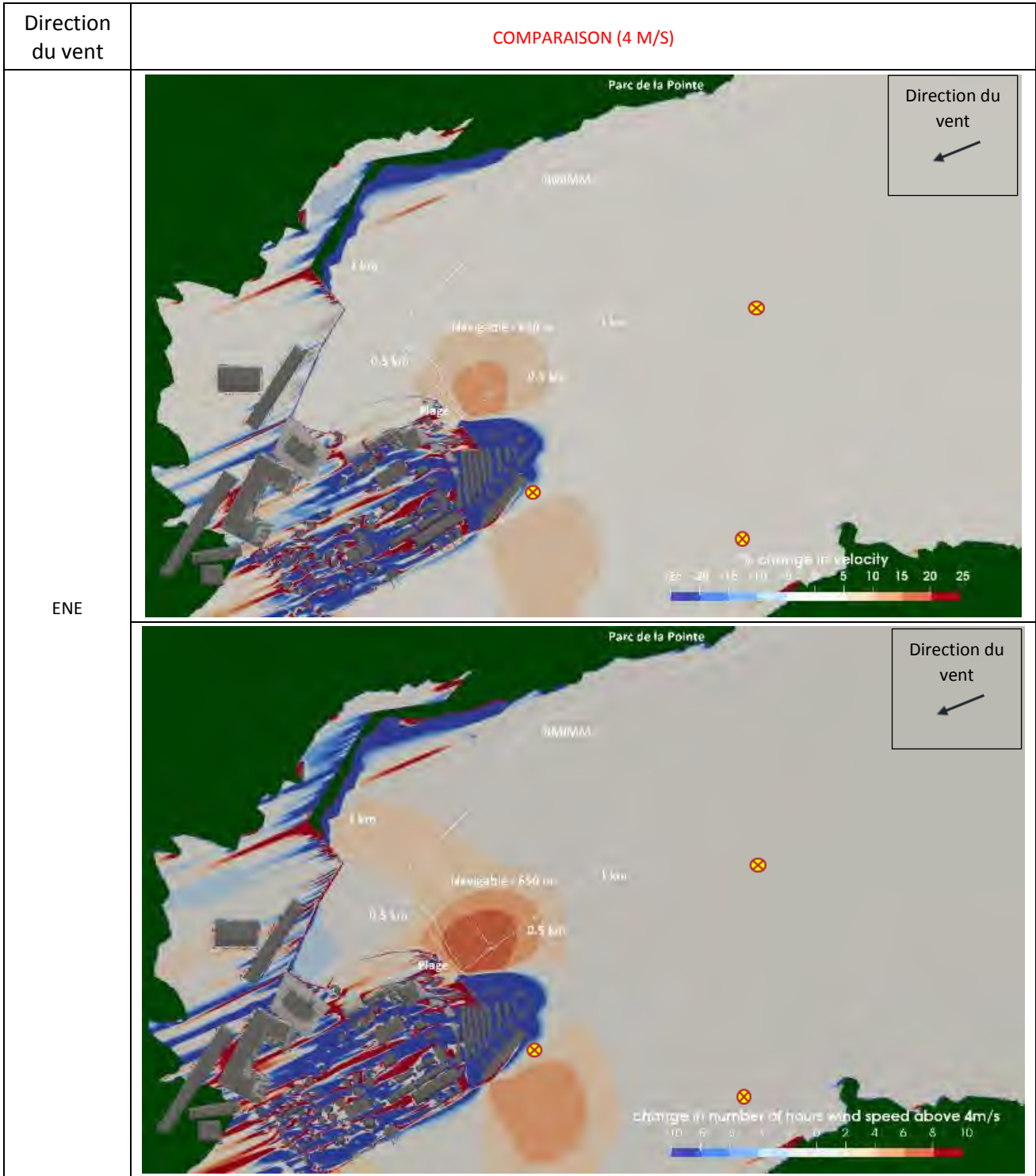
A AGRANDISSEMENT DES RÉSULTATS

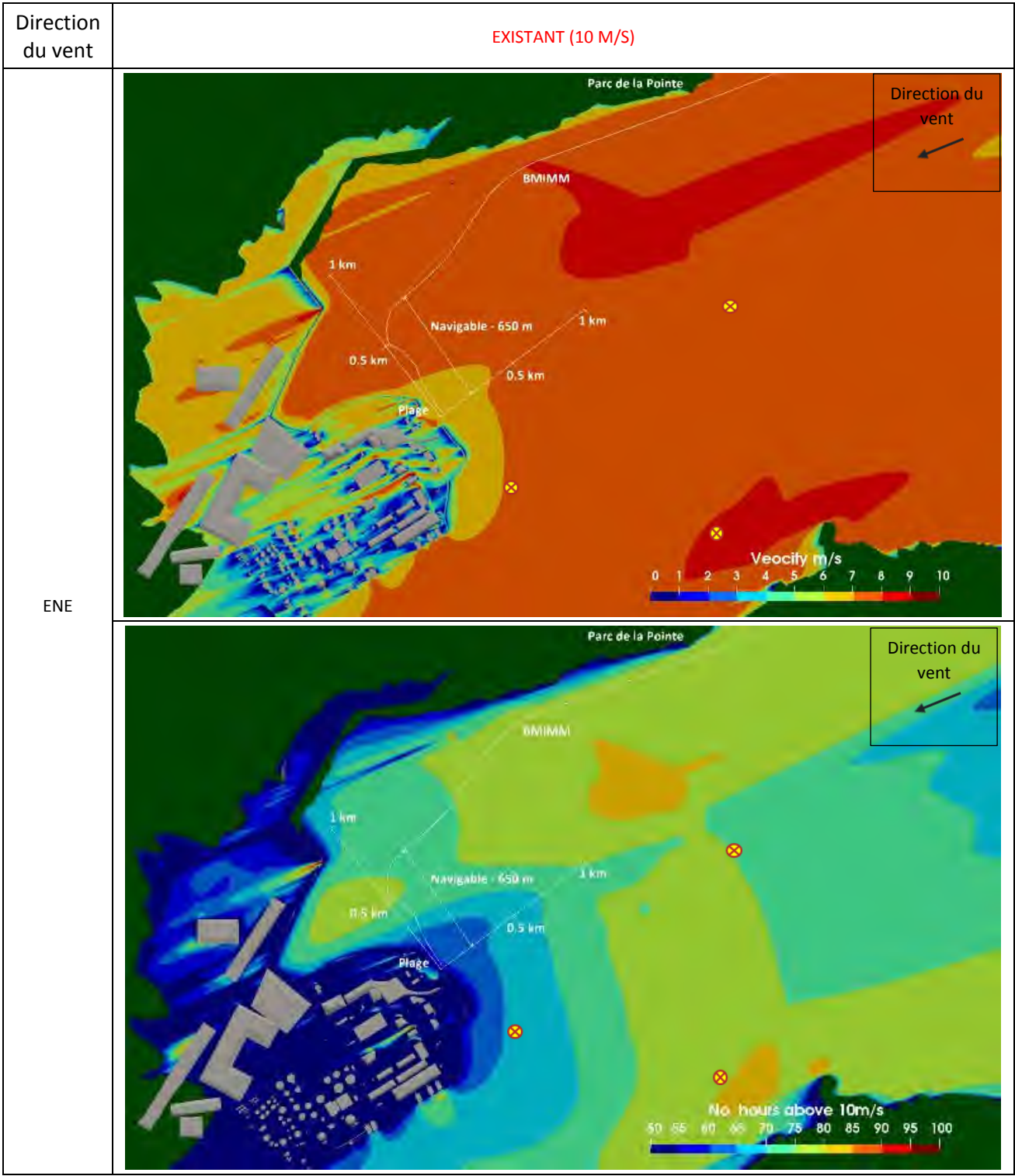


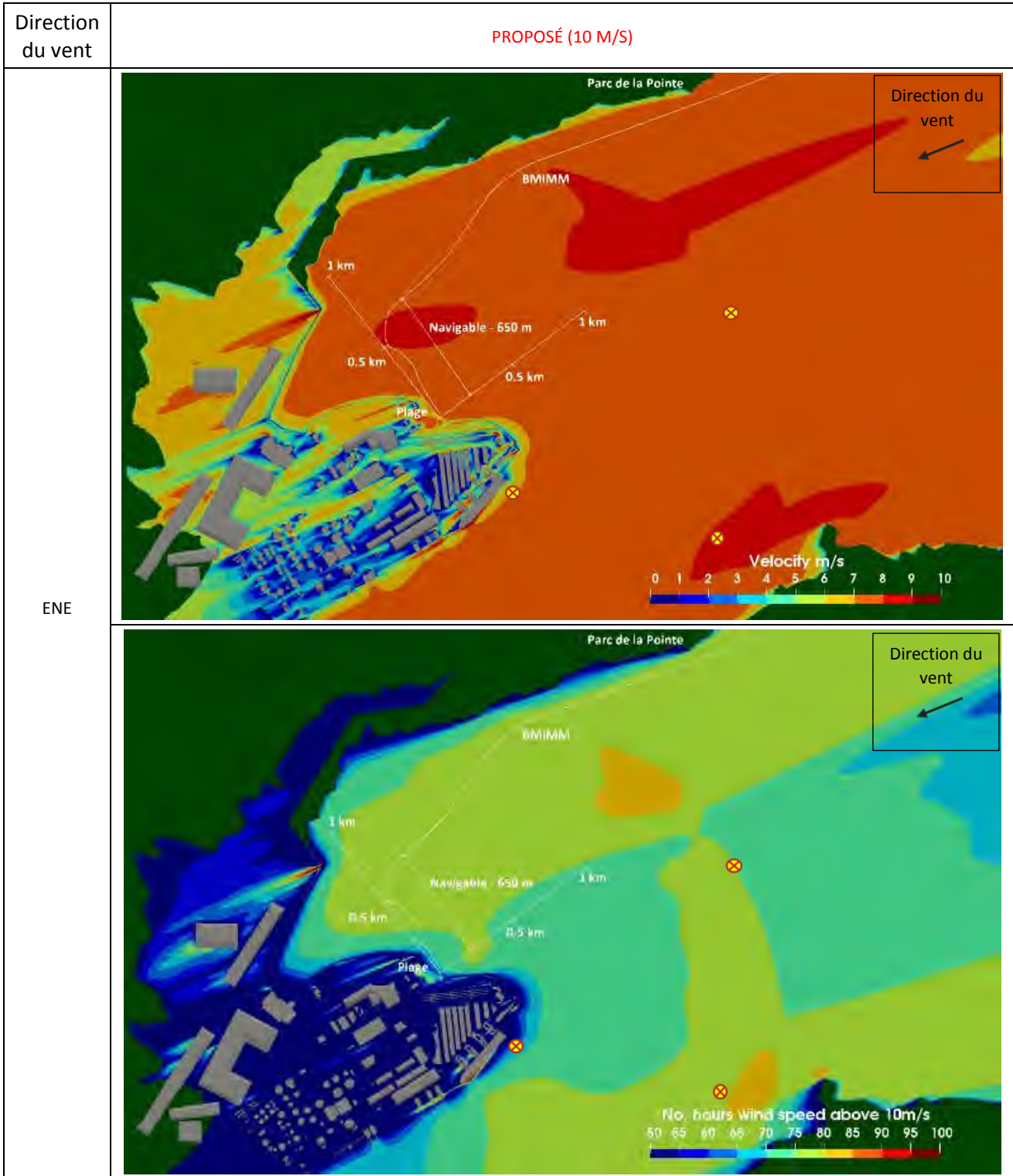
ANNEXE A: AGRANDISSEMENT DES RÉSULTATS

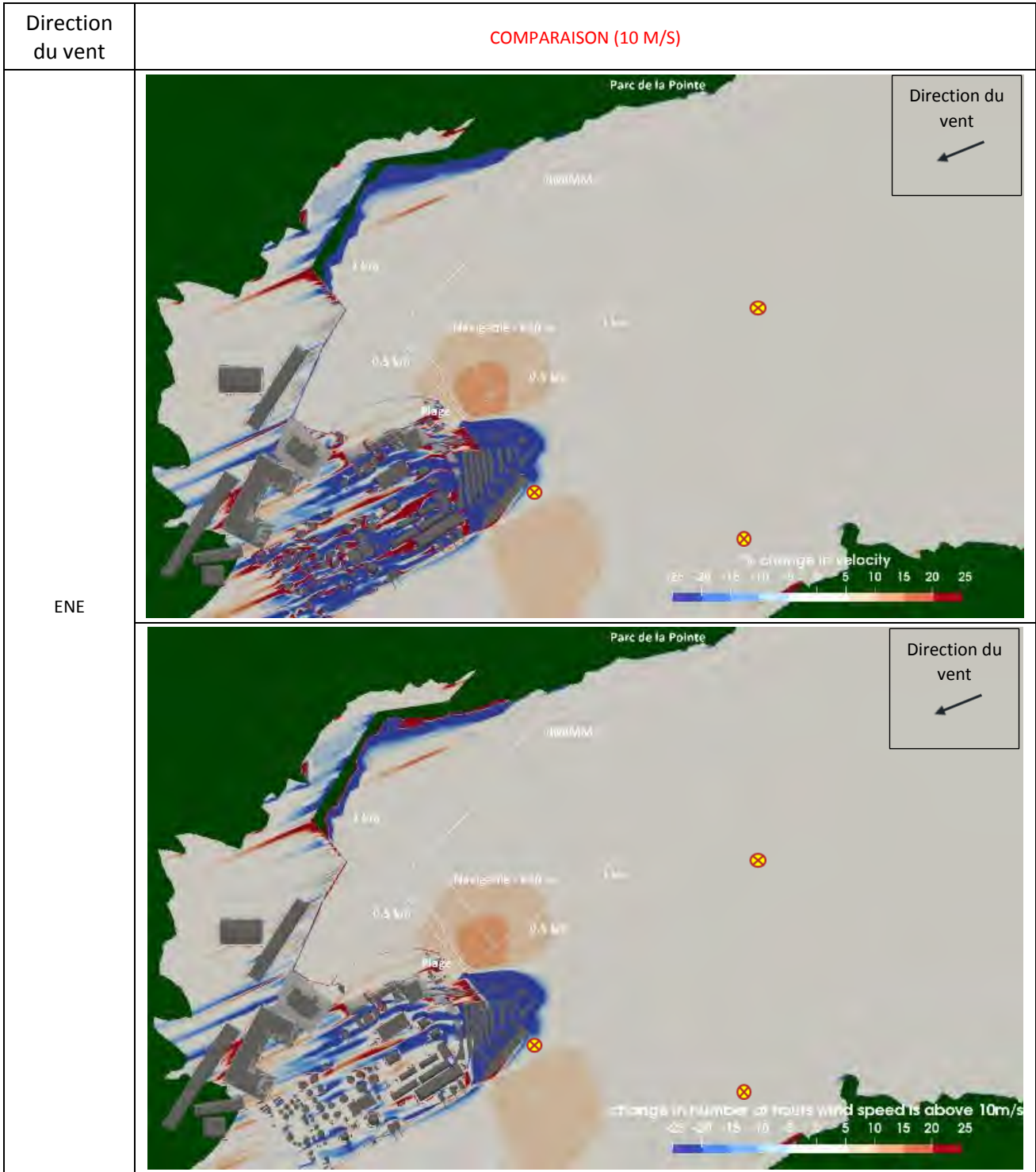


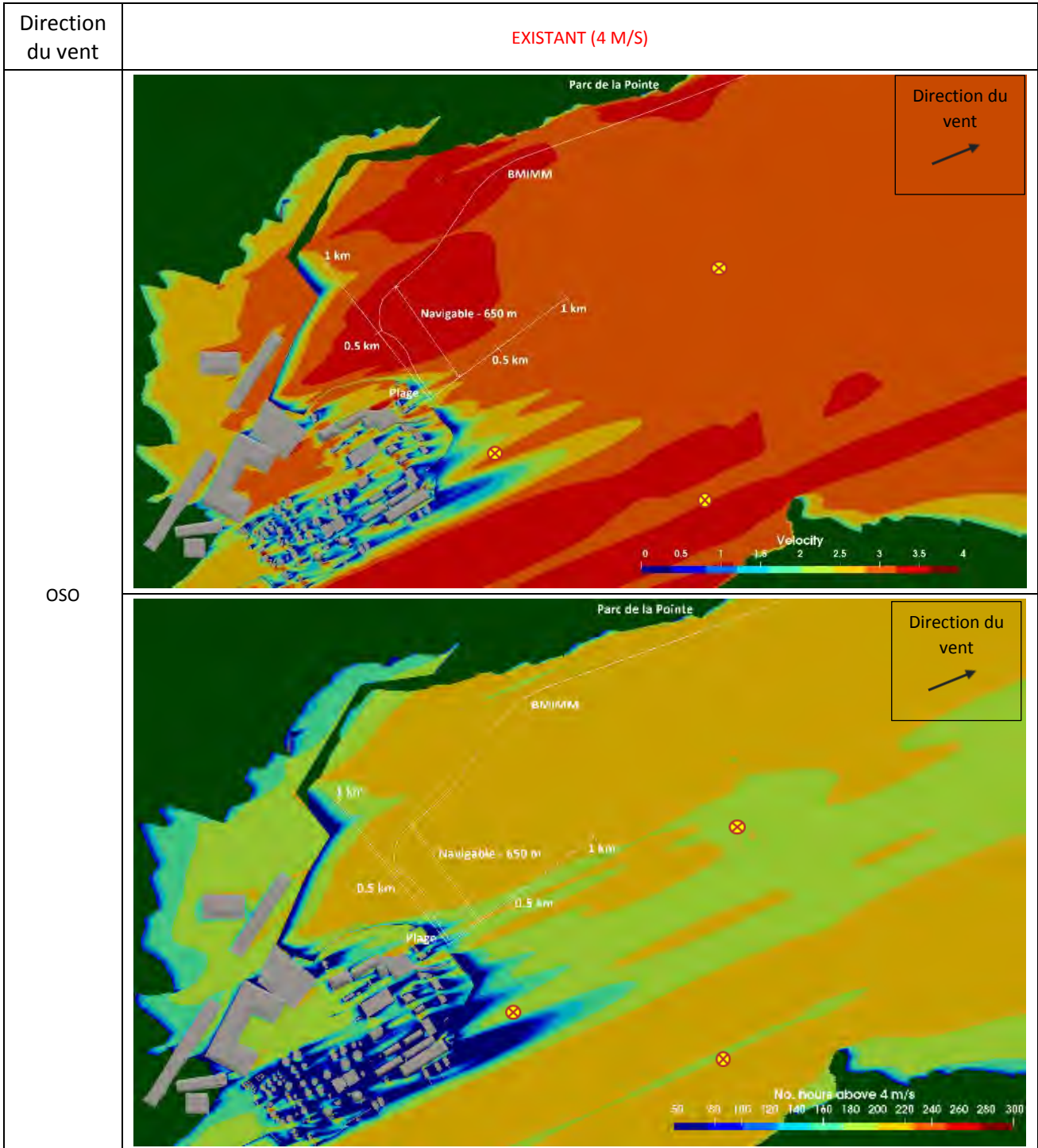


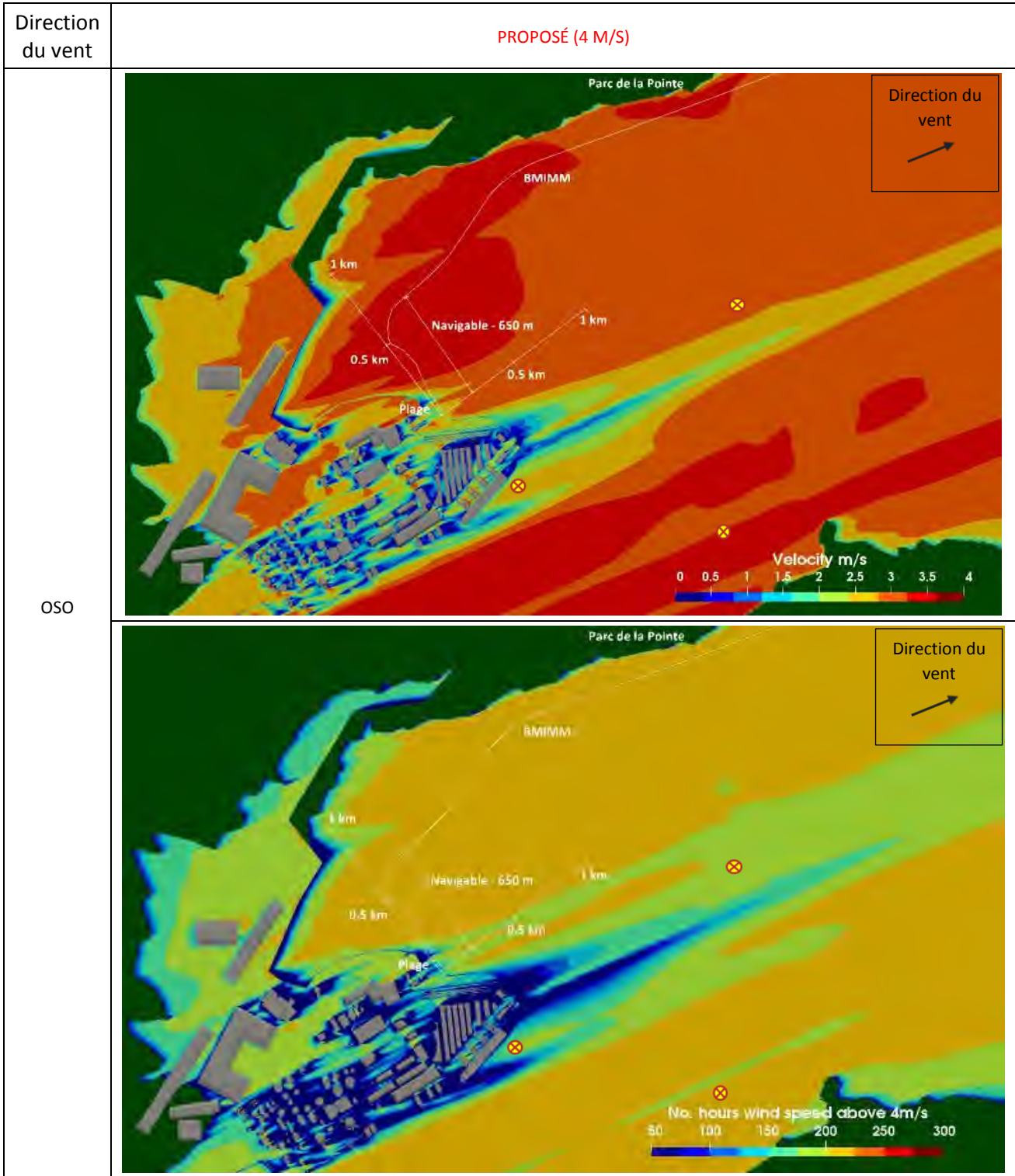


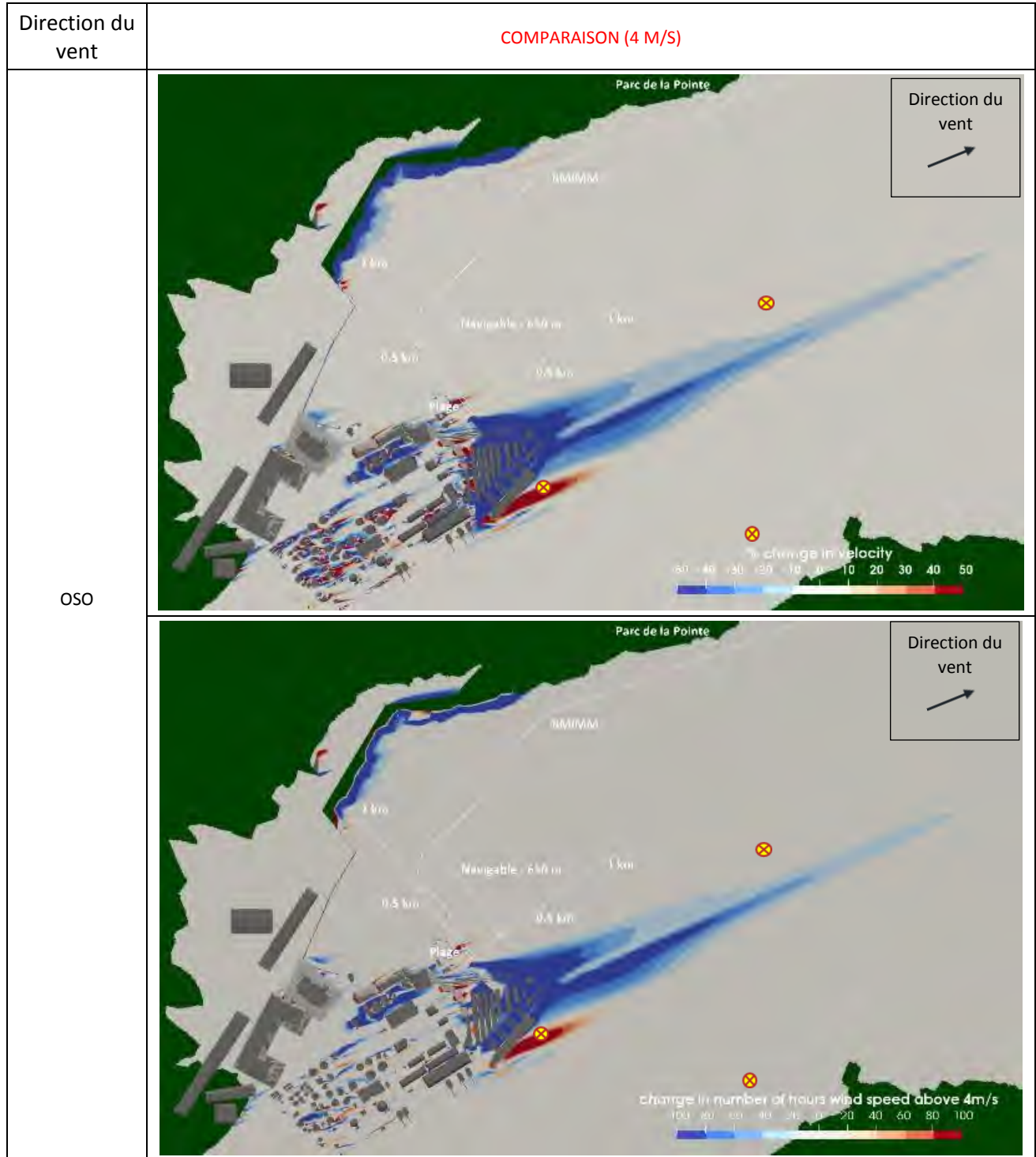


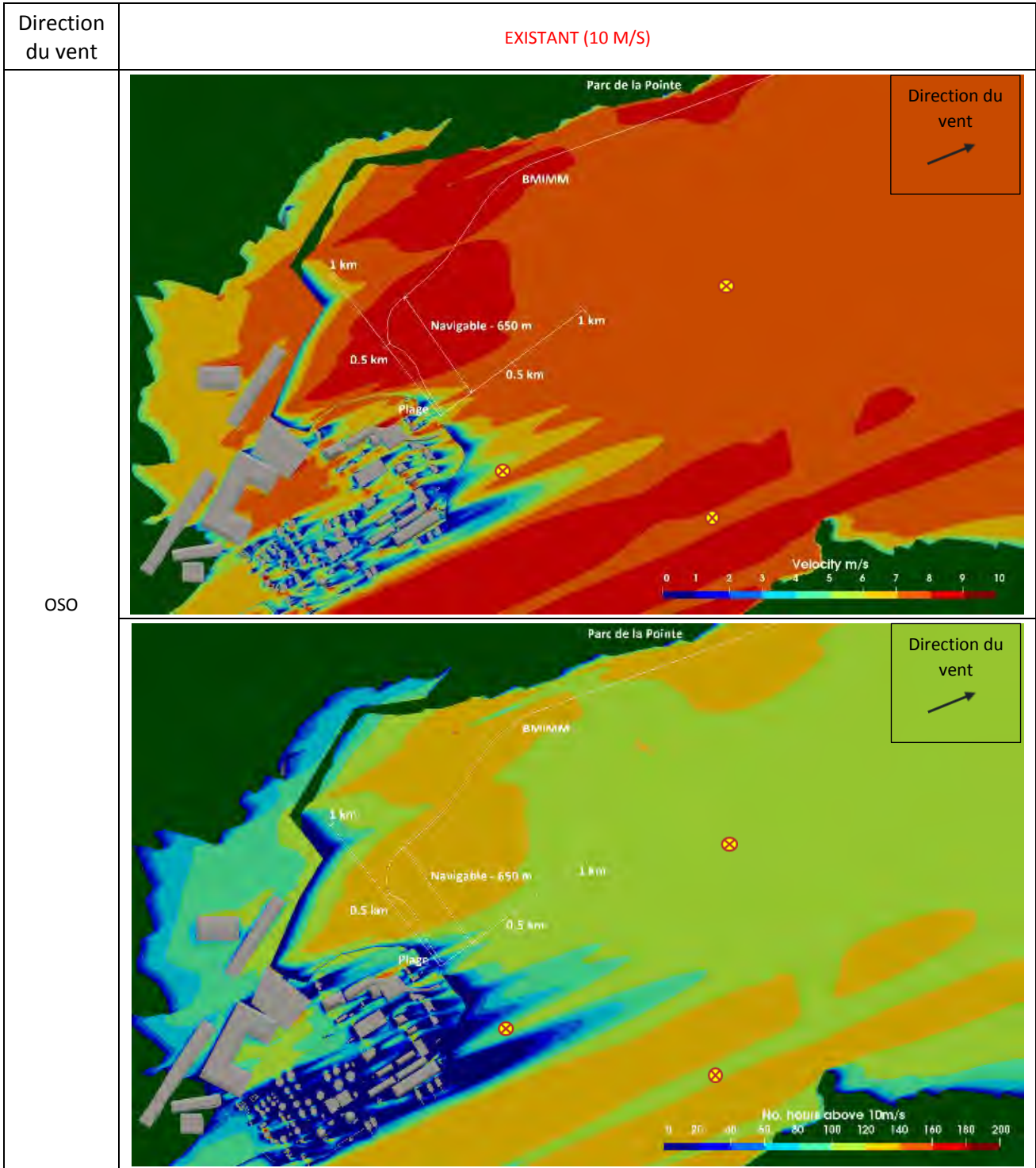


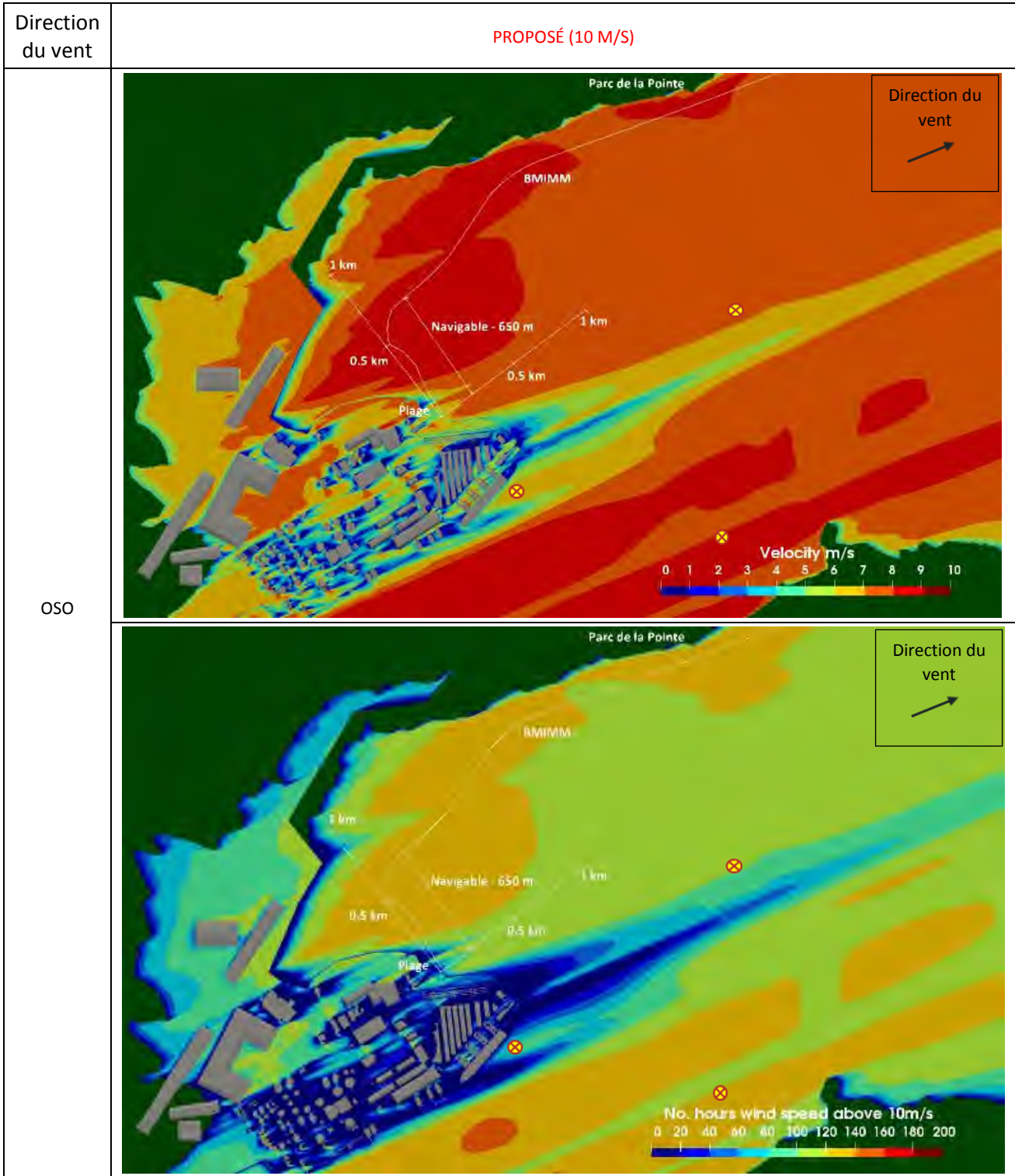


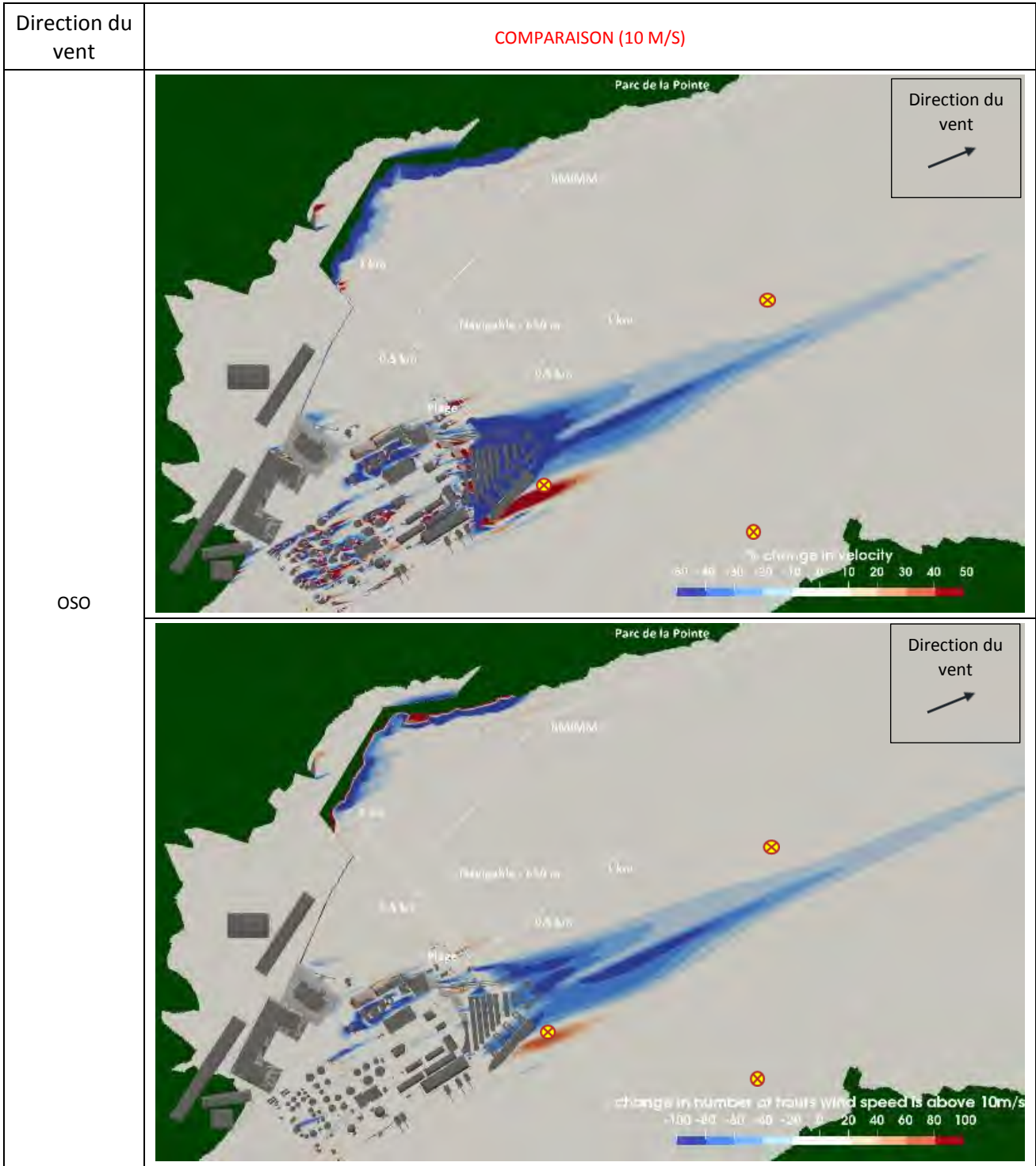


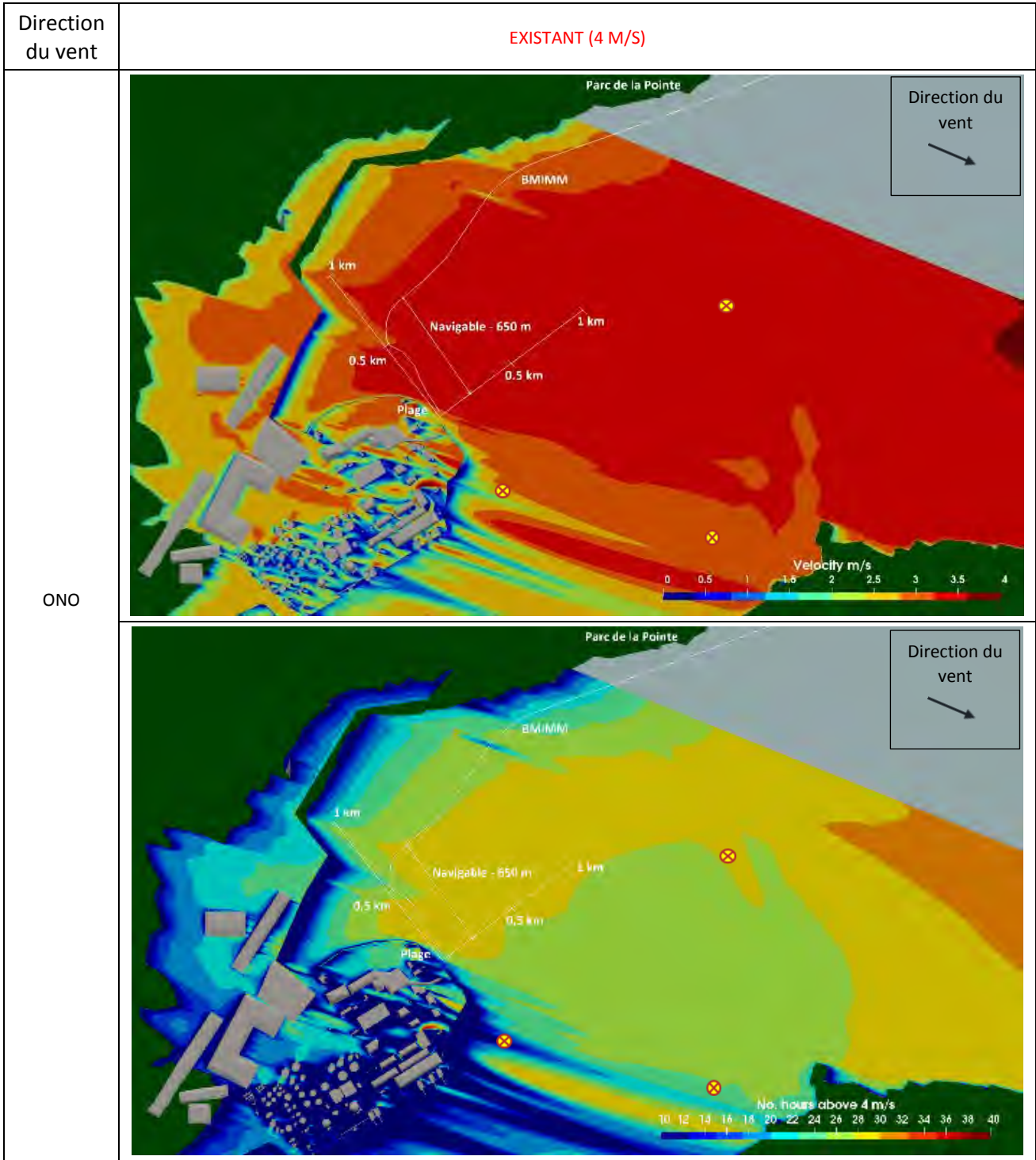








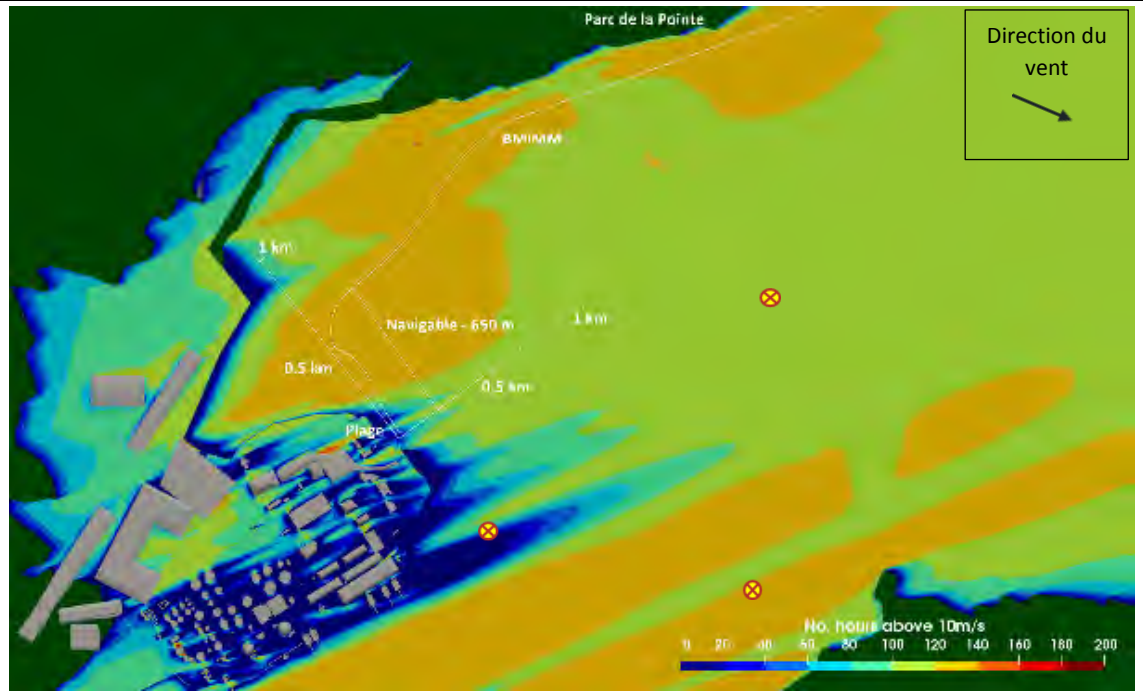
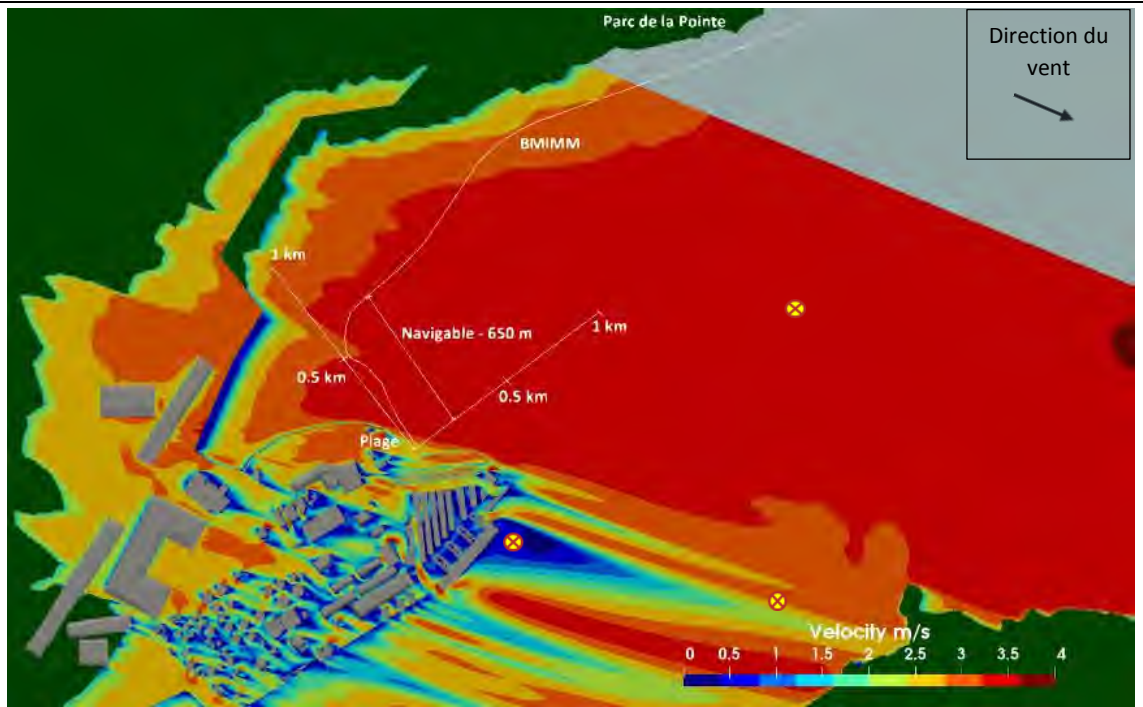


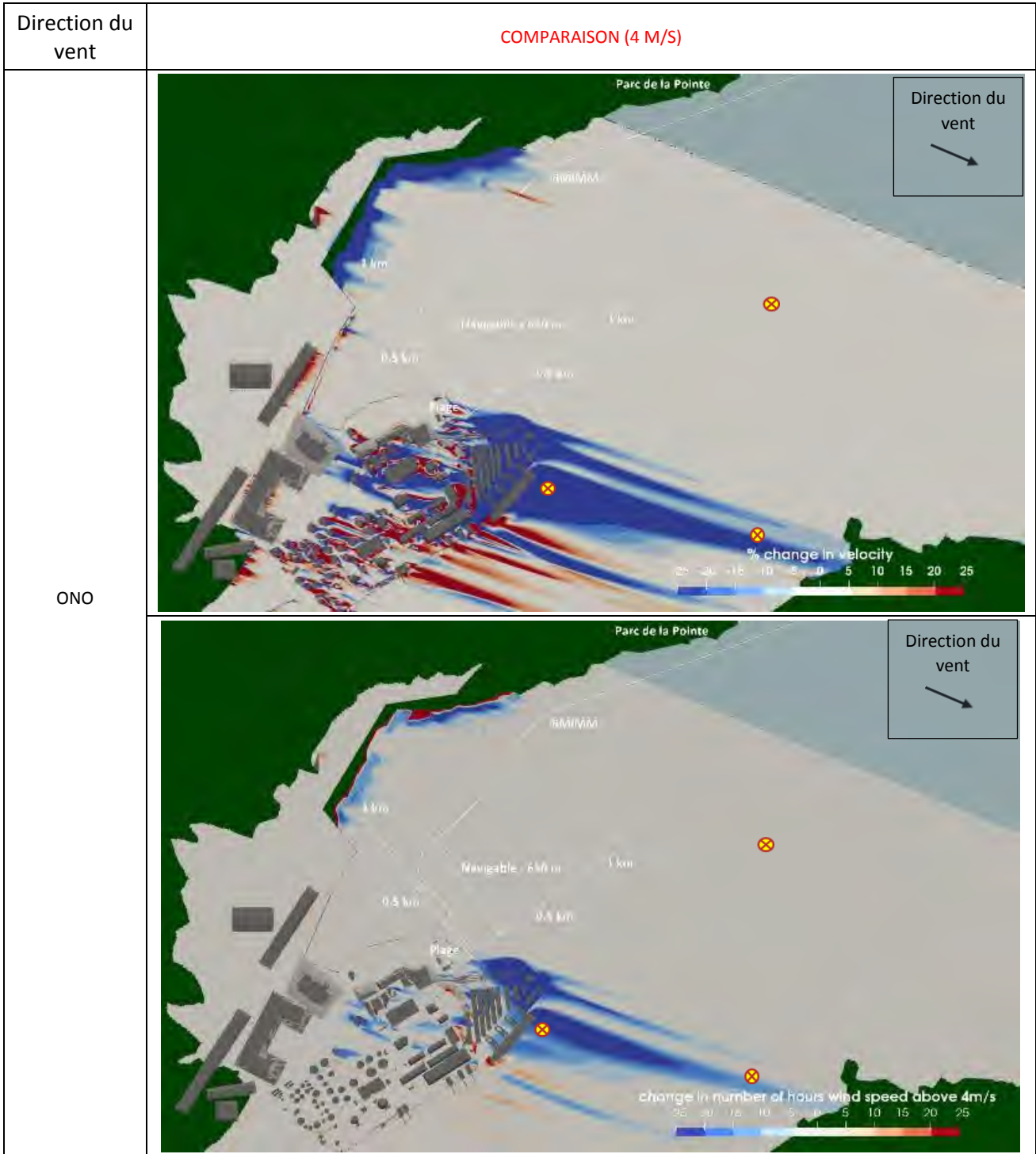


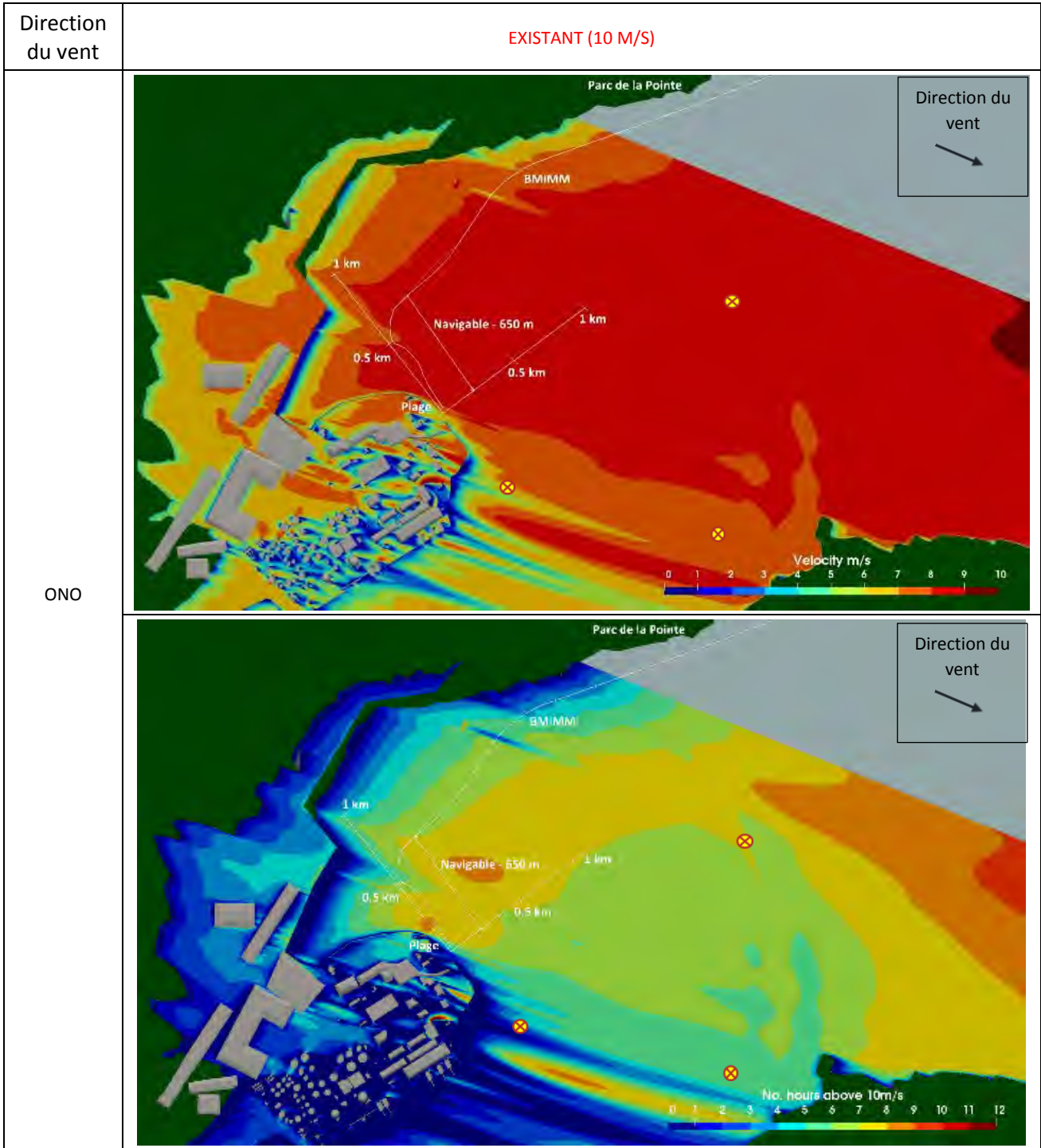
Direction
du vent

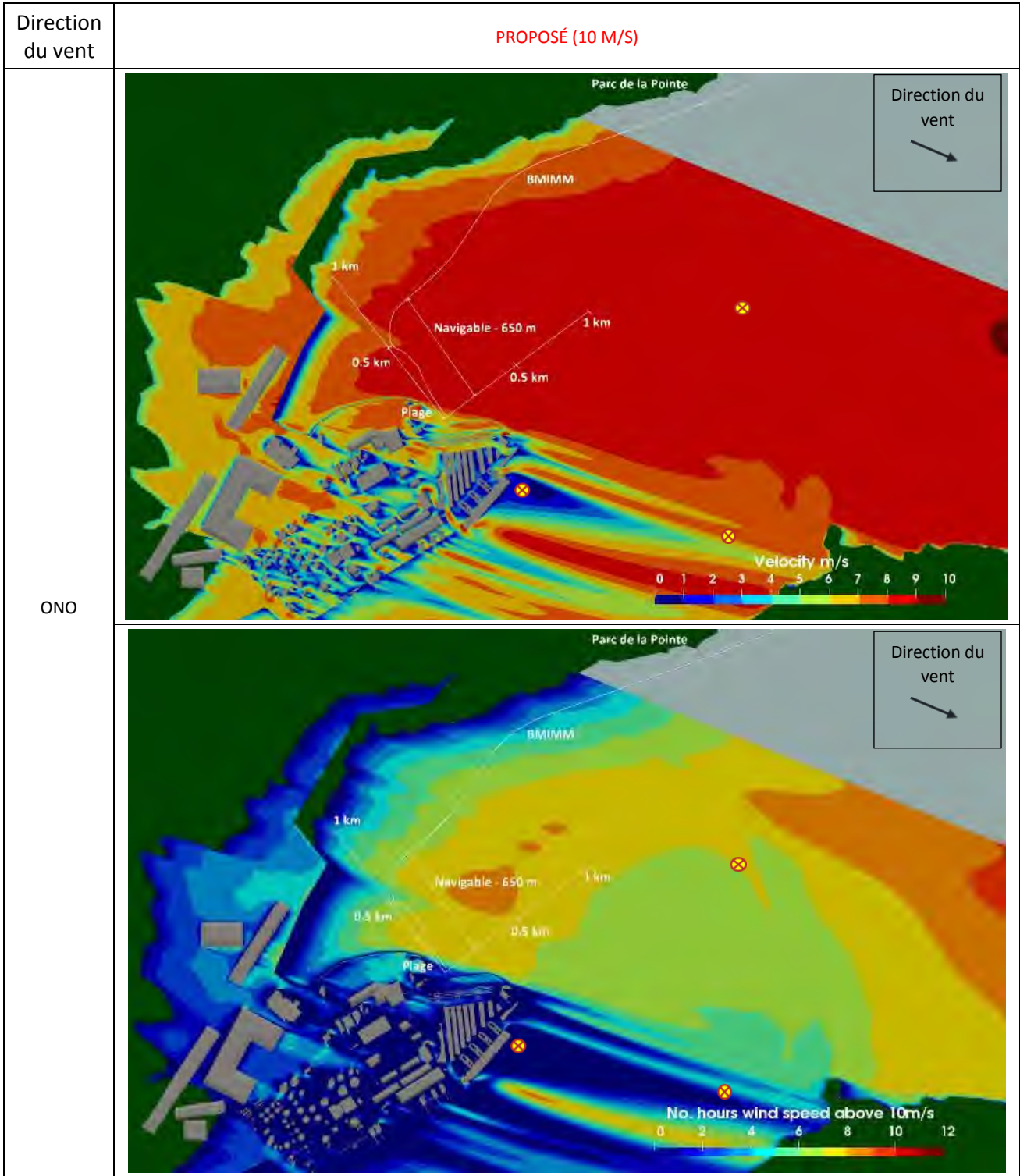
PROPOSÉ (4 M/S)

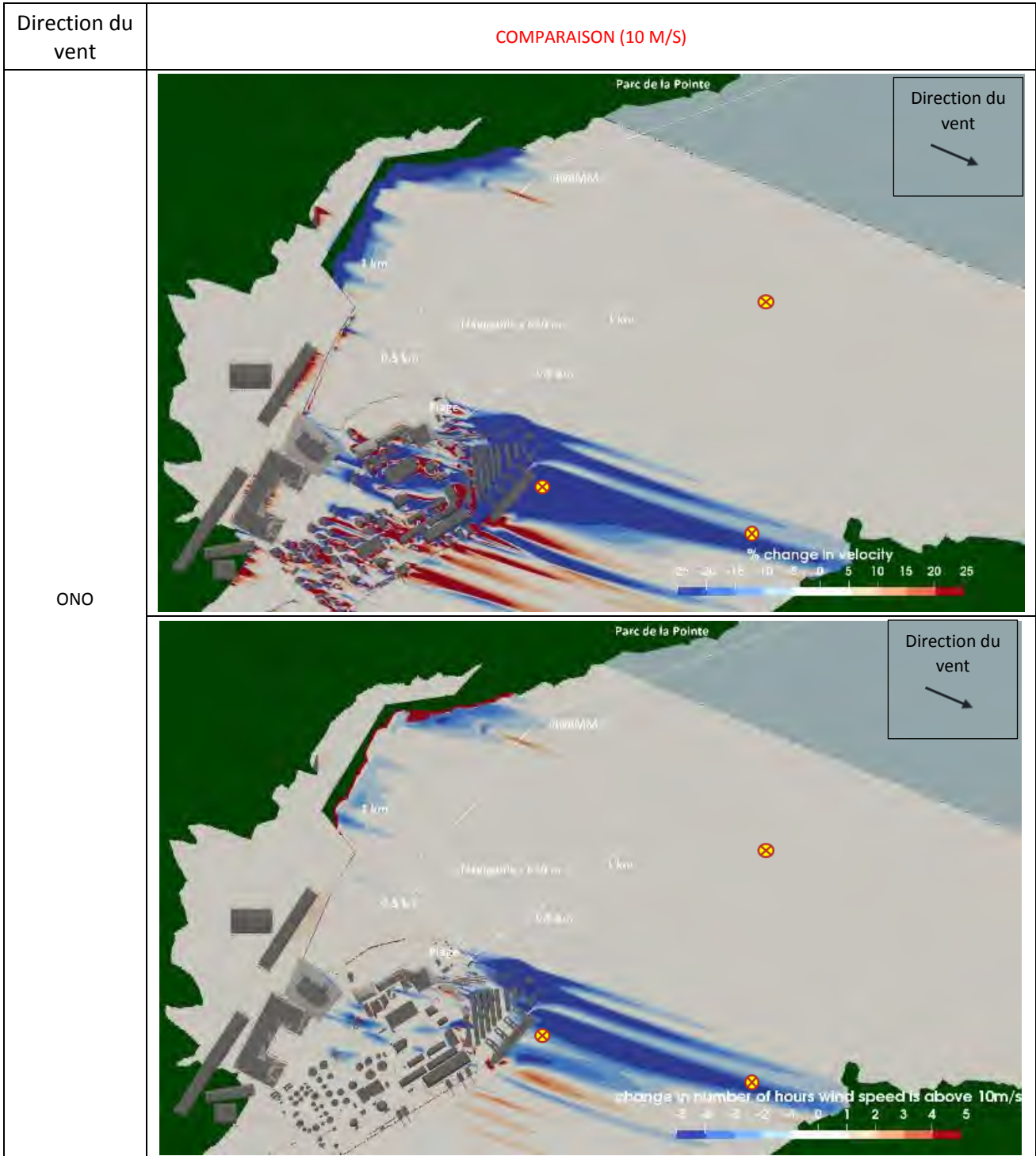
ONO



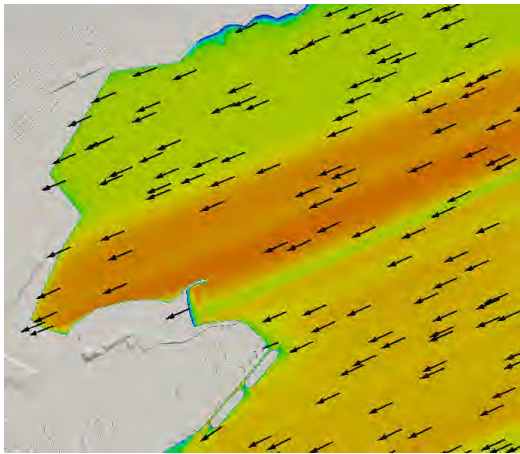






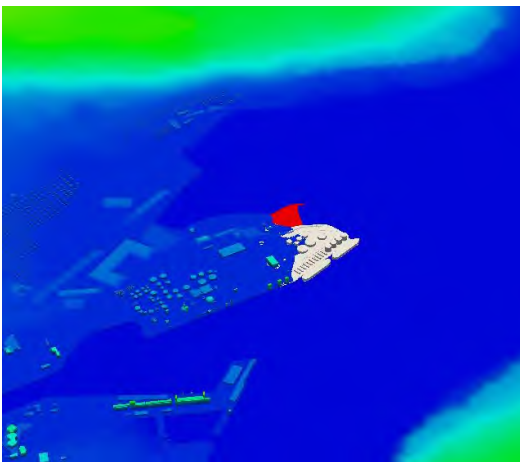


B ÉTUDE DE VENT – GROUPE LASALLE 2016



PORT QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR DE BEAUPORT
ÉTUDE SUR MODÈLE NUMÉRIQUE
DES IMPACTS ÉOLIENS

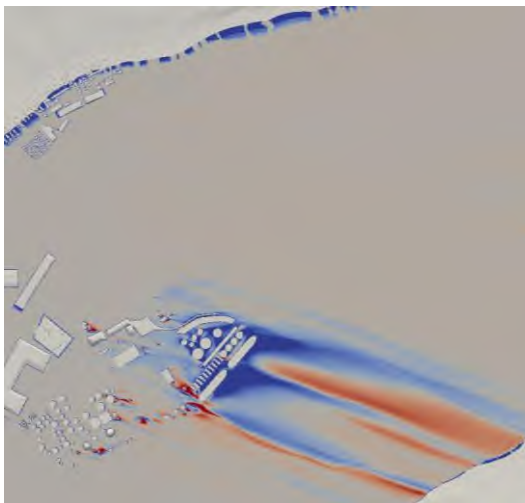
R0095
Version FINALE RÉVISION 1



Préparé pour:



Administration Portuaire de Québec



Décembre 2016

No référence lasalle | NHC 08002189

**PORT DE QUÉBEC – EXTENSION DU SECTEUR DE BEAUPORT
ÉTUDE SUR MODÈLE NUMÉRIQUE DES IMPACTS ÉOLIENS**

**RAPPORT FINAL RÉVISION 1
R.0095**

Préparé pour:

Administration Portuaire de Québec
Québec, Québec

Préparé par:

Lasalle | NHC
Montréal, Québec

Décembre 2016

NHC Ref No. 8002189

Préparé par:

<original signed by>

<original signed by>

Guillaume Lamothe, Ing.Jr. no. OIQ 5020370
Ingénieur junior

Wael Taha, Ing. no. OIQ 133365
Ingénieur de projets, associé

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ.

Ce document a été préparé par Lasalle|NHC de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de l'**Administration Portuaire de Québec** à la Ville de Québec, Québec. Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

Lasalle|NHC et ses directeurs, associés, employés et mandataires n'assument aucune responsabilité à l'utilisation ou au recours du présent document ou de son contenu par des parties autres que l'**Administration Portuaire de Québec**.

TABLE DES MATIÈRES

TABLE DES MATIÈRES	II
LISTE DES FIGURES	III
1 INTRODUCTION	1
2 DESCRIPTION DU SITE ET DU PROJET	3
2.1 Description du site de la baie de Beauport	3
2.2 Projet d’extension portuaire - secteur Beauport	3
2.2.1 Brise-lame conventionnel	4
2.2.2 Brise-lame submersible	5
3 ANALYSE DU RÉGIME DES VENTS	6
3.1 Station météorologique de référence	6
3.2 Vents favorables à la pratique de la planche à voile et du Kitesurf	6
4 MODÈLE NUMÉRIQUE	7
4.1 Le modèle numérique	7
4.2 Domaine de calcul	7
4.3 Conditions aux limites	8
5 IMPACTS ÉOLIENS DU PROJET	10
5.1 Vents de secteur ENE	10
5.1.1 Niveau moyen	10
5.1.2 Niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne	11
5.1.3 Niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne	12
5.2 Vents de secteur ONO	13
5.2.1 Niveau moyen	13
5.2.2 Niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne	14
5.2.3 Niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne	14
5.3 Vents de secteur OSO	15
5.3.1 Niveau moyen	15
5.3.2 Niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne	16
5.3.3 Niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne	16
5.4 Vents de secteur SE	17
5.4.1 Niveau moyen	17
5.5 Synthèse et Recommandations	18
6 CONCLUSIONS	21
7 RÉFÉRENCES	22

LISTE DES FIGURES

- FIGURE 1 : Localisation du site
- FIGURE 2 : Topographie
- FIGURE 3 : Description du projet
- FIGURE 4 : Variantes de brise-lame
- FIGURE 5 : Régime des vents
- FIGURE 6 : Domaine de calcul
- FIGURE 7 : Résultats par vent de secteur ENE – Vitesses relatives – niveau moyen – brise-lame conventionnel
- FIGURE 8 : Résultats par vent de secteur ENE – Écart relatifs – niveau moyen – brise-lame conventionnel
- FIGURE 9 : Résultats par vent de secteur ENE – Vitesses relatives – niveau moyen – brise-lame submersible
- FIGURE 10 : Résultats par vent de secteur ENE – Écart relatifs – niveau moyen – brise-lame submersible
- FIGURE 11 : Résultats par vent de secteur ENE – Vitesses relatives – niveau PMSMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 12 : Résultats par vent de secteur ENE – Écart relatifs – niveau PMSMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 13 : Résultats par vent de secteur ENE – Vitesses relatives – niveau PMSMM – brise-lame submersible
- FIGURE 14 : Résultats par vent de secteur ENE – Écart relatifs – niveau PMSMM – brise-lame submersible
- FIGURE 15 : Résultats par vent de secteur ENE – Vitesses relatives – niveau BMIMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 16 : Résultats par vent de secteur ENE – Écart relatifs – niveau BMIMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 17 : Résultats par vent de secteur ENE – Vitesses relatives – niveau BMIMM – brise-lame submersible

-
- FIGURE 18 : Résultats par vent de secteur ENE – Écart relatifs – niveau BMIMM – brise-lame submersible
- FIGURE 19 : Résultats par vent de secteur ONO – Vitesses relatives – niveau moyen – brise-lame conventionnel
- FIGURE 20 : Résultats par vent de secteur ONO – Écart relatifs – niveau moyen – brise-lame conventionnel
- FIGURE 21 : Résultats par vent de secteur ONO – Vitesses relatives – niveau moyen – brise-lame submersible
- FIGURE 22 : Résultats par vent de secteur ONO – Écart relatifs – niveau moyen – brise-lame submersible
- FIGURE 23 : Résultats par vent de secteur ONO – Vitesses relatives – niveau PMSMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 24 : Résultats par vent de secteur ONO – Écart relatifs – niveau PMSMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 25 : Résultats par vent de secteur ONO – Vitesses relatives – niveau PMSMM – brise-lame submersible
- FIGURE 26 : Résultats par vent de secteur ONO – Écart relatifs – niveau PMSMM – brise-lame submersible
- FIGURE 27 : Résultats par vent de secteur ONO – Vitesses relatives – niveau BMIMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 28 : Résultats par vent de secteur ONO – Écart relatifs – niveau BMIMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 29 : Résultats par vent de secteur ONO – Vitesses relatives – niveau BMIMM – brise-lame submersible
- FIGURE 30 : Résultats par vent de secteur ONO – Écart relatifs – niveau BMIMM – brise-lame submersible
- FIGURE 31 : Résultats par vent de secteur OSO – Vitesses relatives – niveau moyen – brise-lame conventionnel
- FIGURE 32 : Résultats par vent de secteur OSO – Écart relatifs – niveau moyen – brise-lame conventionnel
- FIGURE 33 : Résultats par vent de secteur OSO – Vitesses relatives – niveau moyen – brise-lame submersible

-
- FIGURE 34 : Résultats par vent de secteur OSO – Écarts relatifs – niveau moyen – brise-lame submersible
- FIGURE 35 : Résultats par vent de secteur OSO – Vitesses relatives – niveau PMSMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 36 : Résultats par vent de secteur OSO – Écarts relatifs – niveau PMSMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 37 : Résultats par vent de secteur OSO – Vitesses relatives – niveau PMSMM – brise-lame submersible
- FIGURE 38 : Résultats par vent de secteur OSO – Écarts relatifs – niveau PMSMM – brise-lame submersible
- FIGURE 39 : Résultats par vent de secteur OSO – Vitesses relatives – niveau BMIMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 40 : Résultats par vent de secteur OSO – Écarts relatifs – niveau BMIMM – brise-lame conventionnel
- FIGURE 41 : Résultats par vent de secteur OSO – Vitesses relatives – niveau BMIMM – brise-lame submersible
- FIGURE 42 : Résultats par vent de secteur OSO – Écarts relatifs – niveau BMIMM – brise-lame submersible
- FIGURE 43 : Résultats par vent de secteur SE – Vitesses relatives – niveau moyen – brise-lame submersible
- FIGURE 44 : Résultats par vent de secteur SE – Écarts relatifs – niveau moyen – brise-lame submersible

1 INTRODUCTION

L'Administration portuaire de Québec (APQ) poursuit actuellement son projet d'extension du secteur Beauport, avec la mise en place de deux nouveaux quais (54 et 55). Outre les enjeux touchant directement les besoins et objectifs du port de Québec, ce projet comporte un important volet récréotouristique, avec l'aménagement dans la portion nord de l'extension d'un parc et de plages destinées à la baignade et aux sports nautiques.

L'APQ désire aujourd'hui finaliser la configuration de l'extension portuaire dans le secteur des plages, en vue de passer aux phases avant-projet et projet. Parmi les études requises, il importe de déterminer quel sera l'impact de l'aménagement projeté sur les conditions de vent s'offrant aux adeptes de planche à voile et de kitesurf fréquentant la baie de Beauport.

En effet, depuis le milieu des années 1980, la baie de Beauport est un site reconnu dans la région de Québec pour la pratique de la planche à voile. Depuis un peu plus d'une dizaine d'années, la pratique du kitesurf y a également connu un essor considérable. Les fonds sableux, l'absence relative de courants de marée et la constance des vents, surtout ceux issus des secteurs est et nord-est, ont fait de ce site un lieu populaire pour la pratique de ces sports.

En vue de répondre aux questions soulevées quant à l'impact du nouvel aménagement portuaire sur les conditions de vent s'offrant aux adeptes de planche à voile et de kitesurf, l'APQ a chargé Lasalle | NHC de réaliser une étude de modélisation numérique tridimensionnelle de la circulation des vents. Cette étude a pour objectif d'évaluer les conditions de vent sur la baie de Beauport en présence des nouveaux aménagements et de comparer ces conditions à celles prévalant actuellement. L'étude porte essentiellement sur trois directions de vent recherchées par les amateurs de voile fréquentant le site.

À la fin de l'année 2014, Lasalle|NHC a remis à l'APQ un rapport d'étude portant sur la finalisation d'une variante correspondant à un volume de remblai maximal de 400 000 m³ pour la zone récréotouristique. Au même moment, une première étude de modélisation numérique 3D a permis d'établir l'impact du nouvel aménagement sur les conditions de vent ressenties par les plaisanciers utilisant le site. Un an plus tard, après avoir progressé dans le processus d'évaluation environnementale du projet, l'APQ a demandé à Lasalle|NHC de développer et de valider une nouvelle variante de la zone récréotouristique ayant un empiètement réduit. La variante finale recommandée au terme de cette étude correspondait à un volume de remblai de 220 000 m³. La présente étude vise donc à actualiser les résultats de l'étude d'impacts éoliens de 2014 avec la variante finale de la zone récréotouristique. De plus, l'étude actuelle couvre également la gamme complète des niveaux de marée, de même que les deux configurations de brise-lames actuellement à l'étude, soit un ouvrage conventionnel et une variante submersible de dimensions moins importantes.

Le présent rapport rend compte de la méthodologie et des résultats de l'étude selon six sections distinctes. Le site et le projet d'extension est d'abord décrit à la section 2. La section 3 présente ensuite une analyse du régime des vents applicable au site à l'étude. Les caractéristiques du modèle numérique et les

conditions de simulation sont présentées à la section 4. La section 5 présente les résultats. La section 6 expose les conclusions.

2 DESCRIPTION DU SITE ET DU PROJET

2.1 Description du site de la baie de Beauport

Les vents étant généralement influencés par le relief qu'ils rencontrent, il apparaît essentiel d'analyser la topographie du secteur étudié afin de mieux comprendre le comportement des vents ainsi que les éventuels effets horographiques de la région. Ce qui suit met donc en évidence les particularités topographiques du site.

La baie de Beauport se situe entre Québec et Beauport et est bordée au sud par la pointe de Beauport et au nord par la rive nord du fleuve Saint-Laurent. La pointe de Beauport fait pratiquement face à la pointe sud-ouest de l'île d'Orléans. La figure 1 illustre la localisation du site à l'étude.

La pointe de Beauport est située à l'embouchure de la rivière Saint-Charles. Cette dernière coule de l'ouest vers l'est sur ses 10 derniers km dans le fond d'une large vallée peu encaissée bordée par la Colline de Québec au sud, avec une centaine de mètres d'altitude, et la zone vallonnée de Charlesbourg au nord (également 100 m d'altitude environ). Sur une distance de 5 km en amont de l'embouchure, l'altitude du fond de la vallée est inférieure à 20 m sur une largeur d'environ 4 km. La figure 2 illustre la topographie du secteur.

Dans l'arrondissement Beauport, soit au nord immédiat de la baie, l'altitude du terrain augmente progressivement sur 2 km, du fleuve Saint-Laurent jusqu'à l'autoroute Felix Leclerc (altitude de 100 m). Au nord de l'autoroute, on relève la présence d'un plateau à une centaine de mètres d'altitude sur environ 3 km vers le nord. Plus loin, au nord de Beauport (soit à une douzaine de kilomètres de la baie), la région est plus montagneuse avec des points culminants à plus de 500 m d'altitude (Mont-Saint-Louis, Montagne-des-Trois-Sommets).

À l'est de Montmorency, le chenal nord de l'île d'Orléans est encaissé entre la rive nord du Saint-Laurent et la côte nord de l'île, toutes deux présentant un versant abrupt jusqu'à 100 m d'altitude.

Au sud de la baie, les points culminants sont la colline de Québec (100 m), avec le Cap Diamant à l'extrémité est, et le secteur Lauzon à Lévis (environ 100 m également).

D'une manière générale, la baie de Beauport est donc dans une zone relativement dégagée dans l'axe est-ouest (fleuve Saint-Laurent et vallée de la Saint-Charles) alors que le relief est plus significatif sur l'axe nord-sud avec des altitudes caractéristiques de l'ordre de 100 m (Québec-Lévis, hauteur de Beauport).

2.2 Projet d'extension portuaire - secteur Beauport

Les installations portuaires occupent actuellement la majeure partie de la pointe de Beauport. Les quais sont aménagés sur la berge sud de la pointe. La plage actuelle est située à l'extrémité nord-est de la pointe de Beauport alors que le long de la berge nord, un petit parc est aménagé. Les figures 1 et 3 illustrent les installations portuaires actuelles.

Le projet d'extension consiste à prolonger l'extrémité nord-est de la pointe de Beauport. D'une part la moitié sud de ce prolongement accueillera un nouveau quai industriel (610 m de longueur) ainsi que de nouvelles installations potentielles telles que des réservoirs cylindriques, des grues, un terminal ferroviaire et une zone de stockage de conteneurs. Les éléments potentiels des nouvelles installations présentent diverses hauteurs (voir figure 3) :

- La ligne des nouveaux quais fait un angle de 17 degrés avec la ligne actuelle de quai, le niveau du quai est conservé (5,36 m).
- Le projet prévoit la construction d'une série de quatre réservoirs de 48 m de diamètre et d'une hauteur de 43,3 m au-dessus du niveau du quai, à proximité de la bordure du quai (figure 3);
- Trois réservoirs de 18,3 m de hauteur et quatre réservoirs de 17,1 m de hauteur seront construits dans la partie centrale de l'extension portuaire;
- La hauteur de l'empilement de conteneurs en bordure de quai a été estimée à 12 m;
- La hauteur des wagons est de 4,65 m.

D'autre part, une plage et un parc seront aménagés sur la moitié nord du prolongement de la pointe de Beauport. Tel qu'illustré à la figure 3, la plage aura une longueur d'environ 240 m (nord-sud) et une largeur de 80 m (est-ouest). Le sommet de la plage est à une élévation géodésique de 5,3 m et la pente de celle-ci est de 4% sur une longueur d'environ 110 m, puis la pente augmente ensuite à 7,6% sur une trentaine de mètres pour se redresse enfin à 4% jusqu'à rejoindre le fond marin. Signalons que la plage sera séparée en deux sections. La première section aura une longueur de 100 m et sera réservée à la baignade, alors que la deuxième section sera réservée à la mise à l'eau des voiliers. La localisation des deux sections n'est pas encore déterminé à ce stade.

Deux brises lames sont envisagés pour cerner la plage à l'extrémité nord de la pointe de Beauport.

2.2.1 Brise-lame conventionnel

Le brise-lame conventionnel est un épi en enrochement de 230 m de long. Les caractéristiques géométriques de l'épi sont présentées à la figure 4 et consistent en :

- Un tronç de 170 m de long avec une crête de 2,1 m de large à élévation constante au niveau géodésique de 5,5m et des pentes latérales de 1:1,5;
- Un musoir avec une crête à élévation variable sur les deniers 60 m et des pentes latérales de 1:1,4.

2.2.2 Brise-lame submersible

Le brise-lame submersible est un épi en enrochement de 230 m de long composé d'une partie identique au brise-lame conventionnel et d'une partie submersible. Les caractéristiques géométriques de l'épi sont présentées à la figure 4 et consistent en :

- Un tronç de 90 m de long et une crête de 2,0 m de large à élévation constante au niveau géodésique de 5,5m sur et des pentes latérales de 1:1,5;
- Une transition de 10 m entre tronç conventionnel et le tronç submersible;
- Un tronç de 130 m de long avec une crête à élévation variable et des pentes latérales de 1:2.

3 ANALYSE DU RÉGIME DES VENTS

3.1 Station météorologique de référence

Les données horaires de vent sont enregistrées de manière systématique à la station d'Environnement Canada à l'Aéroport international Jean-Lesage de Québec. Ce dernier est situé à environ 15 km au sud-ouest de la pointe de Beauport dans une zone rurale dégagée à la topographie relativement plane. De plus, l'axe reliant l'aéroport et la pointe de Beauport est lui aussi dégagé puisqu'il passe dans la vallée de la rivière Saint-Charles (voir section 2.2).

La figure 5 présente la rose des vents obtenue pour la période de 1980 à 2013. Les données mettent en évidence deux secteurs prédominants : le premier, centré sur l'ouest-sud-ouest (OSO) prévaut 54% du temps alors que le secteur est-nord-est (ENE) compte pour 37% des observations. Les secteurs dominants de l'OSO et de l'ENE, qui représentent ainsi près de 90% des épisodes de vent, correspondent à l'orientation de la vallée du Saint-Laurent.

Par ailleurs une station météorologique est exploitée par Environnement Canada sur la pointe de Beauport (station 7010566). Les données de cette station entre 2009 et 2014 permettent d'établir que les vents dominants sont également de l'OSO et de l'ENE avec des fréquences similaires, soit environ 50% pour le secteur OSO et 35% pour le secteur ENE.

La comparaison de ces deux stations montre que les vents enregistrés à l'aéroport Jean-Lesage de Québec sont à la fois bien représentatifs du site élargi et du secteur à l'étude. Les données de vents y étant aisément disponibles sur une très longue période, cette station est alors retenue comme station de référence.

3.2 Vents favorables à la pratique de la planche à voile et du Kitesurf

Les informations recueillies sur les sites spécialisés de planche à voile et de kitesurf permettent d'établir que les vents les plus intéressants pour la pratique de ces sports sont les vents dominants du secteur ENE en premier lieu, puis les vents du secteur ONO. En revanche, les vents dominants du secteur OSO ne semblent pas être très prisés par les planchistes et kitesurfeurs.

Les vents du secteur ENE sont réputés pour être relativement stables et pour être souvent associés à la présence de vagues consistantes, conditions recherchées par nombre de pratiquants. De plus, d'un point de vue de la sécurité, ces vents sont intéressants puisqu'ils soufflent vers la pointe de Beauport et le fond de la Baie.

Les vents du secteur ONO sont plus rares et connus pour être moins stables, caractérisés par de nombreuses rafales, mais offrent un plan d'eau plus lisse dans la baie et à proximité de la pointe de Beauport. Ces vents soufflant vers le large peuvent être plus risqués pour les usagers les moins expérimentés.

4 MODÈLE NUMÉRIQUE

4.1 Le modèle numérique

La modélisation des écoulements de vent dans le cadre de l'étude a été effectuée à l'aide d'un modèle numérique tridimensionnel de la suite OpenFoam, qui résout par la méthode des volumes finis les équations de base de la dynamique des fluides (équations de Navier-Stokes).

La turbulence de l'écoulement est modélisée à l'aide de la formulation Spalart-Almaras (SA), en régime stationnaire. Ce modèle est largement utilisé en aérodynamique et dans les cas de figure faisant intervenir un écoulement non confiné. La prise en compte de la turbulence permet non seulement d'aboutir à une solution réaliste du champ moyen d'un écoulement turbulent, mais aussi d'évaluer l'intensité turbulente en chacun des points du domaine de calcul.

L'intensité turbulente est une caractéristique de la turbulence du vent. Elle représente la composante pulsative du vent. Elle est normalement donnée par le rapport entre l'écart type de la vitesse du vent qui varie dans le temps et la vitesse moyenne.

Bien qu'intrinsèquement non stationnaire, la turbulence peut être modélisée avec une approche stationnaire en utilisant un paramètre de viscosité turbulente permettant de caractériser l'intensité turbulente. En effet, les travaux sur banc d'essais numérique menés par notre entreprise ont permis de mettre en évidence une relation explicite entre l'intensité turbulente en régime non stationnaire et la viscosité turbulente du modèle SA en régime stationnaire. Ainsi, les simulations effectuées en régime stationnaire dans un domaine complexe permettent d'obtenir la vitesse moyenne de l'écoulement et l'intensité turbulente.

4.2 Domaine de calcul

La figure 6 présente le domaine modélisé qui englobe un quadrilatère d'environ 12 km de côté centré sur la pointe de Beauport.

La maquette tridimensionnelle de la topographie a été réalisée à partir des cartes numériques au 1/20 000 du Ministère des Ressources Naturelles du Québec (MRN). Ces cartes présentent des courbes de niveau séparées d'un intervalle de 10 m.

La topographie plus fine de la pointe de Beauport ainsi que les bâtiments des zones urbaines ou industrielles adjacentes proviennent de plans numériques obtenus auprès de la division de l'arpentage et de la cartographie du service de l'ingénierie de la Ville de Québec. Seuls les bâtiments les plus imposants bordant l'estuaire de la rivière Saint-Charles et l'autoroute 440 ont été représentés. Le secteur résidentiel situé entre l'autoroute 440 et la route 138 a été représenté de manière schématique afin de reproduire la rugosité caractéristique du tissu urbain (figure 6).

Les installations portuaires et les bâtiments de la pointe de Beauport ont été reproduits de manière plus détaillée puisque situés dans le voisinage immédiat de la baie et de la plage.

Les nouvelles installations portuaires ainsi que les nouvelles plages, incluant le brise-lame, ont été reproduites d'après les données fournies par l'APQ.

Le volume défini par le domaine de calcul a été discrétisé à l'aide d'un maillage hexaédrique comptant environ 23 000 000 d'éléments, permettant de prendre en compte la topographie ainsi que la géométrie des bâtiments. La taille des mailles est variable selon l'importance des détails de l'écoulement que l'on recherche. Ainsi le maillage est raffiné près des surfaces et est plus grossier en altitude.

Les simulations ont été effectuées pour des maillages avec différents niveaux d'eau, soit en considérant :

- le niveau moyen de la marée à Québec soit +0,6 m dans le système géodésique;
- le niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne à Québec soit +2,9 m dans le système géodésique;
- le niveau d'eau à la basse mer inférieure de marée moyenne à Québec soit -1,5 m dans le système géodésique.

4.3 Conditions aux limites

Les directions du vent modélisées correspondent aux vents issus des secteurs ENE, ONO et OSO. Compte tenu de l'orientation du domaine de calcul, pour chaque direction de vent, une condition de vitesse est imposée sur deux frontières.

La condition de vitesse se traduit par un profil de vitesses logarithmique caractéristique de la couche limite atmosphérique développée au-dessus du secteur d'étude. L'équation suivante décrit ce profil :

$$\frac{U}{U_{ref}} = \frac{\ln\left(\frac{z + Z_0}{Z_0}\right)}{\ln\left(\frac{z_{ref} + Z_0}{Z_0}\right)}$$

Où U est la vitesse, $U_{ref} = 17,1$ m/s est la vitesse de référence à la fin du profil logarithmique (m/s), z est la coordonnée verticale, $z_{ref} = 270$ m est l'altitude de référence à la fin du profil logarithmique et $Z_0 = 0,1$ m est le facteur de rugosité typique d'une zone dégagée. Le profil ainsi établi présente une vitesse de 10 m/s à 10 m du sol, soit à la hauteur de la station de référence.

Les frontières du modèle sont relativement éloignées de la zone d'intérêt et situées dans des secteurs caractérisés par des constructions de faible hauteur et relativement dégagés, des valeurs typiques des paramètres ont donc été choisies tel que présenté précédemment. Il est important de souligner que la

présence des bâtiments dans le secteur de la pointe de Beauport permettra au profil de se développer afin de refléter les conditions du site.

Les résultats seront essentiellement présentés sous la forme d'une vitesse relative définie par le rapport entre la vitesse obtenue en un point et la vitesse du profil de vitesse à l'entrée du modèle à 10 m de hauteur, soit 10 m/s. La vitesse absolue imposée au modèle peut donc être arbitraire.

Les paramètres caractérisant la turbulence ont été réglés de manière à ce que l'intensité turbulente de l'écoulement incident imposé aux frontières du modèle soit représentative de celle d'un vent non perturbé soufflant au-dessus d'une zone à la topographie variable incluant des secteurs construits, soit une valeur typique de $i=0,25$.

L'écoulement aux parois (sol et murs des bâtiments) a été traité par des fonctions de paroi qui permettent de s'affranchir de résoudre les couches limites et donc de réduire les temps de calculs.

Les autres frontières du modèle correspondent à des sorties libres où la pression atmosphérique a été imposée, cette dernière étant définie comme pression de référence dans tout le domaine de calcul.

5 IMPACTS ÉOLIENS DU PROJET

Tel qu'indiqué aux sections précédentes, les simulations ont été effectuées pour les secteurs centrés sur les quatre directions de vent suivantes:

- Secteur ENE, vents dominants et favorables à la pratique de la planche à voile et du kitesurf;
- Secteur ONO, plus rares mais favorables à la pratique de la planche à voile et du kitesurf;
- Secteur OSO, vents dominants mais moins recherchés par les amateurs de planche à voile et de kitesurf;
- Secteur SE, direction étudiée à la demande de l'APQ, mais qui représente moins de 3% des épisodes de vents dans la région.

Chaque résultat de simulation est représentatif du champs d'écoulement d'un secteur au complet couvrant +/-22,5° autour des directions ci-dessus. Ainsi, les résultats de la direction ENE sont représentatifs des résultats du secteur couvrant les directions du NE à l'E, la direction de l'ONO couvrant de l'O au NO, la direction OSO couvrant du SO à l'O et enfin la direction SE couvrant de l'ESE au SSE.

Les figures illustrent les résultats à trois hauteurs différentes, 1,4 m, 4,4 m et 9,4 m au-dessus du plan d'eau (ce qui correspond à 2 m, 5 m et 10 m d'altitude au niveau moyen de la marée). Ces valeurs représentent les hauteurs typiques auxquelles le vent interagit avec les voiles des planches à voile et kitesurf.

Les résultats sont présentés sous trois formes :

- Champs de vitesses relatives en conditions actuelles et en conditions futures (rapport entre la vitesse obtenue en un point et la vitesse à 10 m du sol à l'entrée du modèle);
- Champ d'écart relatif de la vitesse permettant d'évaluer l'augmentation ou la diminution de la vitesse en chacun des points de calcul et exprimé en pourcentage.
- Champ d'écart relatif de l'intensité turbulente permettant d'évaluer l'augmentation ou la diminution de la pulsation du vent en chacun des points de calcul et exprimé en pourcentage.

5.1 Vents de secteur ENE

5.1.1 Niveau moyen

Les figures 7 à 10 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lames à l'étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Les résultats des simulations par vent incident du secteur ENE sont illustrés aux figures 7 et 9 pour les deux variantes. L'examen des champs de vitesses permet d'établir que les vents incidents sont légèrement affectés par la topographie de l'île d'Orléans et par les chenaux qui la contournent pour donner lieu à une concentration de vitesses au-dessus de la baie de Beauport. En effet, les courants de vents sont canalisés dans les chenaux et se rejoignent dans le secteur de la baie de Beauport avec des vitesses résultantes accrues. Cet aspect est obtenu aussi bien en conditions actuelles qu'après l'extension des installations portuaires et de la plage.

En se référant aux champs d'écart relatif de la vitesse, on constate que les nouvelles installations portuaires et la plage impactent les vitesses de vent sur la partie la plus au sud de la baie de Beauport et devant la plage. Les brise-lames créent un obstacle aux vents, réduisant les vitesses dans la partie nord de la plage et forçant une partie de l'écoulement d'une part, vers la baie de Beauport, et d'autre part vers le sud de la plage. Cette tendance est observée aux trois plans et pour les deux variantes de brise-lame à l'étude.

L'écart relatif de l'intensité turbulente est présenté aux figures 8b et 10b. Comme pour les vitesses, le brise-lame sépare l'écoulement en deux veines distinctes de part et d'autre du brise-lame. Toutefois, la tendance est l'inverse de ce qui est constaté pour les vitesses : la zone de réduction de vitesses s'accompagne d'une augmentation de la turbulence et vice-versa. De plus, les variations d'intensité turbulente augmentent en fonction de l'élévation du plan soit 0,5-1% de variation à 1,4 m au-dessus du niveau de l'eau comparé à 20 % à 9,4 m.

En somme, la mise en place du brise-lame, autant le brise-lame conventionnel que le brise-lame submersible, impact légèrement les conditions éoliennes déviant une partie de l'écoulement vers le sud de la baie et vers la partie sud de la plage. De plus, la turbulence est augmentée devant la plage, ce qui augmente les fluctuations de vitesses des vents dans le secteur, surtout en altitude. L'augmentation de la turbulence nuit légèrement à la pratique des sports nautiques au large de la plage.

5.1.2 Niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Les figures 11 à 14 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lame à l'étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Les résultats des simulations par vent incident du secteur ENE au niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne sont illustrés aux figures 11 et 13. Comme mentionné dans la section 5.1.1, les vents incidents sont légèrement affectés par la topographie de l'île d'Orléans et par les chenaux qui la contournent. Les multiples simulations en direction ENE ont permis de constater une oscillation du champ de vitesses dans le sillage de l'île d'Orléans ce qui est normal pour un effet de sillage important. Les figures 7 et 11 illustrent les deux états entre lesquels le champ de vitesse oscille. La figure 7 présente des vitesses élevées localisées dans une large bande au sud de la baie et des vitesses relativement faibles au centre de la baie, alors que la figure 11 présente des vitesses élevées concentrées sur une mince bande au centre de la baie et de faibles vitesses dans le secteur sud. La topographie de l'île d'Orléans cause cette instabilité

macroscopique et génère un champ de vitesses qui oscille continuellement entre les deux états, autant en conditions actuelles qu'en conditions futures.

Les écarts relatifs de la vitesse sont présentés aux figures 12a et 14a. Au niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne, le volume des brise-lames au-dessus du niveau d'eau est réduit comparativement au niveau moyen. La volumétrie réduite engendre des impacts plus modestes sur les vitesses. À la figure 12a, aucune fluctuation de vitesse n'est observée. La figure 14a présente des légères variations des vitesses dans la baie de Beauport. Ces variations ne sont probablement pas causées par le brise-lame submersible, mais plutôt par l'instabilité de l'écoulement décrite ci-dessus.

L'écart relatif de l'intensité turbulente est présenté aux figures 12b et 14b. Comme pour le champ des vitesses, l'augmentation de l'intensité turbulente est négligeable pour les deux variantes de brise-lame. L'augmentation de la turbulence en altitude constatée pour le brise-lame submersible s'explique vraisemblablement par l'instabilité de l'écoulement dans le sillage de l'Île d'Orléans.

En somme, la mise en place du brise-lame, autant le brise-lame conventionnel que le brise-lame submersible, n'a aucun impact tangible sur les conditions éoliennes qui prévalent actuellement sur le site au niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne. Les petits écarts de vitesse et de l'intensité turbulente sont inférieurs aux variations naturelles de l'écoulement produites par l'effet de sillage en aval de l'Île d'Orléans.

5.1.3 Niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne

Les figures 15 à 18 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lame à l'étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Les résultats des simulations par vent incident du secteur ENE au niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne sont illustrés aux figures 15 et 17 pour les deux variantes de brise-lame. L'oscillation des vitesses mentionnée dans la section 5.1.2 est aussi présente au niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne. Les résultats présentés aux figures 15 et 17 ne mettent en évidence aucun impact majeur sur les patrons d'écoulement généraux dans le secteur de la baie de Beauport.

Les figures 16a et 18a présentent l'écart relatif des vitesses dans le secteur de la baie de Beauport, pour les deux variantes de brise-lame. Les conditions de vents présentées à la figure 16a et 18a montrent des changements de vitesse de faibles amplitudes sur de courtes distances dans le secteur de la baie de Beauport, et ce pour les deux brise-lames. De plus, on constate une réduction notable des vitesses dans l'axe du brise-lame, ainsi qu'une augmentation des vitesses au-dessus de la plage et au sud de la Baie de Beauport. Comme pour le niveau moyen, les brise-lames semblent dévier l'écoulement dans l'axe des structures vers le nord et vers le sud.

La fluctuation de la turbulence est présentée aux figures 16b et 18b. À 1,4 m au-dessus du niveau d'eau, les impacts sont négligeables, pour les deux variables de brise-lame. Aux plans de 4,4 et de 9,4m, les brise-lames génèrent une augmentation de l'intensité turbulente au sud de la baie de Beauport et à l'est de la plage. De plus, on observe une réduction dans l'axe du brise-lame, pour les deux brise-lames. Cette

tendance est similaire aux résultats du niveau moyen, à savoir que la turbulence est augmentée en altitude dans le secteur ou la vitesse est ralenti par les brise-lames.

En somme, la mise en place du brise-lame, au niveau de basse mer inférieure, a un impact sur les conditions éoliennes et la pratique des sports nautiques dans le sud de la baie de Beauport, ainsi qu'à l'est de la plage.

5.2 Vents de secteur ONO

5.2.1 Niveau moyen

Les figures 19 à 22 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lame à l'étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Les résultats par vents de secteur ONO sont présentés aux figures 19 et 21 pour les deux variantes. Les champs des vitesses indiquent que les courants de vents sont légèrement perturbés par le relief et le bâti en bordure de la baie de Beauport. De plus, on note que les futures installations portuaires forment un écran éolien quasi perpendiculaire à l'écoulement du vent de secteur ONO, formant un obstacle majeur pour les vents. Le sillage de l'extension portuaire perturbe considérablement le champ de vitesse. En aval des installations portuaires, on observe une réduction des vitesses à proximité des structures, suivis d'une concentration de l'écoulement et de l'augmentation des vitesses. De plus, le sillage des installations portuaires est soumis à une augmentation considérable de l'intensité turbulente, ce qui est habituellement le cas dans un sillage important. Toutefois, vu l'orientation des vents de secteur ONO et la localisation de l'extension portuaire les impacts ne seront pas ressentis au-dessus de la baie de Beauport.

En ce qui concerne le secteur de la plage, une zone de vitesses élevées se développe au-dessus du brise-lame. Les figures 19b et 21b démontrent que la volumétrie plus importante du brise-lame conventionnel génère des vitesses légèrement plus élevées que le brise-lame submersible. De plus, un effet de sillage est observé au sud-est des brise-lames, particulièrement pour les plans à 1,4 et 4,4, m au-dessus de la surface de l'eau.

Les figures 20a et 22a présentent l'écart relatif de la vitesse pour les brise-lames conventionnel et submersible respectivement. Une réduction des vitesses est observée dans le sillage du brise-lame et à proximité de la plage.

La fluctuation de la turbulence est présentée aux figures 20b et 22b. À 1,4 m au-dessus de l'eau, les impacts sont négligeables. À 4,4 et de 9,4m au-dessus de la surface de l'eau, les brise-lames génèrent une augmentation de l'intensité turbulente à l'est de la plage. Cette augmentation est toutefois plus modérée pour le brise-lame submersible comparé au brise-lame conventionnel.

En somme, la mise en place du brise-lame crée une zone de sillage à l'est de la plage avec une réduction des vitesses et une augmentation de la turbulence en altitude. Cet effet est plus accentué pour le brise-

lame conventionnel de par sa volumétrie plus imposante. Les conditions de mise à l'eau pour les kitesurfeurs et les planches à voiles seront donc affectées, surtout dans la partie nord de la plage. En ce qui concerne la baie de Beauport, aucun impact tangible n'est anticipé suite à l'implantation des aménagements. La mise en place de l'extension portuaire n'a pas d'impact sur les conditions de pratique de la planche à voile et du kitesurf dans la baie.

5.2.2 Niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Les figures 23 à 26 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lame à l'étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Les résultats par vents de secteur ONO au niveau de pleine mer supérieure de marée moyenne sont présentés aux figures 23 et 25 pour les deux variantes. Les champs de vitesse au-dessus de la baie de Beauport sont contrôlés par la topographie au nord de la baie et le tissu urbain à proximité du rivage. Il est à noter que les vitesses de vents au niveau de la marée supérieure sont plus élevées que celles observées au niveau moyen. Les vents incidents de l'intérieur des terres se retrouvent contraints par une surélévation du niveau de l'eau de 2,3 m par rapport aux vents à niveau moyen ce qui augmente les vitesses d'environ 5%. De plus, les vents s'écoulant en hauteur sont moins affectés par la rugosité du sol et des bâtiments à proximité du rivage, ce qui leur permet d'atteindre des vitesses plus élevées. Comme pour le niveau moyen, les impacts majeurs suite à la mise en place des installations portuaires et la plage sont localisés au sud-est du port et n'affectent pas les conditions éoliennes dans le secteur de la baie.

En se référant aux champs d'écart relatif de la vitesse présentés aux figures 24a et 26a. On ne constate aucun impact tangible dans le secteur de la baie. Tel qu'illustré aux figures 24a et 26a, le sillage du brise-lame réduit les vitesses à proximité de la plage. La volumétrie réduite du brise-lame submersible permet de réduire légèrement les impacts devant la plage.

L'écart relatif de l'intensité turbulente est présenté aux figures 24b et 26b. L'intensité turbulente est principalement impactée à 4,4 et 9,4 m au-dessus de la surface de l'eau. On note une augmentation de la turbulence dans le sillage des brise-lames, affectant ainsi les conditions éoliennes dans la zone de baignade à l'est de la plage. Il est à noter que les modifications de l'intensité turbulente sont plus faibles avec le brise-lame submersible.

En somme, la mise en place du brise-lame crée une zone de sillage à l'est de la plage avec une réduction des vitesses et une augmentation de la turbulence en altitude. Cet effet est plus accentué pour le brise-lame conventionnel de par sa volumétrie plus imposante. En ce qui concerne la baie de Beauport, aucun impact n'est anticipé suite à l'implantation des aménagements. Ces tendances sont presque identiques aux tendances notées à niveau moyen.

5.2.3 Niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne

Les figures 27 à 30 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lame à l'étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Les résultats par vents de secteur ONO au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne sont présentés aux figures 27 et 29 pour les deux variantes. Comme mentionné précédemment, les courants dans le secteur de la baie de Beauport sont influencés par le relief et le bâti en bordure de la baie. Au niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne, les champs de vitesses sont pratiquement identiques à ceux observés au niveau moyen. La mise en place des installations portuaires et de la plage n’entraîne aucun impact majeur sur les conditions éoliennes dans le secteur de la baie.

Les figures 28a et 30a présentent les écarts relatifs de la vitesse. Le secteur à l’est de la plage est encore le seul secteur d’intérêt qui est impacté par la mise en place des futures infrastructures. Le sillage du brise-lame engendre une réduction des vitesses de vents à proximité de la plage. Comme pour les autres niveaux d’eau, cette tendance est observée aux trois altitudes examinées et pour les deux variantes de brise-lame à l’étude.

L’écart relatif de la turbulence est présenté aux figures 20b et 22b. À 1,4 m au-dessus du plan d’eau, les impacts sont négligeables. À 4,4 et 9,4 m au-dessus de la basse mer inférieure, les brise-lames génèrent une augmentation de l’intensité turbulente à l’est de la plage. Comme pour les autres niveaux d’eau, cette augmentation est plus modérée pour le brise-lame submersible.

En somme, la mise en place du brise-lame crée une zone de sillage à l’est de la plage avec une réduction des vitesses et une augmentation de la turbulence en altitude. Cet effet est plus accentué pour le brise-lame conventionnel de par sa volumétrie plus imposante. En ce qui concerne la baie de Beauport, aucun impact tangible n’est anticipé suite à l’implantation des aménagements. Ces tendances sont presque identiques aux tendances notées aux niveaux moyen et élevé.

5.3 Vents de secteur OSO

5.3.1 Niveau moyen

Les figures 31 à 34 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lame à l’étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Par vent de secteur OSO, les résultats présentés aux figures 31 et 33 indiquent en premier lieu que les vents provenant de la vallée de la rivière Saint-Charles sont canalisés dans l’axe de cette dernière. La mise en place des futurs aménagements crée une perturbation locale du champ de vitesses dans le sillage de l’extension portuaire.

La présence des nouvelles installations du port (quai, réservoirs et navires) conduit à accentuer l’effet de sillage avec une diminution marquée des vitesses entre l’état actuel et l’état futur à l’est de la plage. La restriction accrue due aux nouveaux aménagements conduit également à une augmentation des vitesses en bordure de la zone de sillage. Quant à l’effet des brise-lames, il est négligeable comparé à l’effet de l’extension portuaire.

Les figures 32 et 34 montrent les écarts relatifs de la vitesse et de l'intensité turbulente. Une très faible augmentation de la turbulence est observée à l'est de la plage. Des variations plus importantes sont constatées plus au large dans le sillage des nouvelles installations portuaires, mais ces perturbations ne sont pas localisées dans la baie de Beauport.

En somme, la mise en place de la plage et de l'extension portuaire a un effet négligeable sur les vents de secteur OSO s'écoulant dans le secteur de la baie de Beauport, ainsi que dans le secteur de la plage. Aucun impact tangible n'est donc anticipé pour les pratiquants de sports nautiques dans le secteur de la baie.

5.3.2 Niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Les figures 35 à 38 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lame à l'étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Les figures 35 et 37 présentent les résultats au niveau de pleine mer supérieure de marée moyenne, par vent de secteur OSO. Les vents provenant de la vallée de la rivière Saint-Charles sont canalisés dans l'axe de cette dernière. Les vents sont plus rapides que ceux observés au niveau moyen, à cause de la surélévation du plan d'eau. La mise en place des futurs aménagements crée seulement une perturbation locale du champ de vitesse dans le sillage de l'extension portuaire. Toutefois, les patrons d'écoulement dans la baie de Beauport demeurent inchangés.

Les écarts relatifs des vitesses sont présentés aux figures 36a et 38a. La mise en place des nouvelles installations crée une réduction significative de la vitesse dans le sillage de l'extension portuaire. Le brise-lame perturbe légèrement l'écoulement dans le sillage à l'est de la plage (voir figure 36a et 38a). Cet impact est observé à 4,4 et à 9,4 m au-dessus du plan d'eau, et ce pour les deux variantes de brise-lame à l'étude.

Les figures 36b et 38b montrent les écarts relatifs de l'intensité turbulente. Comme au niveau moyen, une très faible augmentation de la turbulence est observée à l'est de la plage, pour les deux variantes de brise-lames. Des fluctuations plus importantes sont observées dans le sillage de l'extension portuaire. Toutefois, les effets notables sur l'intensité turbulente sont situés à l'extérieur de la baie de Beauport.

En somme, la mise en place de la plage et de l'extension portuaire a un effet négligeable sur les vents de secteur OSO s'écoulant dans le secteur de la baie de Beauport. Aucun impact tangible n'est donc anticipé pour les pratiquants de sports nautiques dans le secteur de la baie.

5.3.3 Niveau de la basse mer inférieure de marée moyenne

Les figures 39 à 42 illustrent les résultats obtenus pour les deux variantes de brise-lame à l'étude, soit le brise-lame conventionnel et le brise-lame submersible.

Les résultats par vents de secteur OSO au niveau de basse mer inférieure de marée moyenne sont présentés aux figures 39 et 41 pour les deux variantes de brise-lame. Tel que mentionné dans la section 5.3.1, les vents incidents de secteur OSO sont canalisés dans la vallée de la rivière Saint-Charles et

s'écoulent à travers le bâti urbain avant d'atteindre la baie de Beauport. Les vitesses sont plus faibles que celles calculées au niveau de pleine mer supérieure étant donné l'effet accru de la rugosité du sol et des bâtiments à l'intérieur des terres. En conditions futures, on observe seulement une réduction notable des vitesses dans le sillage de l'extension portuaire.

Les figures 40a et 42a présentent les écarts relatifs de la vitesse. Les vitesses sont considérablement réduites dans le sillage de l'extension portuaire, mais cette zone est située à l'extérieur de la baie de Beauport. Un deuxième sillage se forme également dans l'axe des brise-lames. Notons que le niveau d'eau bas découvre une grande partie de la plage avec une pente descendante variante entre 4 et 7 %. Cette faible pente agit comme une transition favorisant la canalisation des vents entre les brise-lames et l'extension portuaire. Comparativement aux deux autres niveaux de marée étudiés, on constate une réduction de la vitesse dans l'axe des brise-lames et une accélération de l'écoulement à l'est de la plage. Ces effets sont similaires pour les deux brise-lames car c'est la géométrie de la plage et la partie intérieure du brise-lame, qui est identique pour les deux brise-lames, contrôlant ces effets.

Les écarts relatifs de l'intensité turbulente sont illustrés aux figures 40b et 42b. À 1,4 m au-dessus du plan d'eau, la variation de l'intensité turbulente est négligeable, pour les deux variables de brise-lames. Aux plans de 4,4 et 9,4 m, on constate une baisse de l'intensité turbulente au-dessus de la partie découverte de la plage, ce qui est normal pour un effet de canalisation; et une augmentation de la turbulence dans le sillage des brise-lames. L'extension portuaire engendre des fluctuations plus importantes, mais ces effets n'affectent pas les conditions éoliennes de la baie de Beauport ni du secteur de la plage.

En somme, la mise en place du brise-lame, autant le brise-lame conventionnel que le brise-lame submersible, modifient les conditions éoliennes et affecte la pratique des sports nautiques à l'est de la plage. Toutefois, aucun impact tangible n'est anticipé dans la baie de Beauport.

5.4 Vents de secteur SE

5.4.1 Niveau moyen

Les figures 43 et 44 illustrent les résultats obtenus pour le brise-lame submersible. Cette direction n'a été simulée, qu'à titre indicatif, pour le brise-lame submersible et à niveau moyen.

Les résultats par vents de secteur SE sont présentés à la figure 43, pour le brise-lame submersible. Les nouvelles installations portuaires modifient significativement le champ de vitesse. Le sillage des installations réduit légèrement les vitesses dans la partie sud-ouest de la baie de Beauport. Cependant, une zone de cisaillement se développe dans l'axe entre l'extrémité est du port et de la pointe du brise-lame. À la figure 43b, on observe que cette zone de cisaillement se prolonge au-dessus de la baie de Beauport et augmente les vitesses au centre de celle-ci et au large de la plage. Aux figures 43a-3 et 43b-3, on note une accélération brusque des vitesses sur une mince ligne au nord-ouest de la baie de Beauport. Cette augmentation de vitesse est due à la présence du quai. Le changement rapide d'élévation contracte l'écoulement et accélère les vents à proximité du quai.

Les écarts relatifs des vitesses sont présentés à la figure 44a. Tel que signalé dans pour la figure 43, la mise en place des nouvelles installations crée une réduction des vitesses dans le sillage de l'extension portuaire. Toutefois, on constate d'après l'écart relatif une augmentation notable de la vitesse d'écoulement au sud-ouest de la plage. La nouvelle géométrie de l'extension portuaire concentre l'écoulement sur une mince bande passant entre les bateaux et les silos existants. Cette augmentation de vitesses est observée aux trois niveaux étudiés.

L'écart relatif de l'intensité turbulente est présenté à la figure 44b. Les impacts sur l'intensité turbulente sont principalement observés à 4,4 et 9,4 m au-dessus de la surface de l'eau. On note des variations modestes de la turbulence dans le sillage des installations portuaires. Toutefois, on constate une augmentation marquée de la turbulence au large de la plage et au-dessus de la baie de Beauport. Notons que cette augmentation de turbulence est due, en grande partie, à l'effet de cisaillement observé à la figure 43.

En somme, la mise en place du brise-lame submersible impacte les conditions éoliennes d'une grande partie de la baie de Beauport. Toutefois, les vents de secteur SE sont les vents les moins fréquents dans la région de la baie de Beauport (voir figure 5). Par conséquent, la mise en place de l'extension portuaire a un impact négligeable sur la pratique de la planche à voile et du kitesurf.

5.5 Synthèse et Recommandations

La synthèse des résultats décrits dans les sections 5.1 à 5.4 est présentée dans le tableau 5.1. On constate que le niveau de la pleine mer supérieure atténue les impacts des brise-lames testés pour des vents de l'ENE et l'OSO, alors que le niveau de la basse mer inférieure accentue les impacts pour les vents du OSO.

Tableau 5. 1 Synthèse des résultats

Direction	Niveau de la marée					
	Basse mer inférieure		Niveau moyen		Pleine mer supérieure	
	Brise-lame conventionnel	Brise-lame submersible	Brise-lame conventionnel	Brise-lame submersible	Brise-lame conventionnel	Brise-lame submersible
ENE	<p>Baie de Beauport: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans la partie sud de la Baie.</p> <p>Plage: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans l'axe du brise-lame. Augmentation des vitesses et réduction de la turbulence au sud de la plage.</p>	<p>Baie de Beauport: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans la partie sud de la Baie.</p> <p>Plage: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans l'axe du brise-lame. Augmentation des vitesses et réduction de la turbulence au sud de la plage.</p>	<p>Baie de Beauport: Légère réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans la partie sud de la Baie.</p> <p>Plage: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans le nord de la plage. Augmentation des vitesses et réduction de la turbulence au sud de la plage.</p>	<p>Baie de Beauport: Légère réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans la partie sud de la Baie.</p> <p>Plage: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans le nord de la plage. Augmentation des vitesses et réduction de la turbulence au sud de la plage.</p>	<p>Baie de Beauport: Effet négligeable.</p> <p>Plage: Aucun impact.</p>	<p>Baie de Beauport: Effet négligeable.</p> <p>Plage: Aucun impact.</p>
ONO	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans la sillage du brise-lame.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction modeste des vitesses et augmentation modérée de la turbulence dans la sillage du brise-lame.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans la sillage du brise-lame.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction modeste des vitesses et augmentation modérée de la turbulence dans la sillage du brise-lame.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction des vitesses et augmentation de la turbulence dans la sillage du brise-lame.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction modeste des vitesses et faible augmentation modérée de la turbulence dans la sillage du brise-lame.</p>
OSO	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction notable des vitesses et augmentation de la turbulence dans l'axe du brise-lame. Augmentation de la vitesse et réduction de la turbulence à l'est de la plage.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction notable des vitesses et augmentation de la turbulence dans l'axe du brise-lame. Augmentation de la vitesse et réduction de la turbulence à l'est de la plage.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction modeste des vitesses et une faible augmentation de l'intensité turbulente dans l'axe du brise-lame.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Réduction modeste des vitesses et une faible augmentation de l'intensité turbulente dans l'axe du brise-lame.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Faible réduction des vitesses et faible augmentation de l'intensité turbulente dans l'axe du brise-lame.</p>	<p>Baie de Beauport: Aucun impact</p> <p>Plage: Faible réduction des vitesses et faible augmentation de l'intensité turbulente dans l'axe du brise-lames.</p>

En ce qui concerne les vents de secteur SE, la simulation du brise-lame submersible au niveau d'eau moyen montre que l'extension portuaire perturbe les conditions éoliennes dans la baie de Beauport et à l'est de la plage. Toutefois, la faible occurrence de ces vents permet de conclure que la probabilité d'impacts des nouvelles installations portuaires sur la pratique des sports nautiques sera négligeable (planchistes, voiliers et les kitesurfeurs).

Les impacts du projet sur les usagers de la baie de Beauport sont localisés devant la plage pour les vents de direction ONO et OSO (voir figures 20, 22, 24, 26, 28, 30, 40 et 42) et sur une bande couvrant la partie sud de la baie pour les vents de secteur ENE (voir figures 8,10, 12, 14, 16 et 18). La majorité de la baie de Beauport ne sera pas affectée par les nouvelles installations. De plus, la partie sud de la baie n'est impactée que deux cas sur neuf des cas de simulation combinant les directions de vents dominants et les niveaux d'eau, et ce autant pour le brise-lame conventionnel que pour le brise-lame submersible. Toutefois, nous recommandons l'implantation du brise-lame submersible pour limiter les impacts à l'est de la plage par vents du ONO.

De plus, nous recommandons de relocaliser le secteur de mise à l'eau des kitesurfeurs situé au nord-ouest de la plage, car celui-ci se retrouve dans le secteur le plus turbulent par vent de l'ENE. Une solution serait d'autoriser les kitesurfeurs à se mettre à l'eau avec les planchistes et les bateaux à voile à l'extrémité sud de la plage. Les vitesses y sont augmentées et la turbulence y est réduite pour les vents de l'ENE et de l'OSO.

6 CONCLUSIONS

L'étude de modélisation numérique des vents sur le secteur de la baie de Beauport a été réalisée par Lasalle | NHC dans le cadre du projet d'extension portuaire de Québec à la pointe de Beauport. L'étude visait essentiellement à évaluer les impacts sur le régime des vents dans la baie de Beauport où se pratiquent la planche à voile et le kitesurf.

Les simulations effectuées à l'aide du logiciel de modélisation tridimensionnelle des écoulements, OpenFoam, a permis d'établir les champs de vitesses des vents à 1,4 m, 4,4 m et 9,4 au-dessus du plan d'eau au port de Québec, sous trois niveaux de marée, le niveau moyen, la pleine mer supérieure et la basse mer inférieure. Les installations portuaires ont été modélisées dans leurs configurations actuelles et futures pour trois secteurs de 45° centrés autour de quatre directions de vent. Ces dernières étant l'est-nord-est (ENE), l'ouest-nord-ouest (ONO), l'ouest-sud-ouest (OSO) ont été retenues en fonction de leur caractère prédominant (ENE, OSO) et favorable (ENE, ONO) à la pratique des sports de voile tels que la planche à voile et le kitesurf. La direction sud-est (SE) a été également simulée à titre indicatif, bien que très rares en terme de fréquence annuelle.

Les résultats montrent que d'une manière générale les nouvelles installations portuaires ainsi que les projets de nouvelles plages, incluant les deux types de brise-lames, génèrent des impacts sur une petite région au sud de la baie de Beauport et directement à l'est de la plage. En ce qui concerne l'effet du niveau d'eau, on constate que le niveau de la pleine mer supérieure atténue les impacts des brise-lames testés pour des vents de l'ENE et l'OSO, alors que le niveau de la basse mer inférieure accentue les impacts pour les vents d'OSO. En somme, on peut en conclure que la pratique de la planche à voile et du kitesurf ne sera pas perturbée dans la majeure partie de la baie de Beauport. La partie sud de la baie n'est impactée que deux cas sur neuf des cas de simulation combinant les directions de vents dominants et les niveaux d'eau, et ce autant pour le brise-lame conventionnel que pour le brise-lame submersible.

En ce qui concerne les vents de secteur SE, l'extension portuaire perturbe les conditions éoliennes dans la baie de Beauport et à l'est de la plage. Toutefois, la faible occurrence de ces vents permet de conclure que la probabilité d'impacts des nouvelles installations portuaires sur la pratique des sports nautiques sera négligeable.

Des impacts mineurs et locaux nous ont toutefois permis de recommander l'implantation du brise-lame submersible pour limiter les impacts à l'est de la plage par vents du ONO. De plus, nous recommandons de relocaliser le secteur de mise à l'eau des kitesurfeurs situé au nord-ouest de la plage, car celui-ci se retrouve dans le secteur le plus turbulent par vent de l'ENE, surtout au niveau moyen et au niveau de la basse mer. La solution optimale serait d'autoriser les kitesurfeurs à se mettre à l'eau avec les planchistes et les bateaux à voile à l'extrémité sud de la plage.

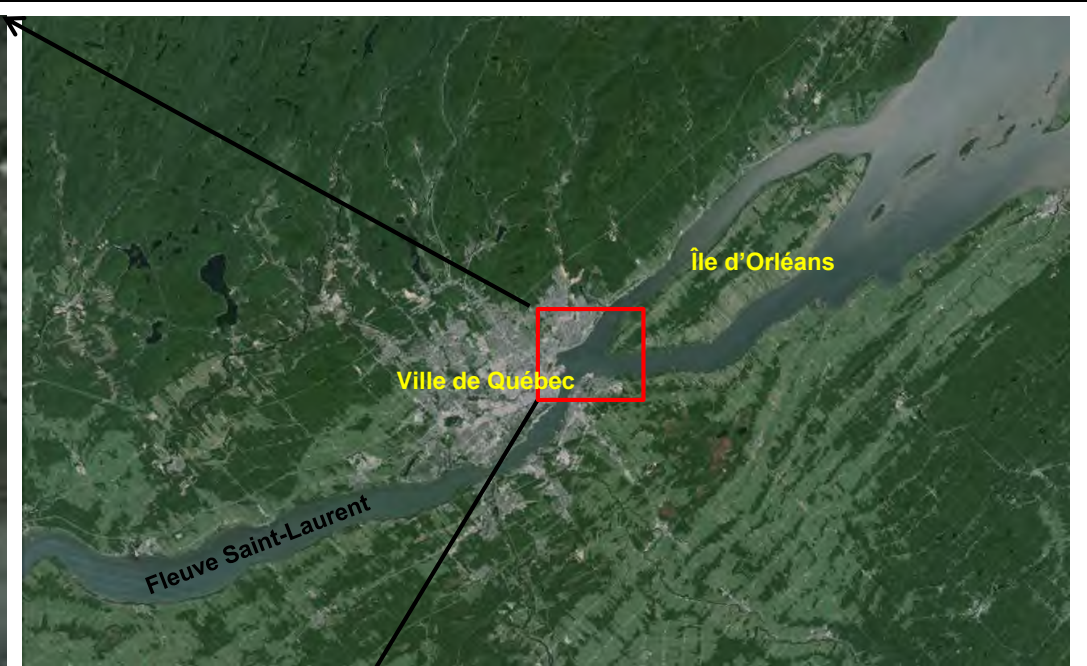
7 RÉFÉRENCES

- [1] Intégration du phénomène vent dans la conception du milieu bâti - J. Gandemer et A. Guyot - Ministère de la Qualité de la vie - France 1976.

- [2] Architectural Aerodynamics by R.M. Aynsley, W. Melbourne and B.J. –Vickery - Applied Science Publishers Ltd. London.

- [3] Données des stations BEAUPORT 7010566, QUEBEC/JEAN LESAGE INTL A 7016294, Environnement Canada, service de l’environnement atmosphérique, 1983.

- [4] Élaboration d’outils méthodologiques et techniques d’aide à la conception d’ambiances urbaines de qualité pour favoriser le développement durable des villes - S. Reiter – Thèse de doctorat de l’Université Catholique de Louvain, Belgique.



Région de Québec

Secteur de la baie de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

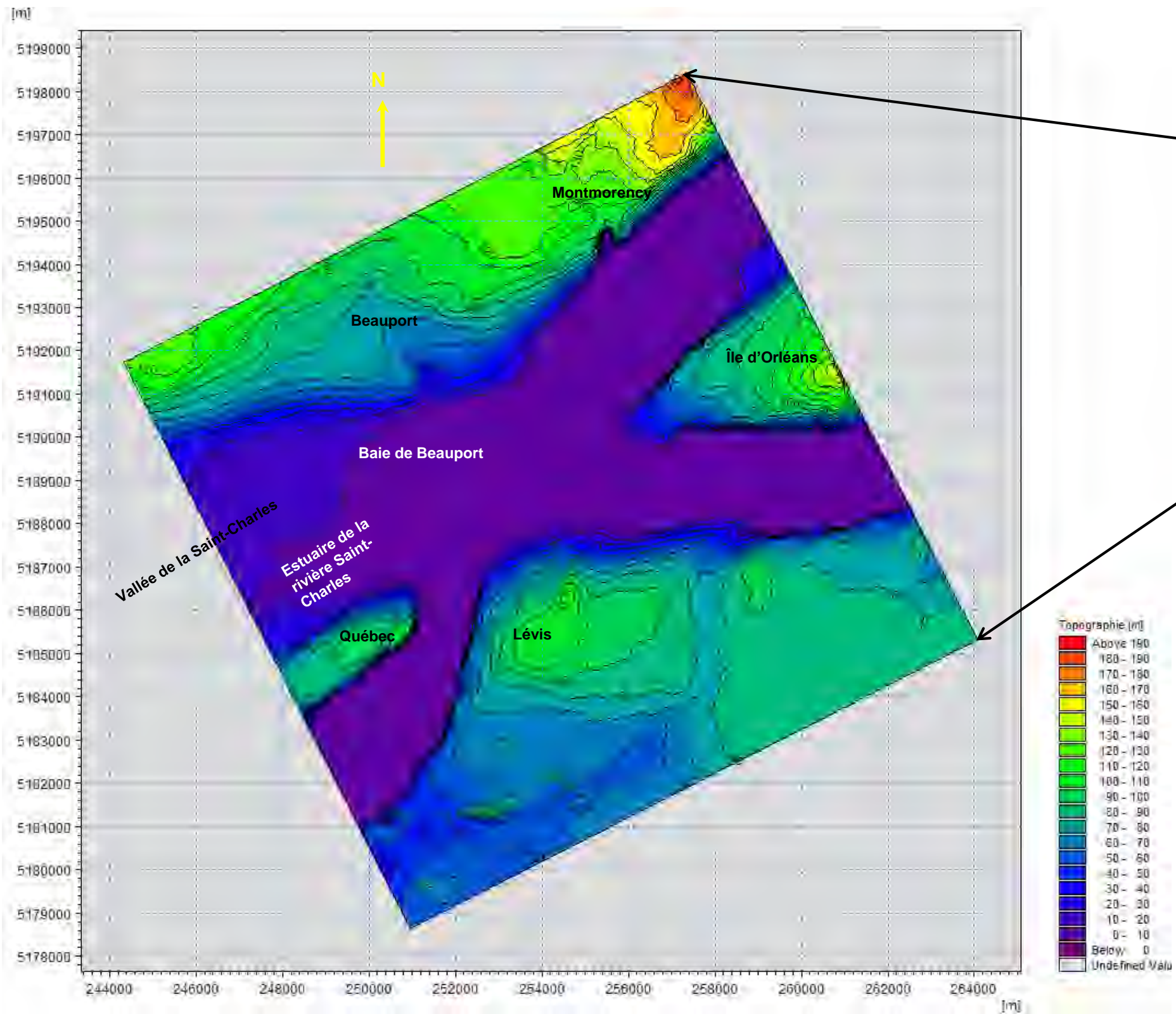


PROJET: **PORT DE QUÉBEC**
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

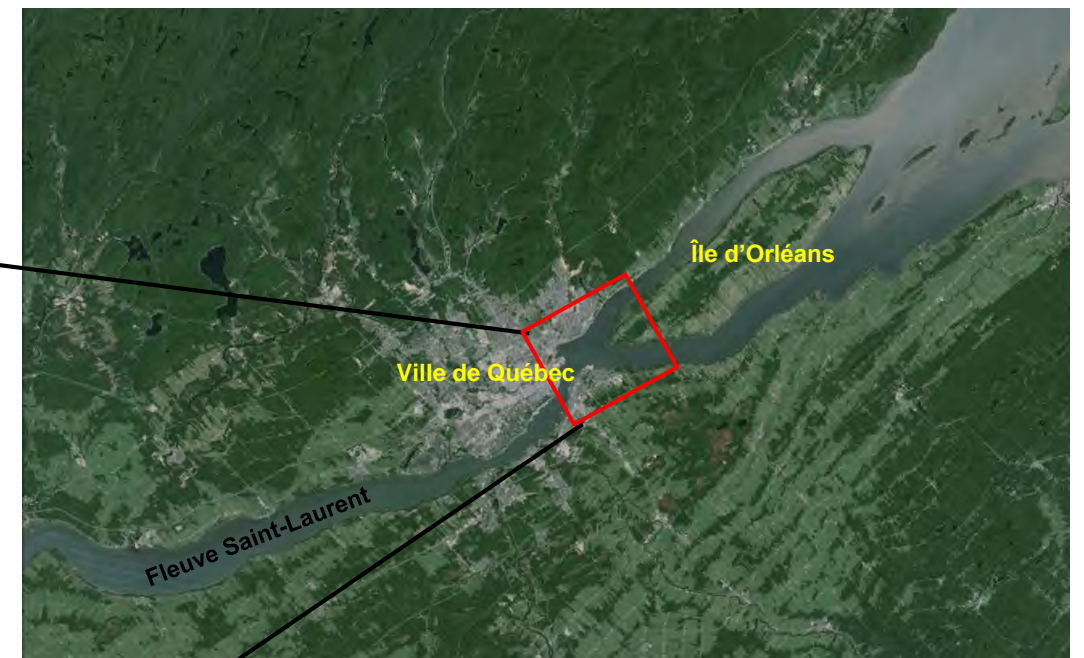
TITRE : Localisation du site

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

DATE: Décembre 2016	FIGURE : 1
------------------------	----------------------



Topographie du site à l'étude



Région de Québec

lasalle nhc

CLIENT :

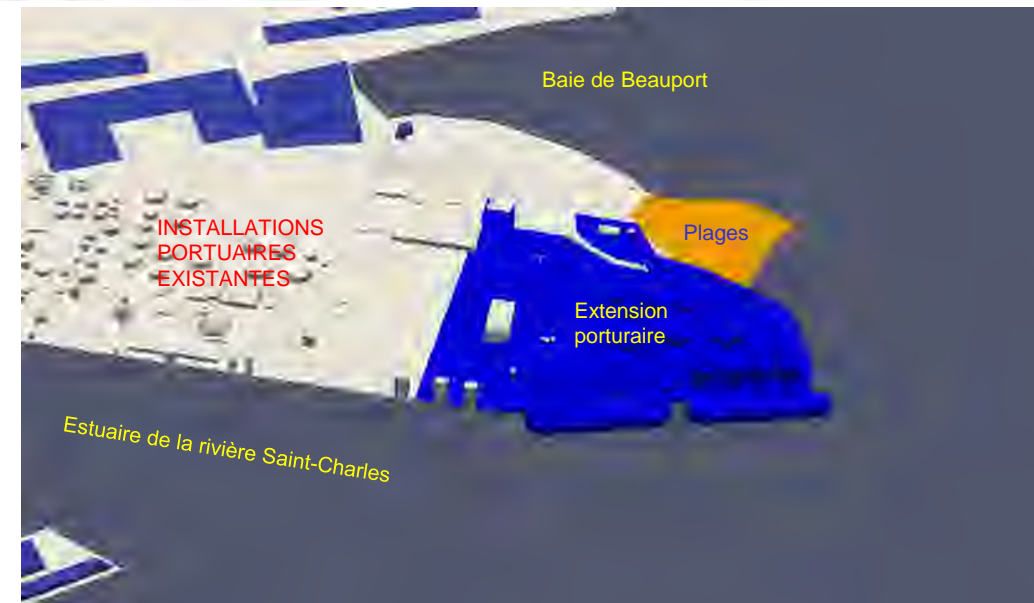
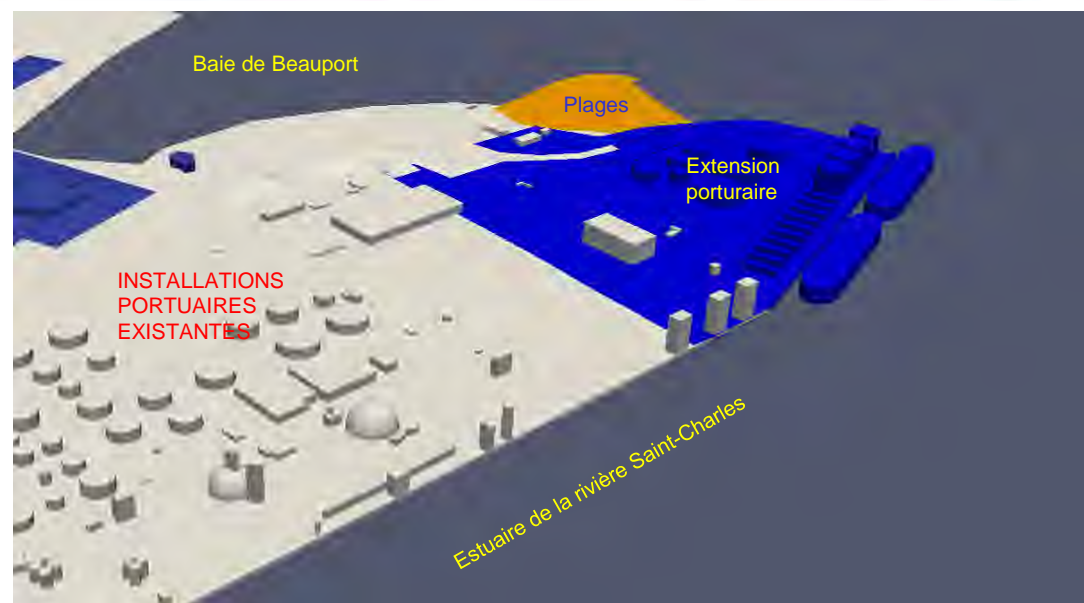
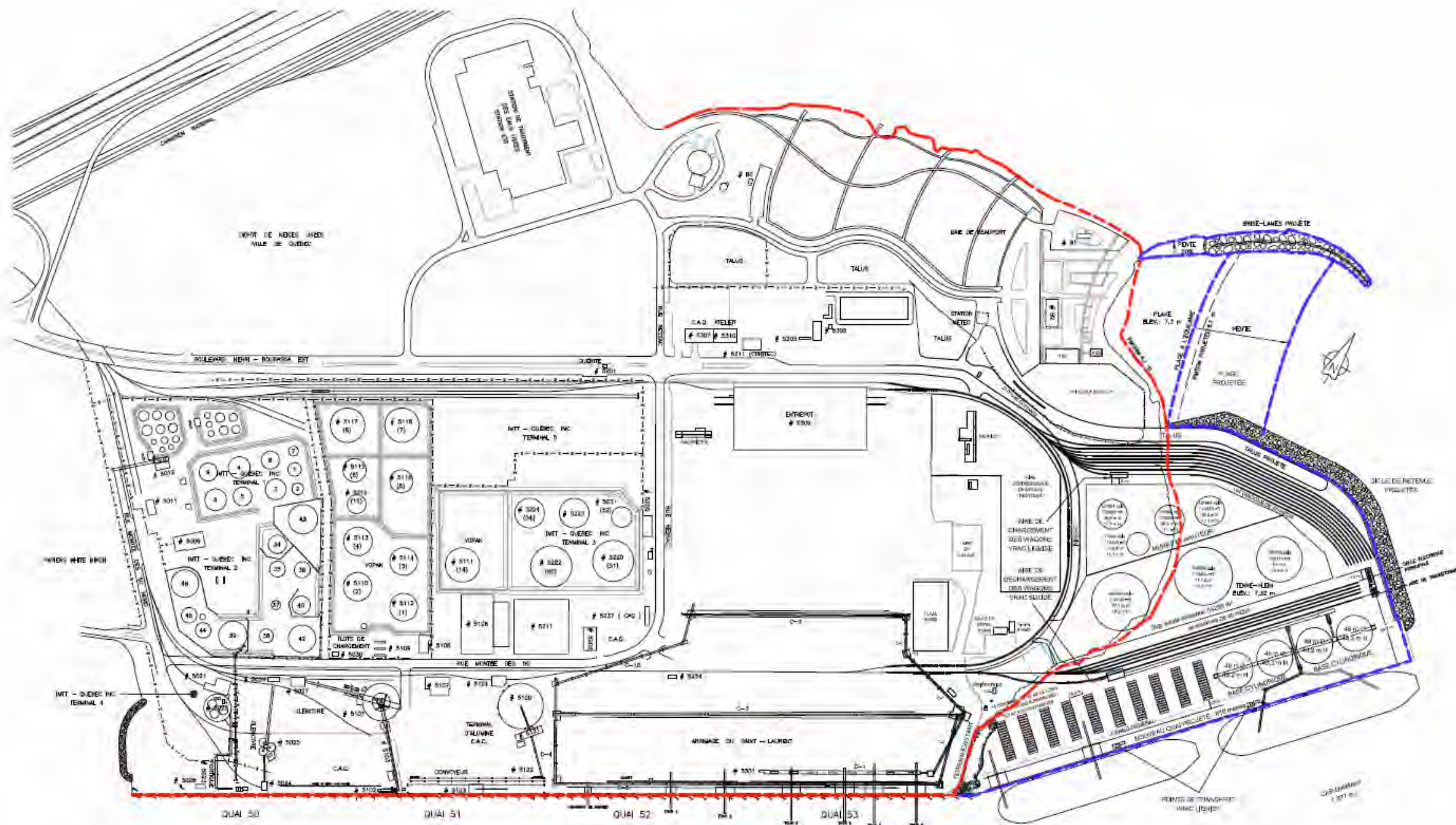


PROJET: **PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts
éoliens**

TITRE : **Topographie**

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

DATE: Décembre 2016	FIGURE : 2
------------------------	----------------------



lasalle nhc

CLIENT :



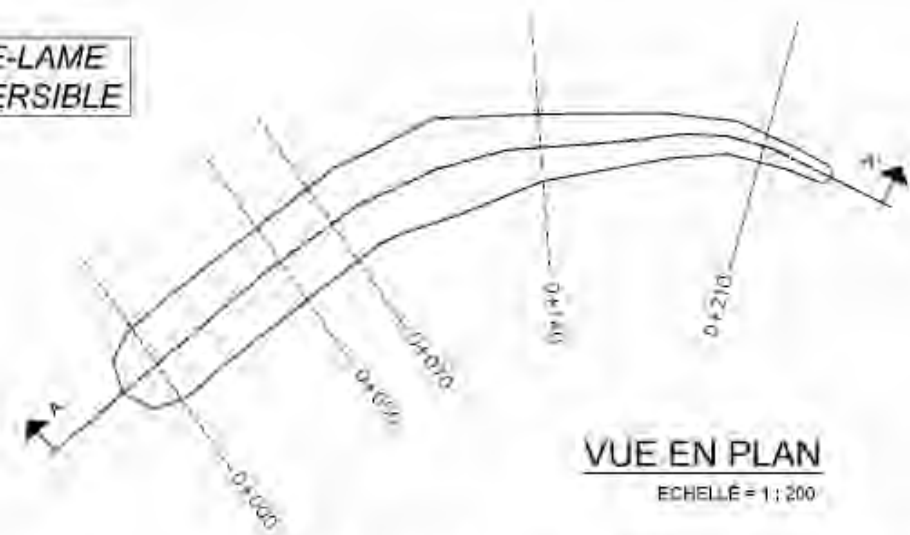
PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

TITRE : Description du projet

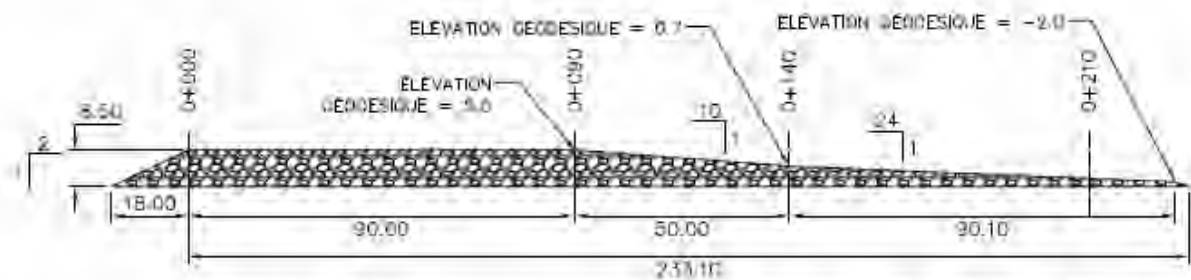
PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

DATE: Décembre 2016	FIGURE : 3
------------------------	----------------------

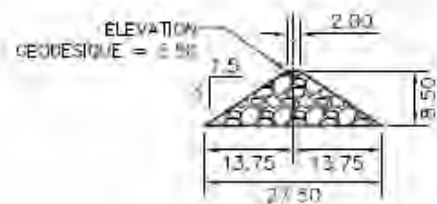
**BRISE-LAME
SUBMERSIBLE**



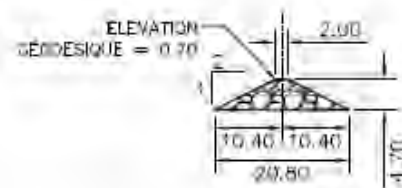
VUE EN PLAN
ECHÈLLÉ = 1 : 200



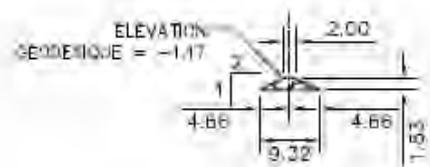
PROFIL A-A'
ECHÈLLÉ = 1 : 150



COUPE 0+050, 0+070
ECHÈLLÉ = 1 : 100

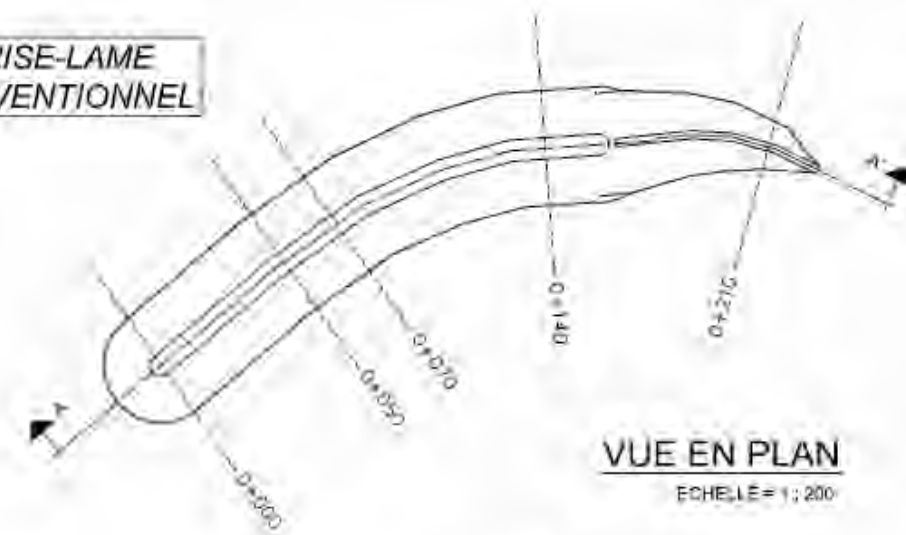


COUPE 0+140
ECHÈLLÉ = 1 : 100

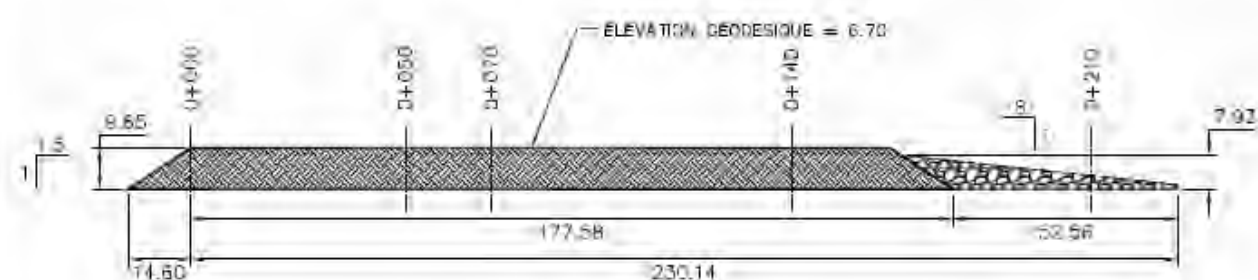


COUPE 0+210
ECHÈLLÉ = 1 : 100

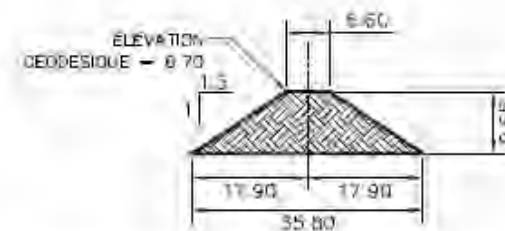
**BRISE-LAME
CONVENTIONNEL**



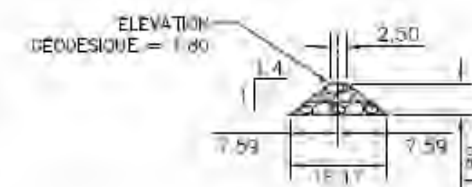
VUE EN PLAN
ECHÈLLÉ = 1 : 200



PROFIL A-A'
ECHÈLLÉ = 1 : 150



COUPE 0+050, 0+070, 0+140
ECHÈLLÉ = 1 : 100



COUPE 0+210
ECHÈLLÉ = 1 : 100

lasalle nhc

CLIENT :

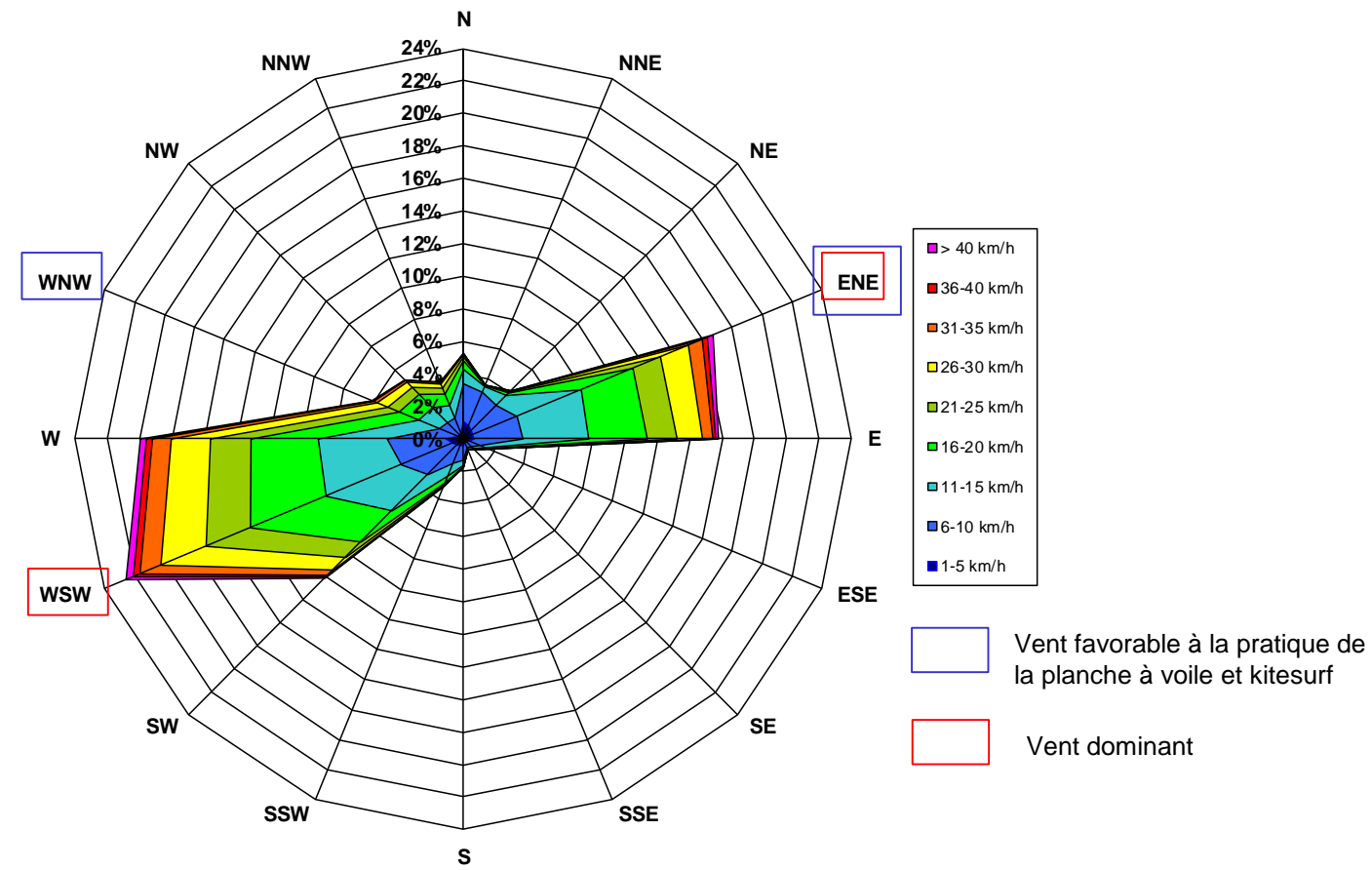


PROJET: **PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT**
Modélisation numérique des impacts éoliens

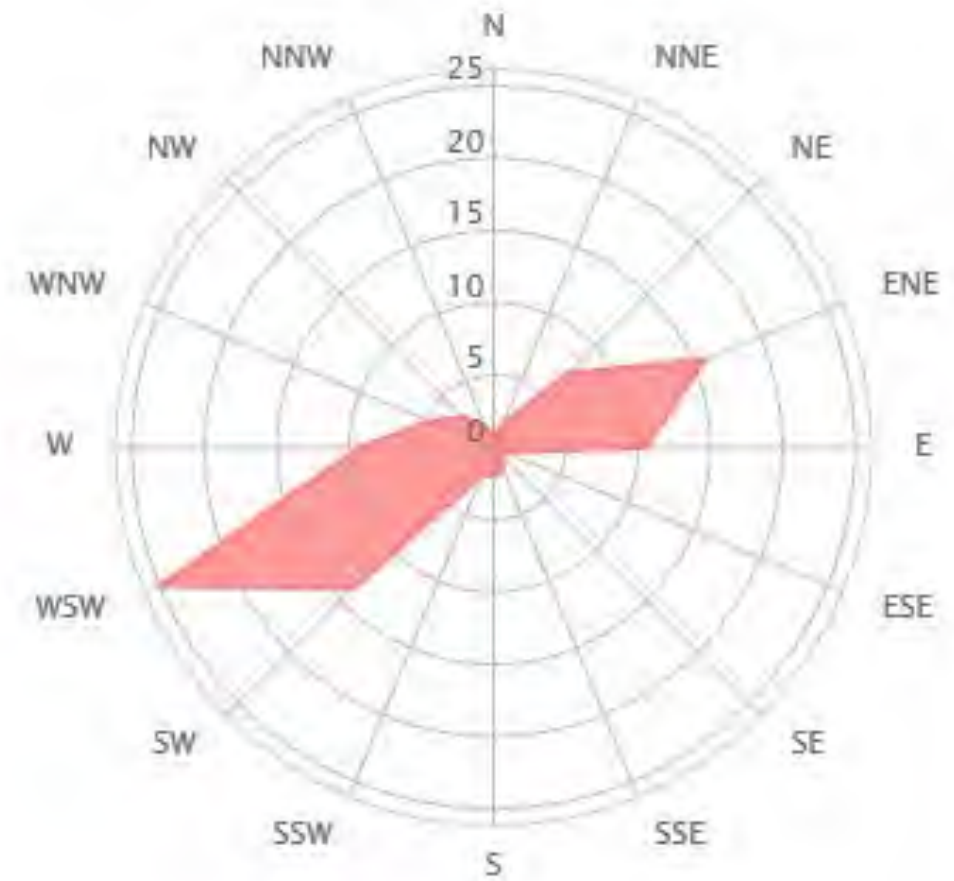
TITRE : Variante de brise-lame

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT :	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

DATE: Décembre 2016	FIGURE : 4
------------------------	----------------------



a) Rose des vents à l'aéroport international Jean-Lesage de Québec 1980-2013 – Environnement Canada



b) Rose des vents à la pointe de Beauport 2009-2014

lasalle **nhc**

CLIENT :

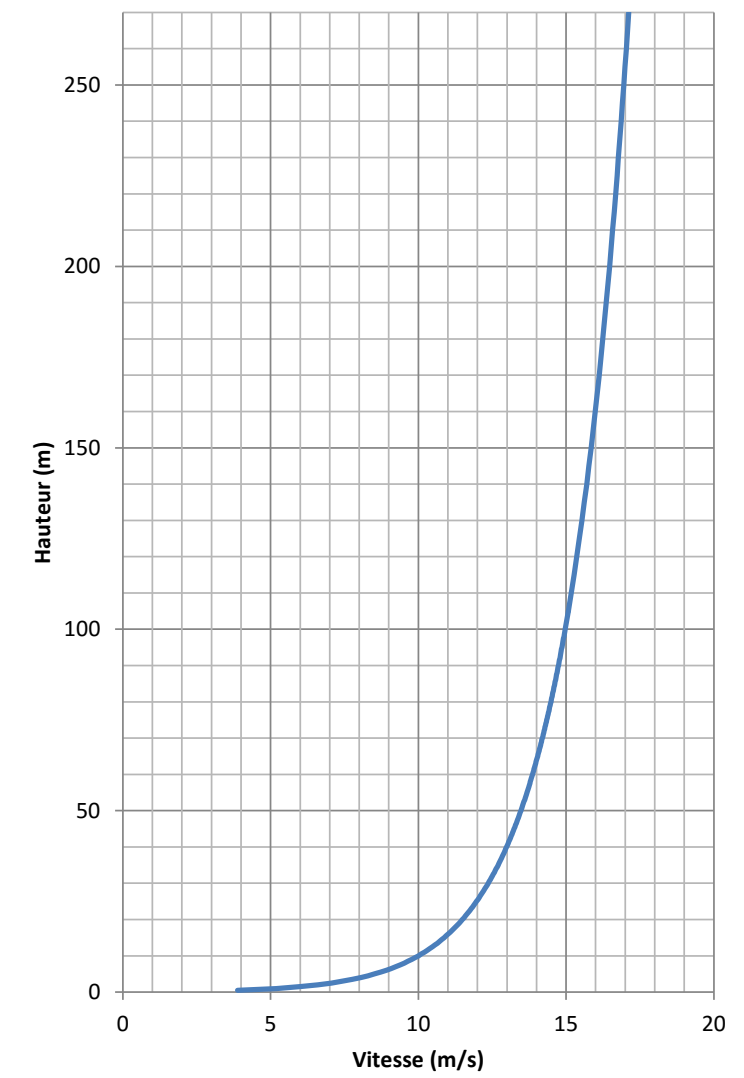
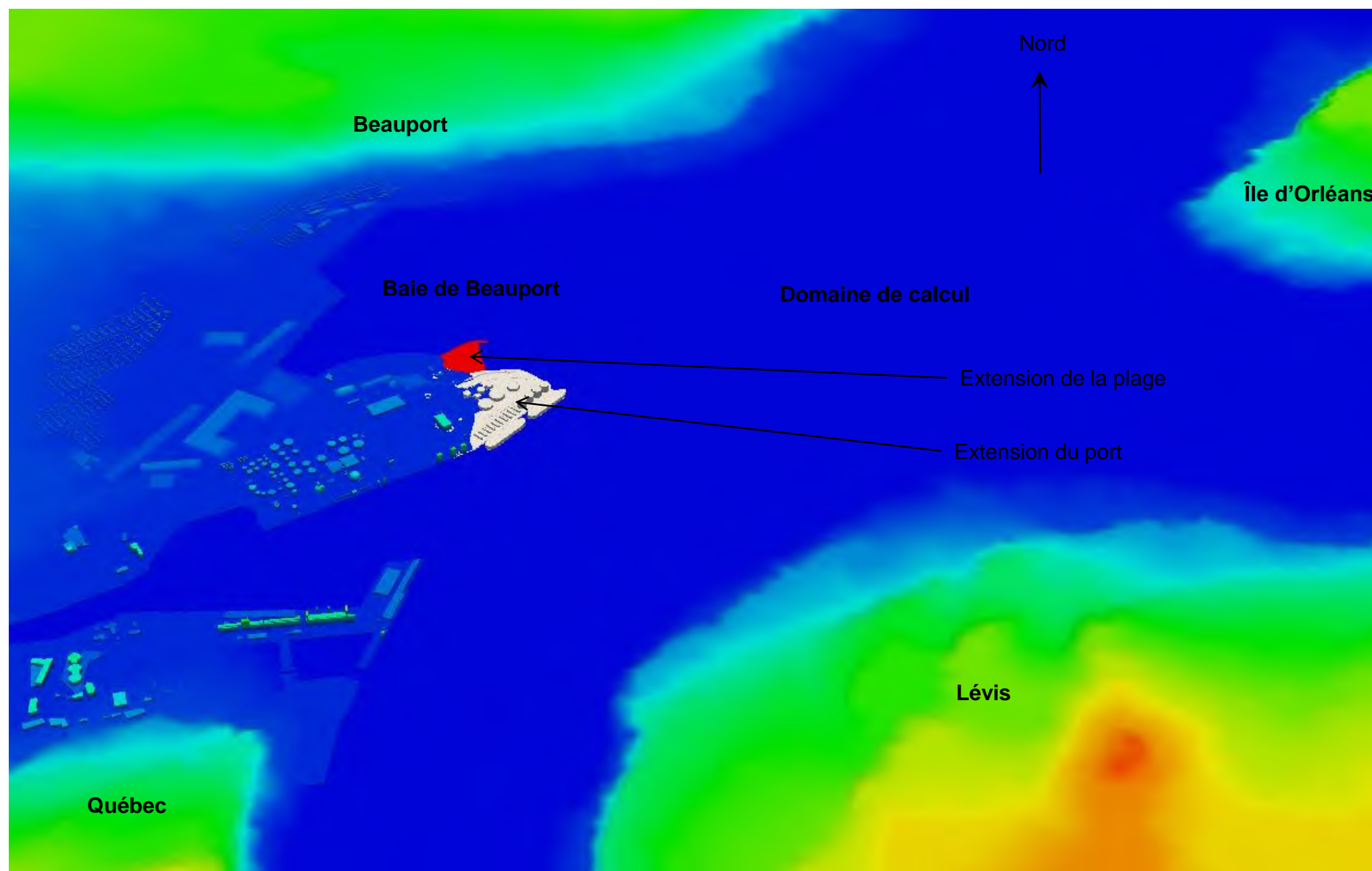


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

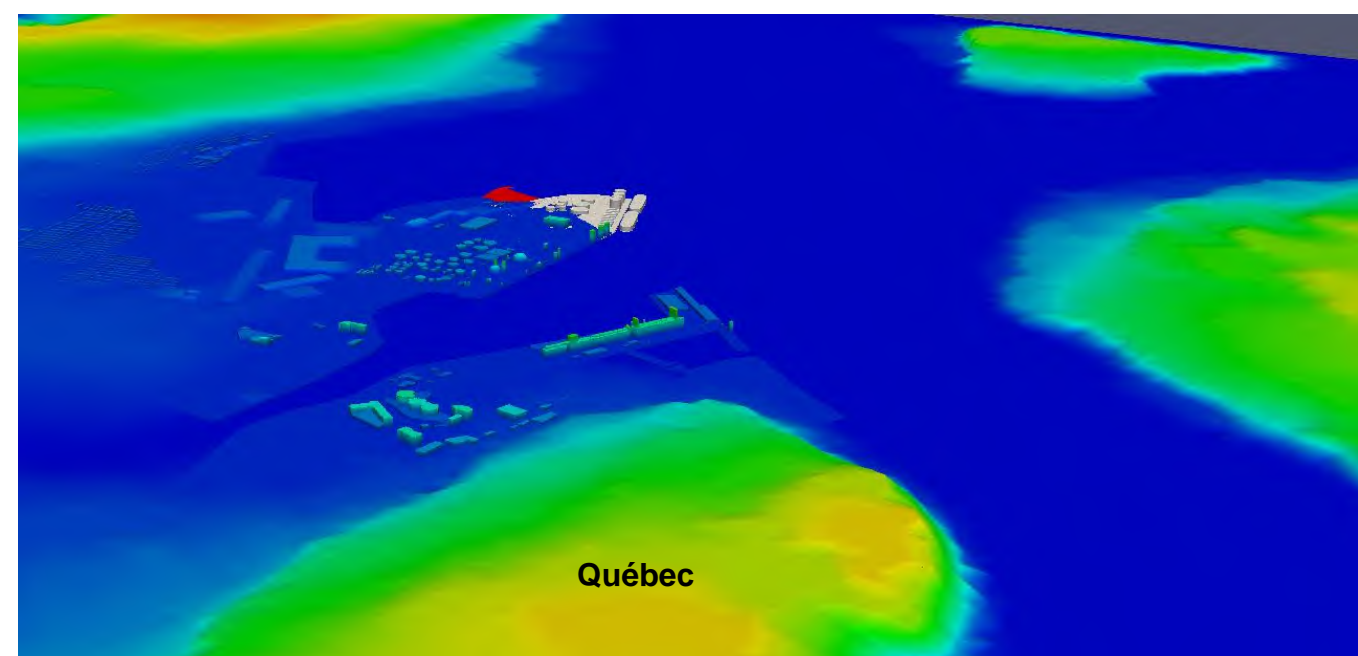
TITRE : Régime des vents

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

DATE: Décembre 2016	FIGURE : 5
------------------------	----------------------



profil Profil de vitesses logarithmique imposé à l'entrée du modèle



Détail de la maquette 3D incluant les bâtiments pris en compte

lasalle nhc

CLIENT :

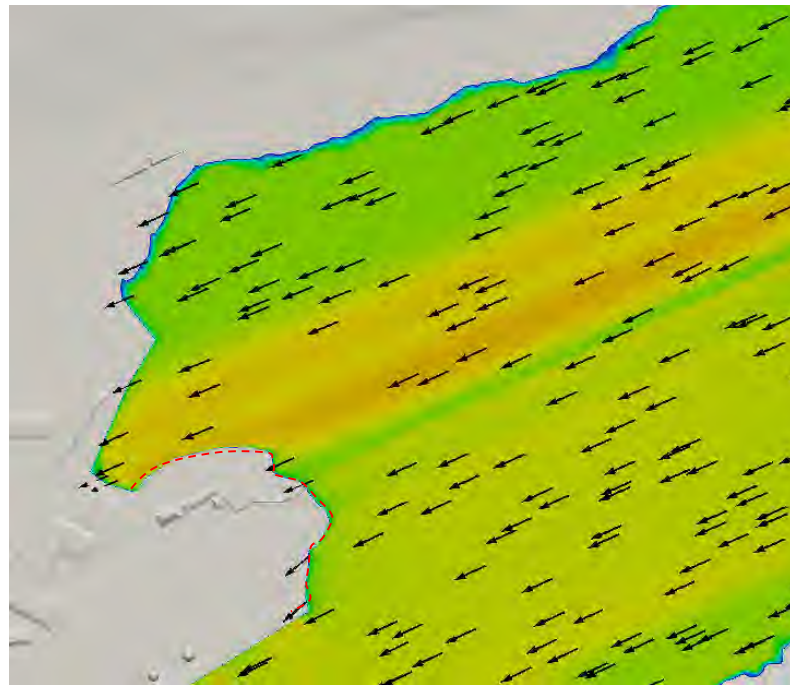


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

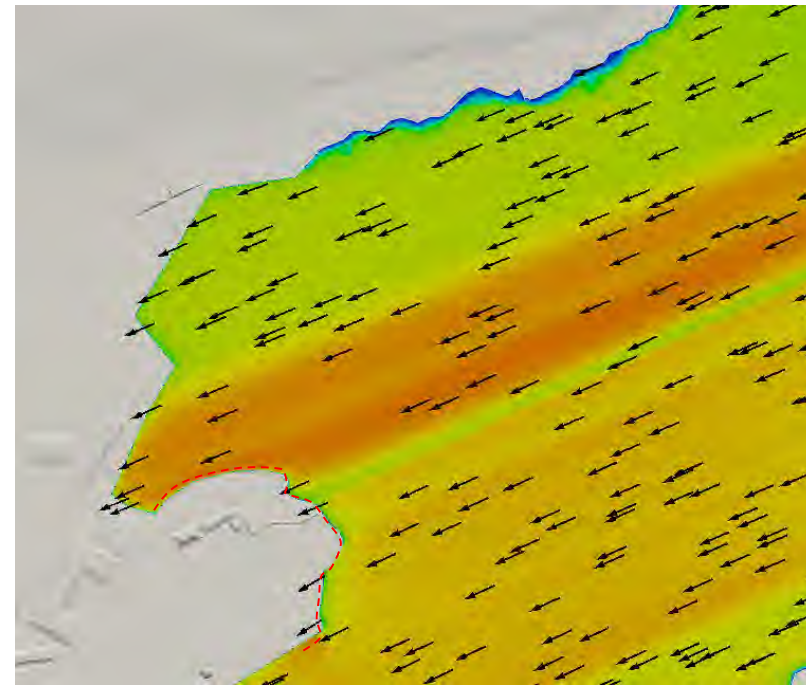
TITRE :
Domaine de calcul

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

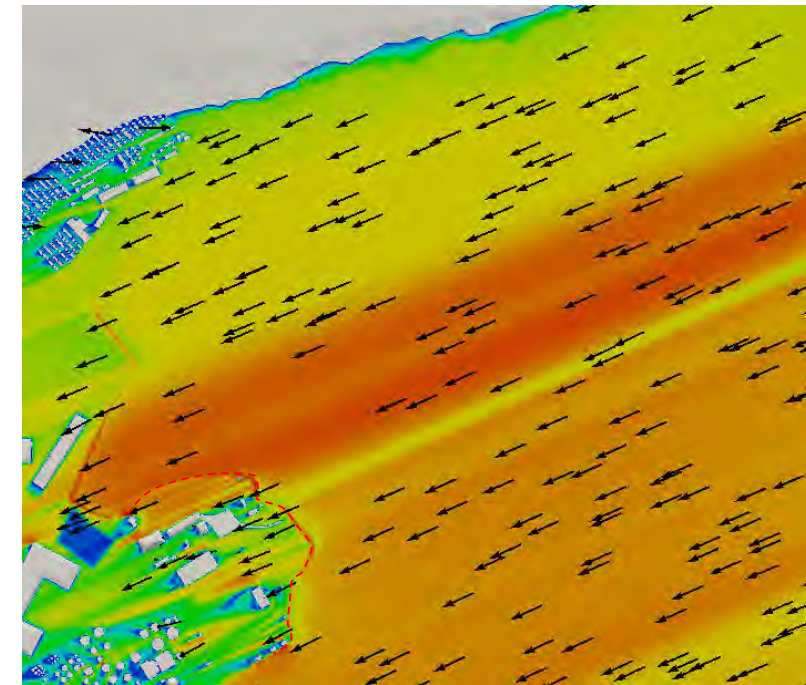
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 6
------------------------	----------------------



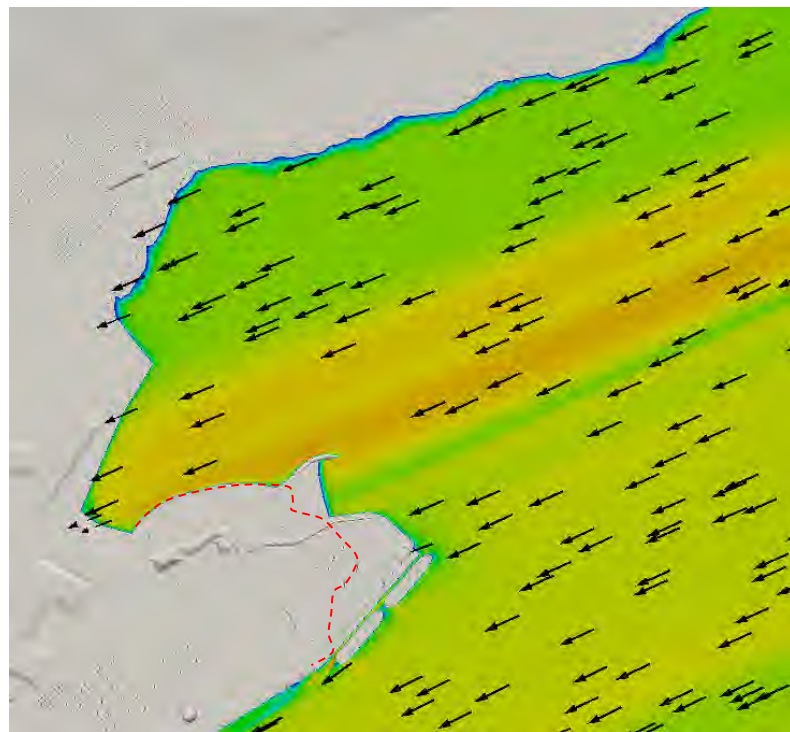
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



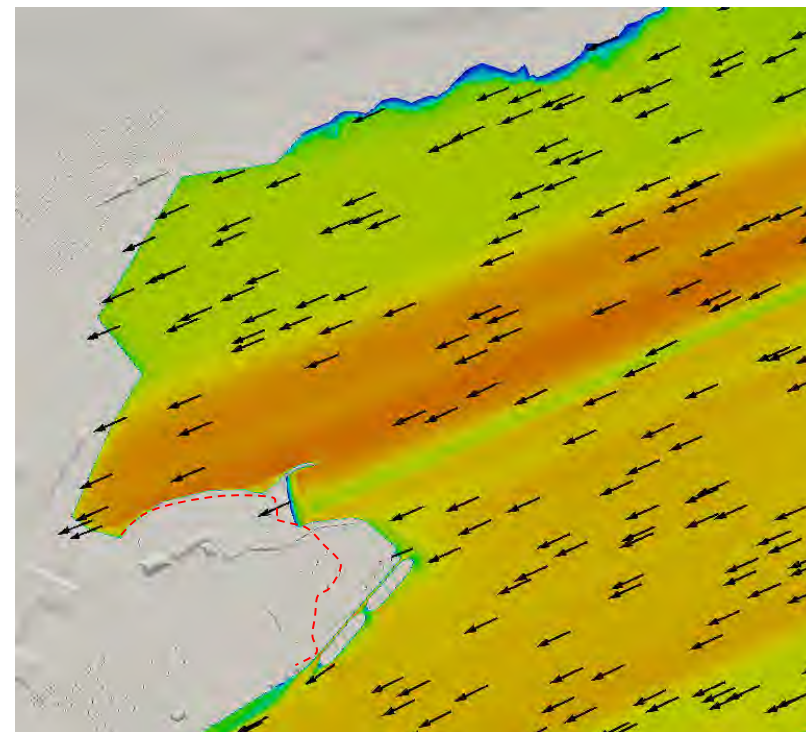
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



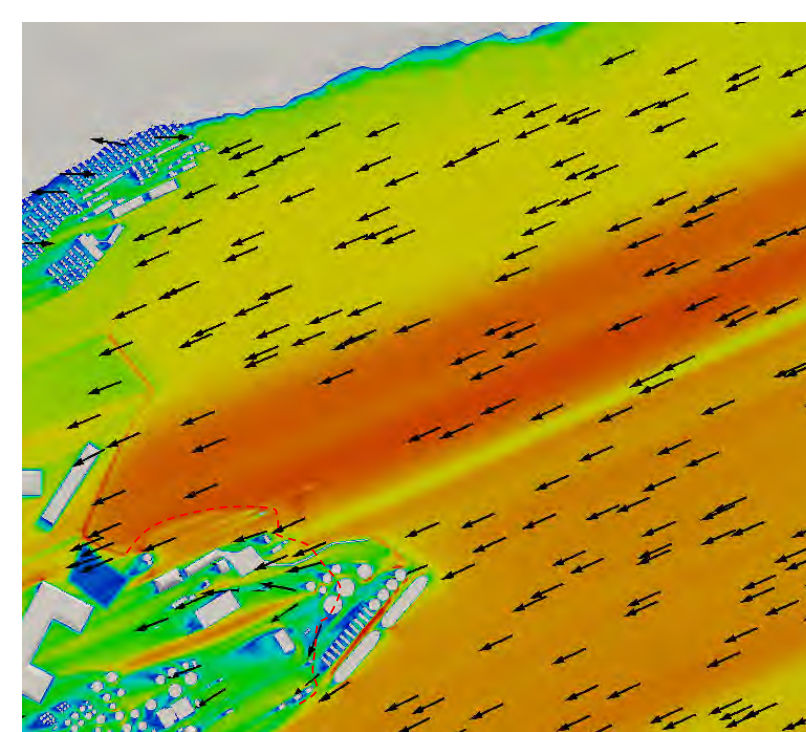
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



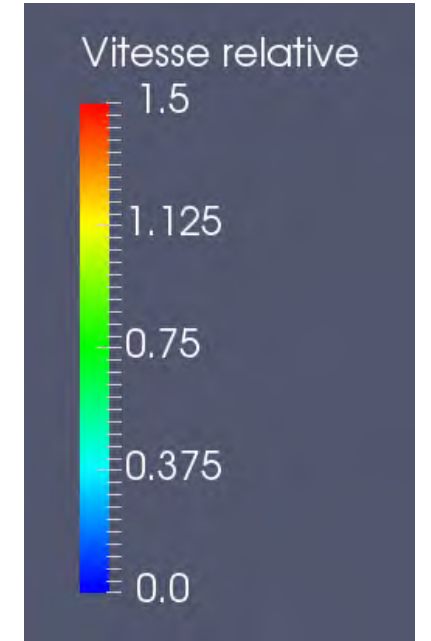
b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

--- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

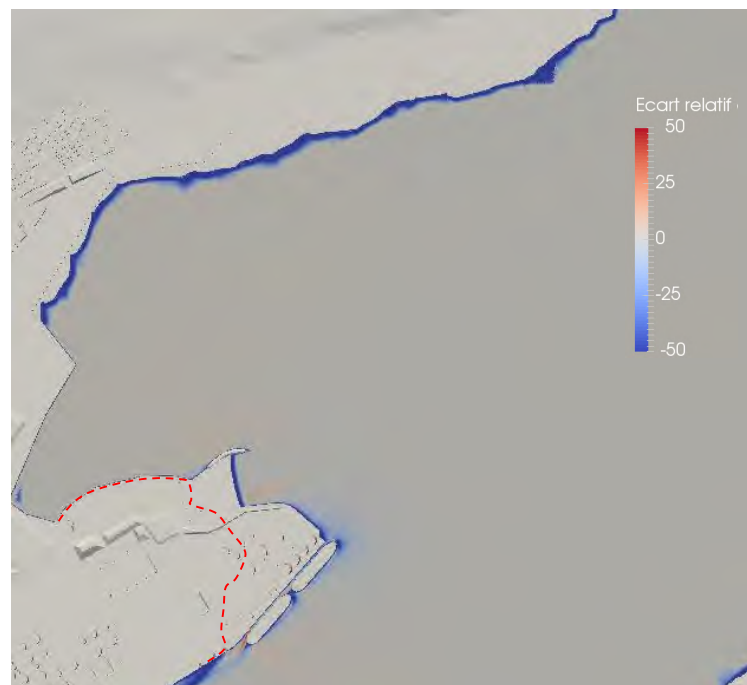


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

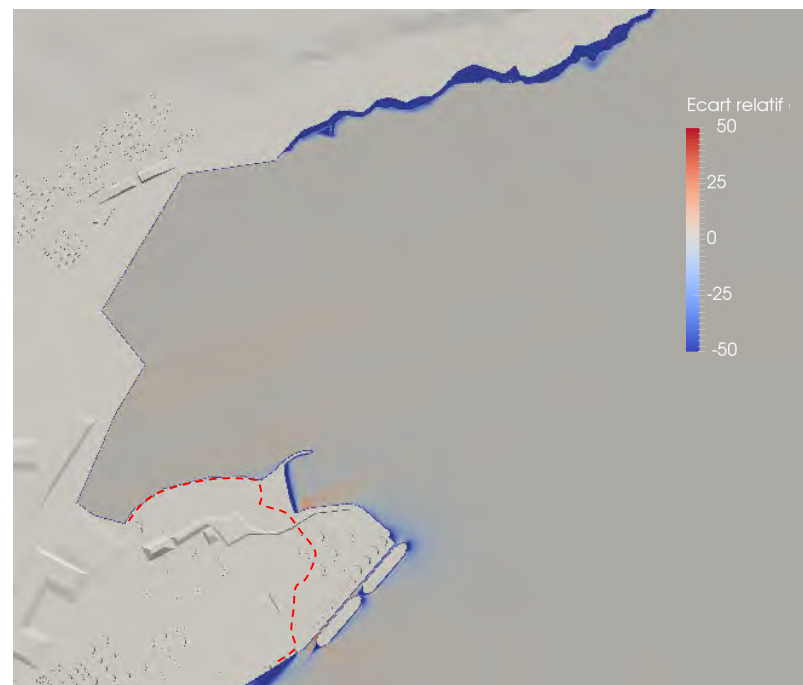
TITRE : Résultats par vent de secteur ENE –
Vitesses relatives – niveau moyen-
brise-lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

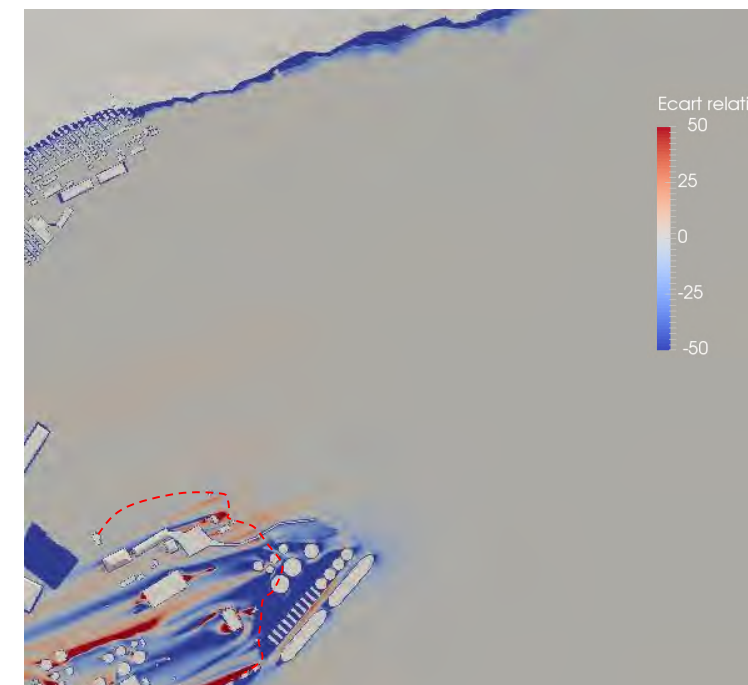
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 7
------------------------	----------------------



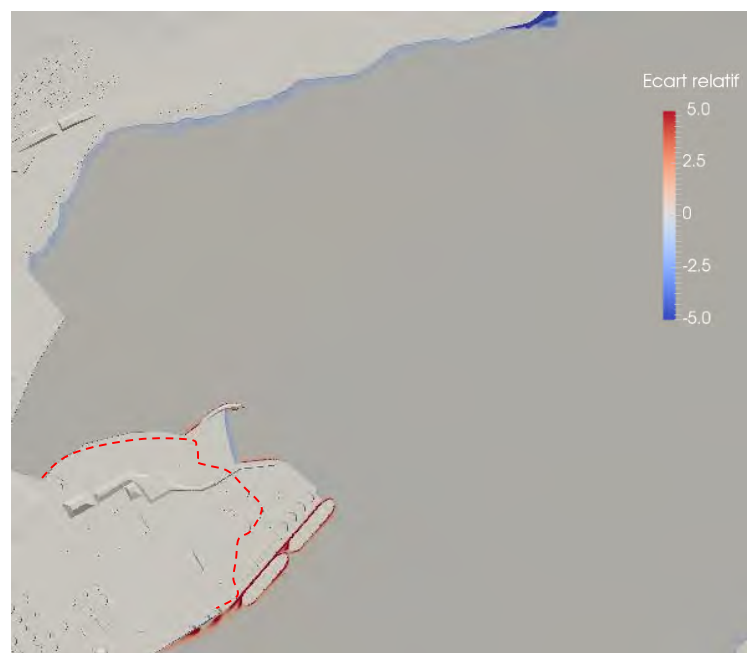
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



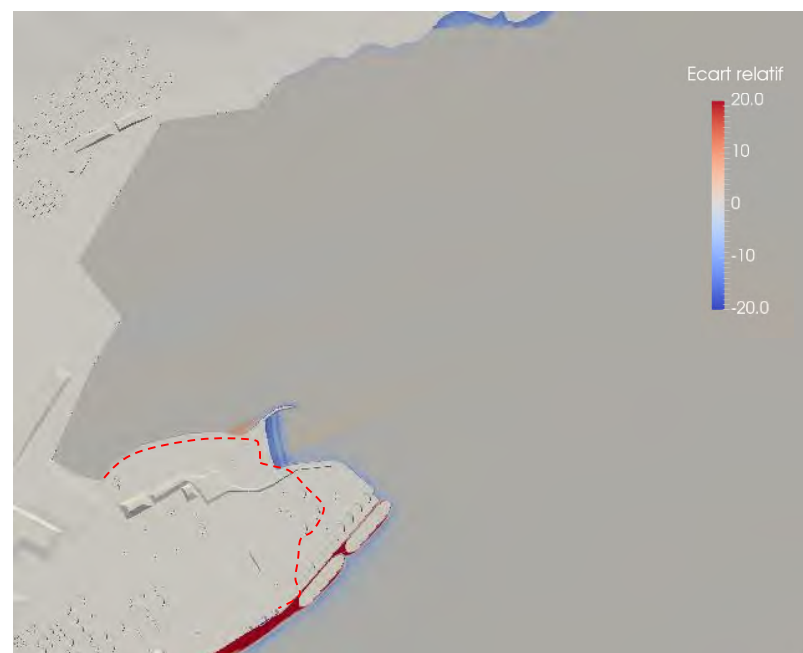
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



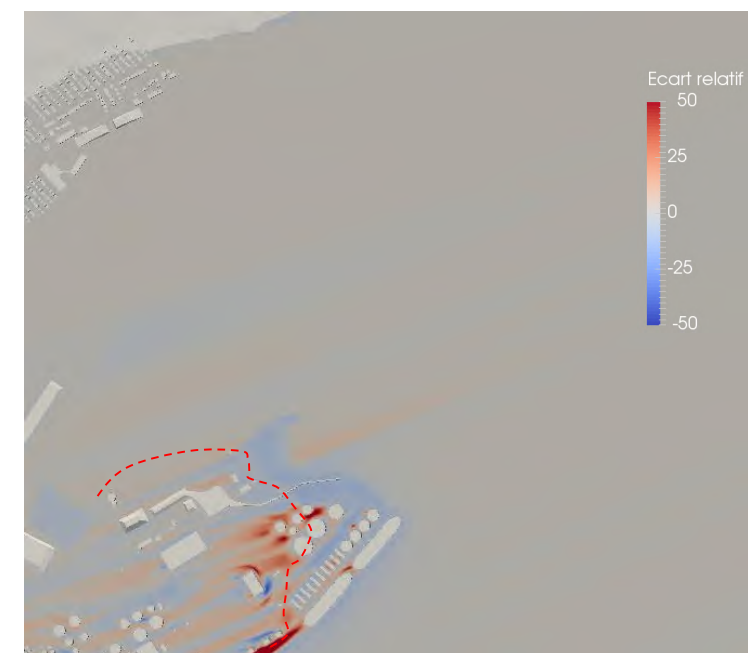
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

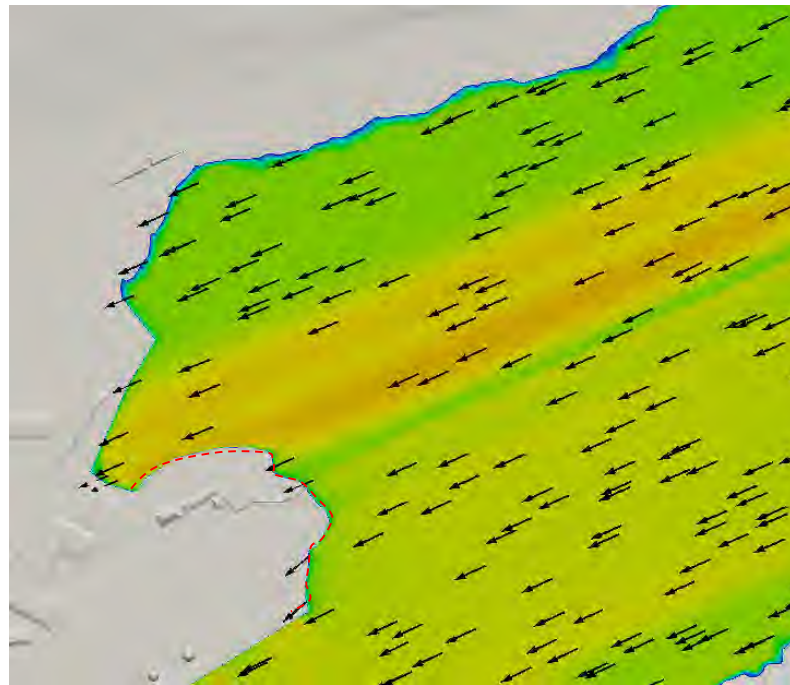


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

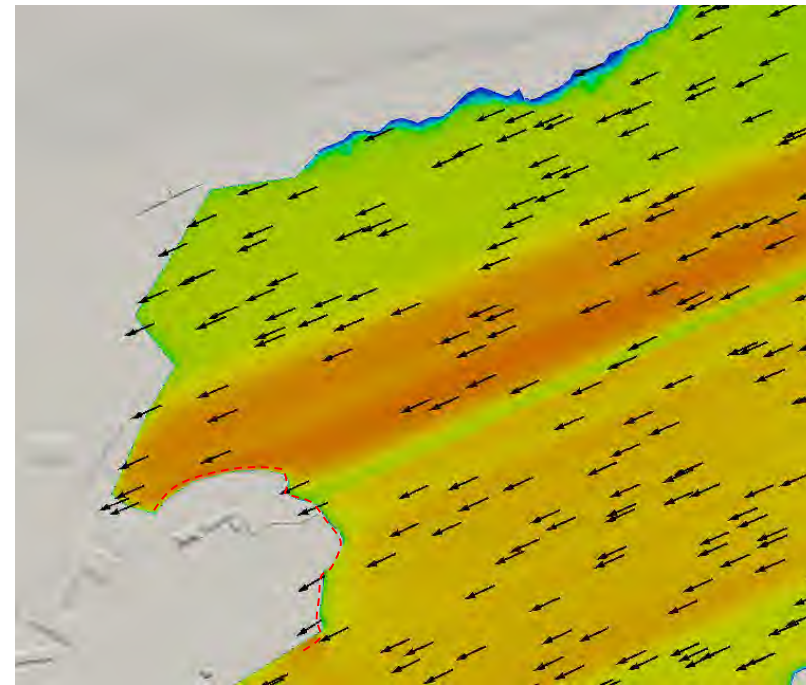
TITRE : Résultats par vent de secteur ENE –
Écarts relatifs– niveau moyen- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

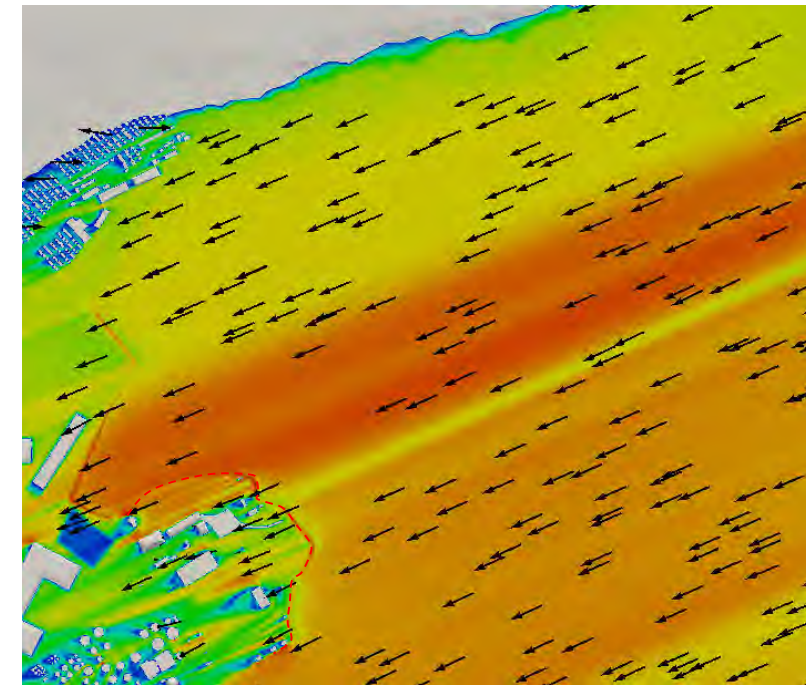
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 8
------------------------	----------------------



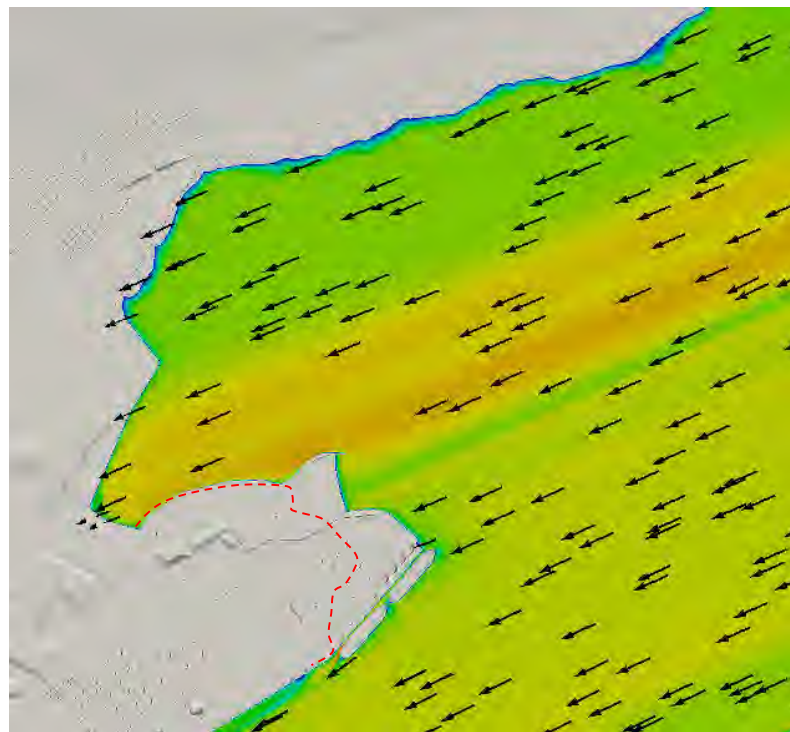
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



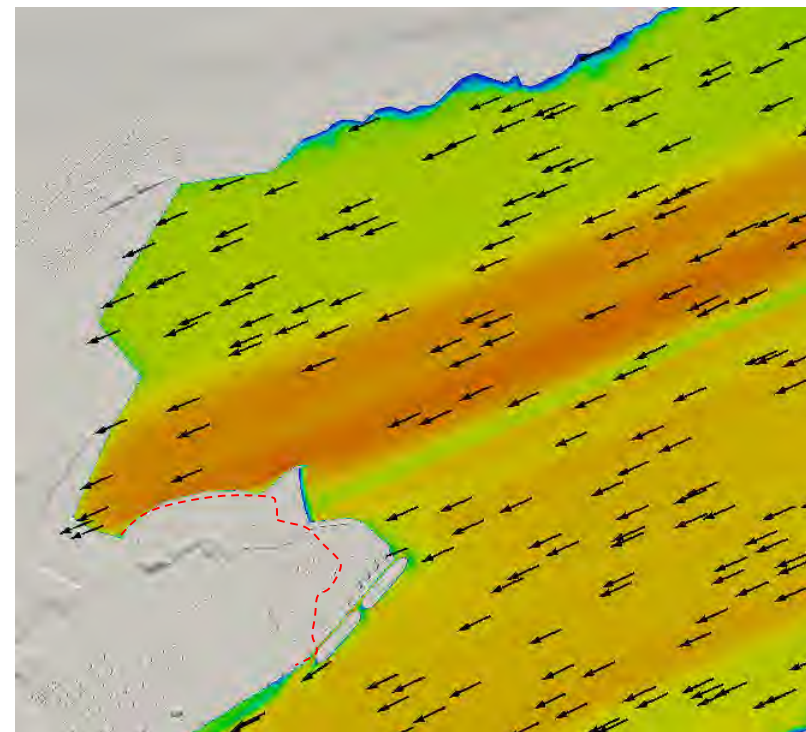
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



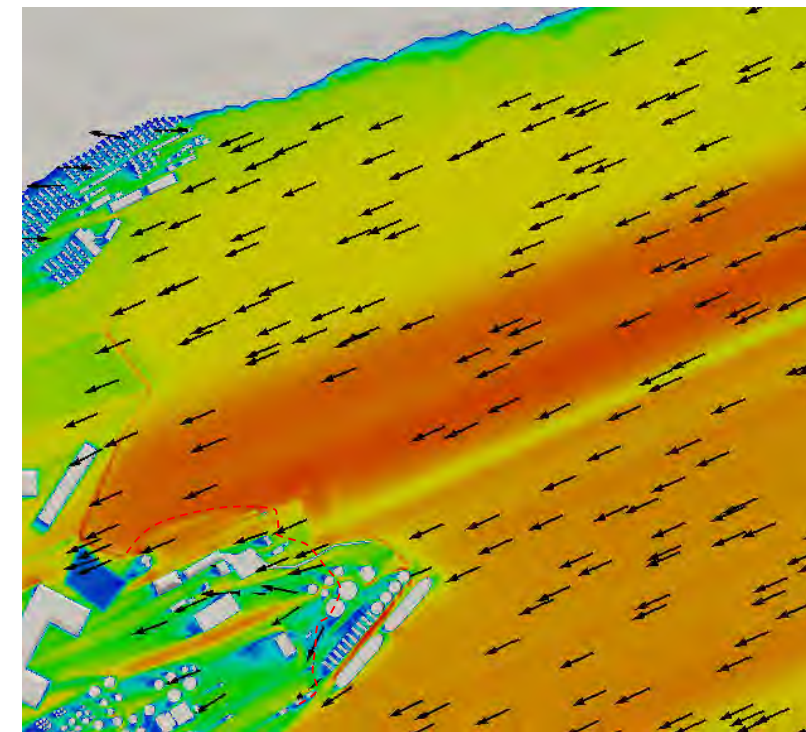
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



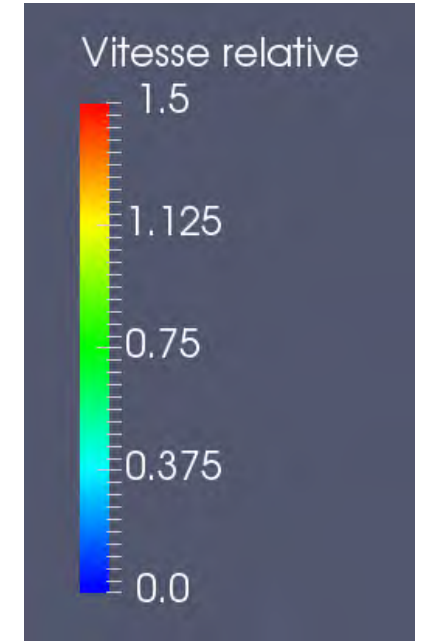
b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

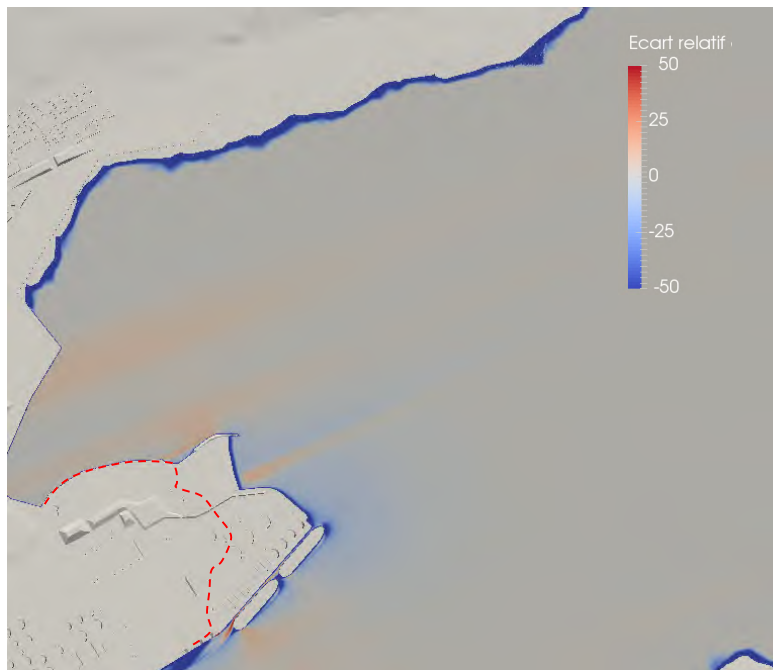


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

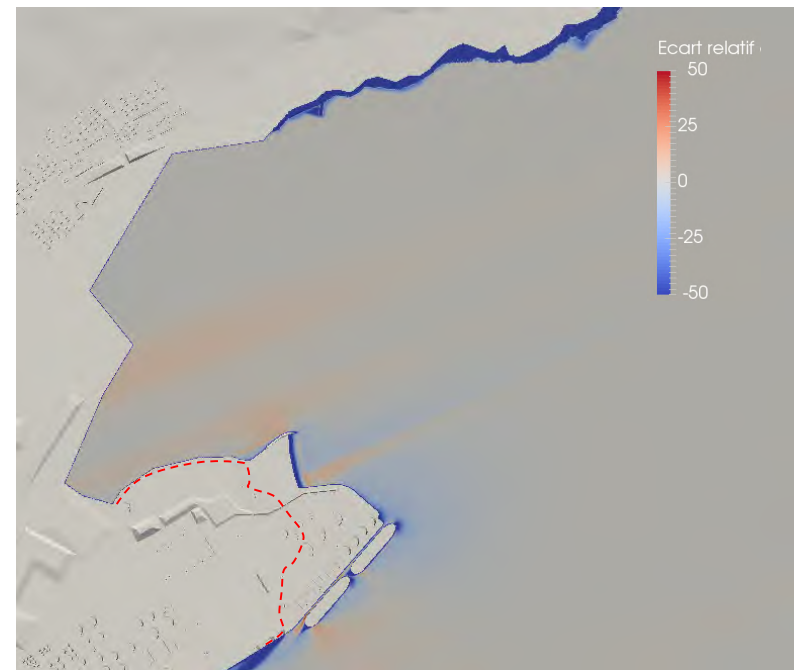
TITRE : Résultats par vent de secteur ENE –
Vitesses relatives – niveau moyen-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

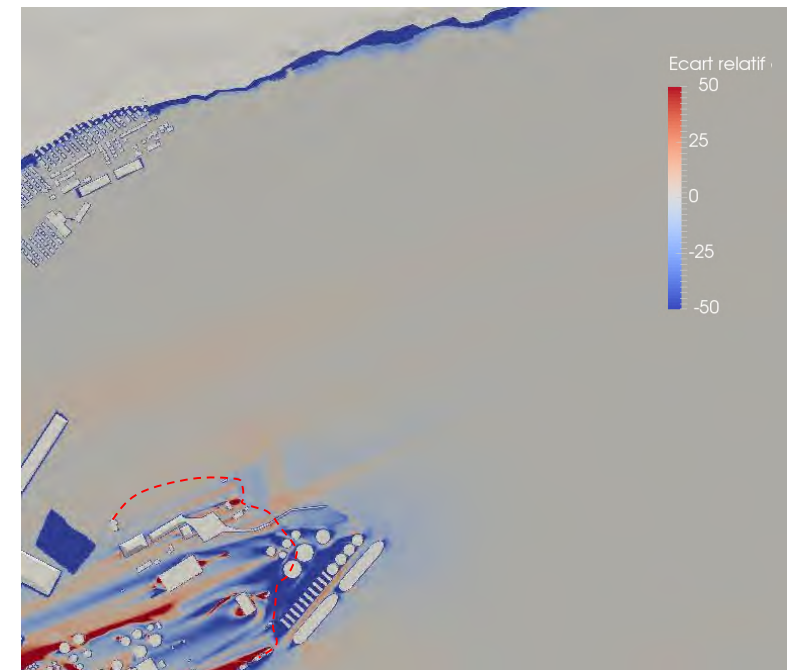
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 9
------------------------	----------------------



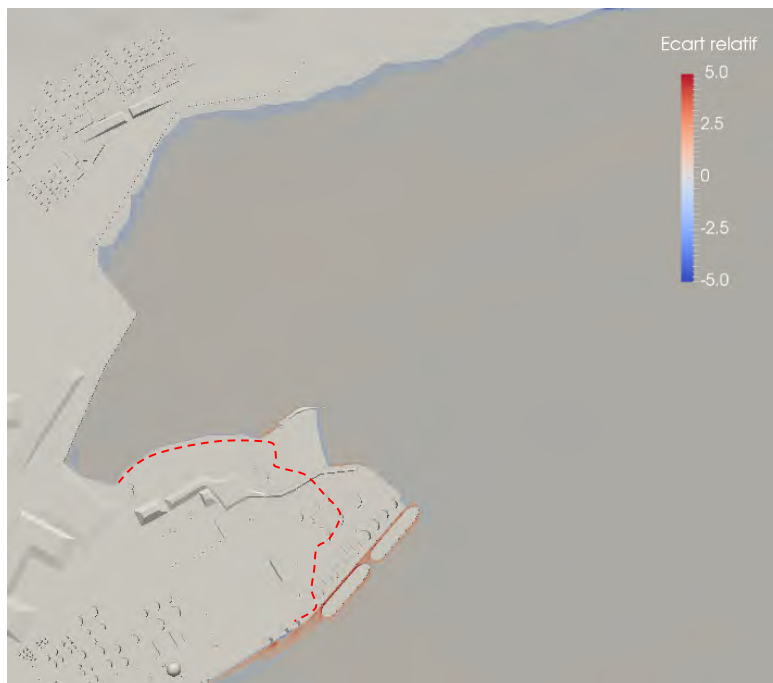
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



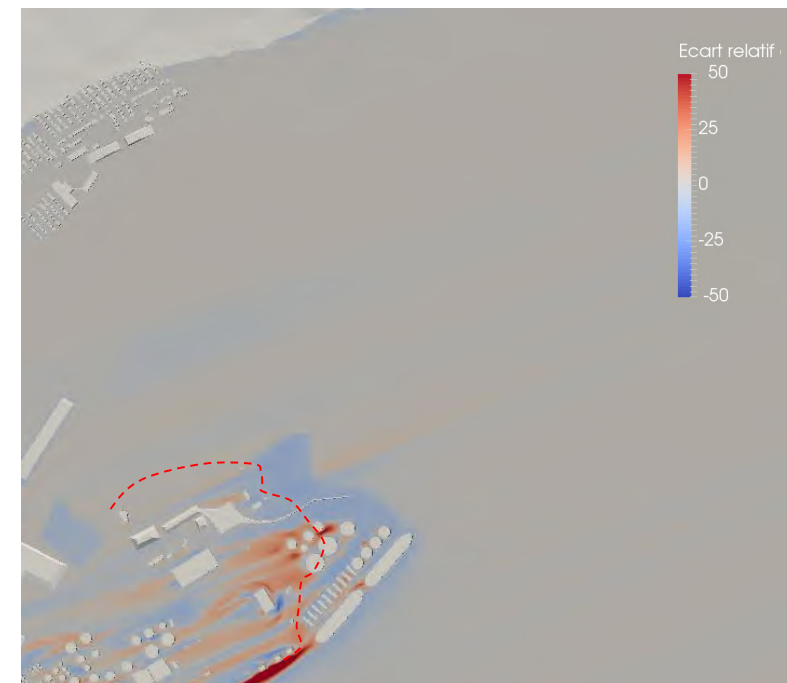
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

lasalle nhc

CLIENT :

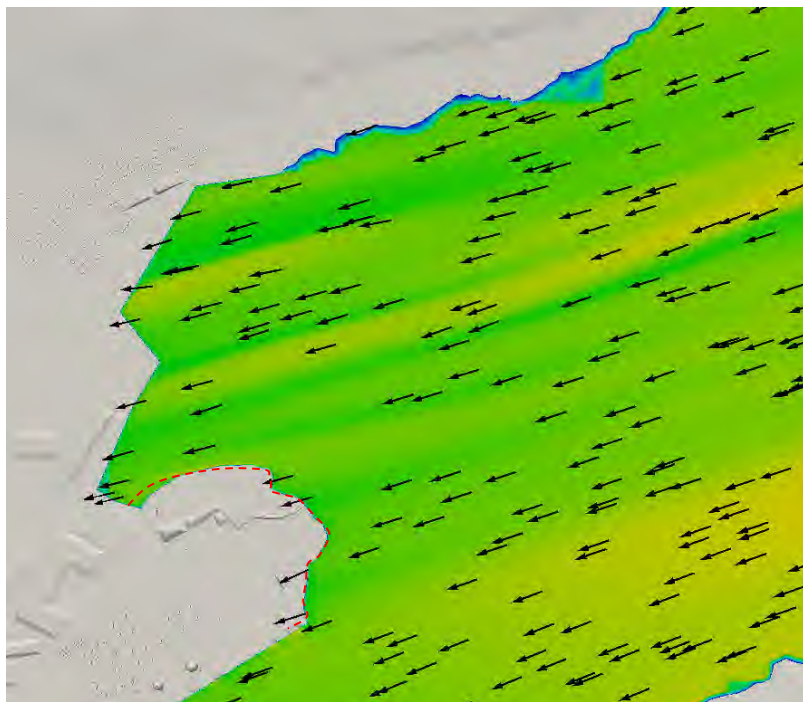


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

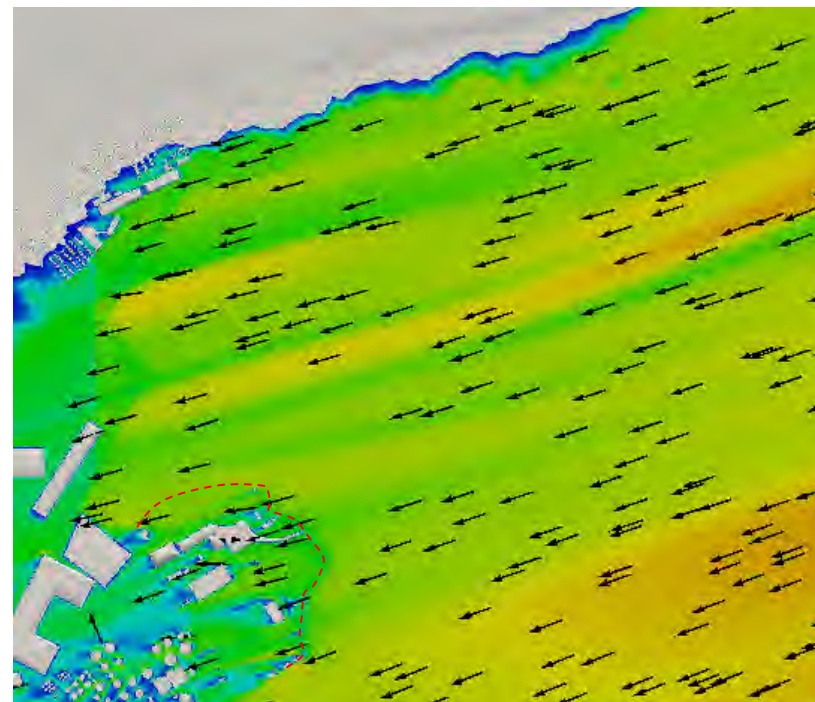
TITRE: Résultats par vent de secteur ENE
– Écarts relatifs– niveau moyen-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

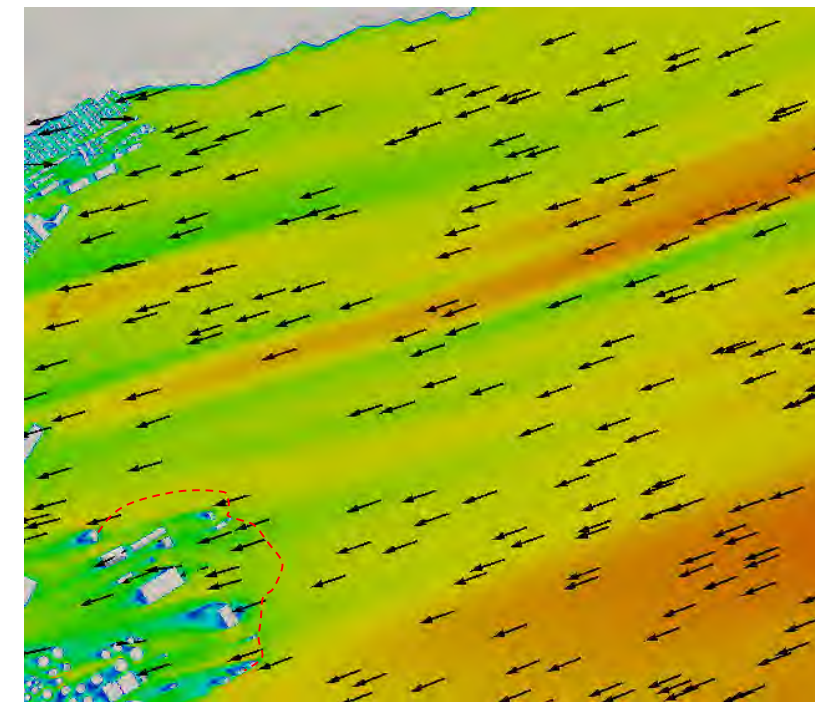
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 10
------------------------	-----------------------



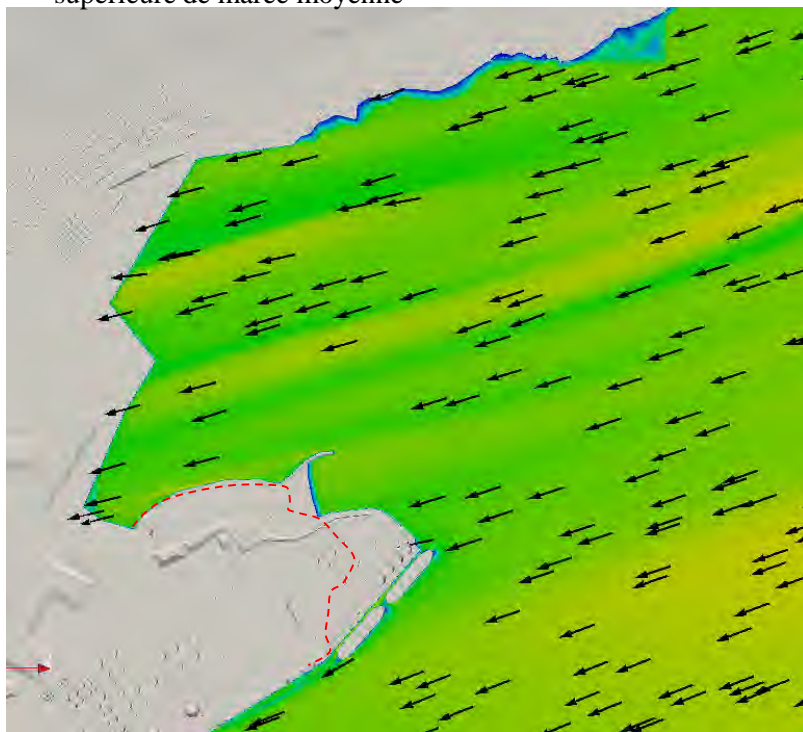
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



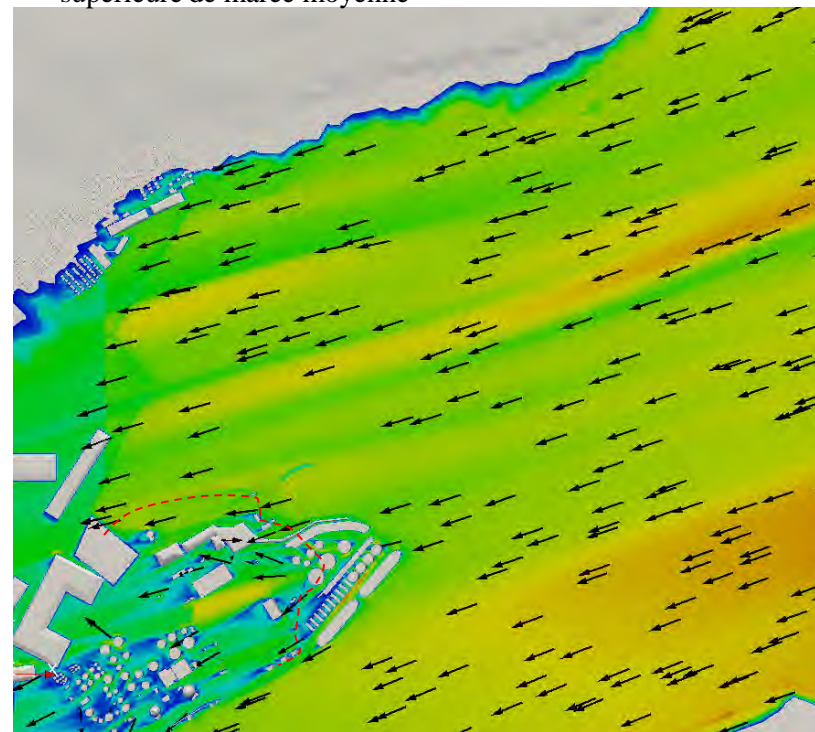
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



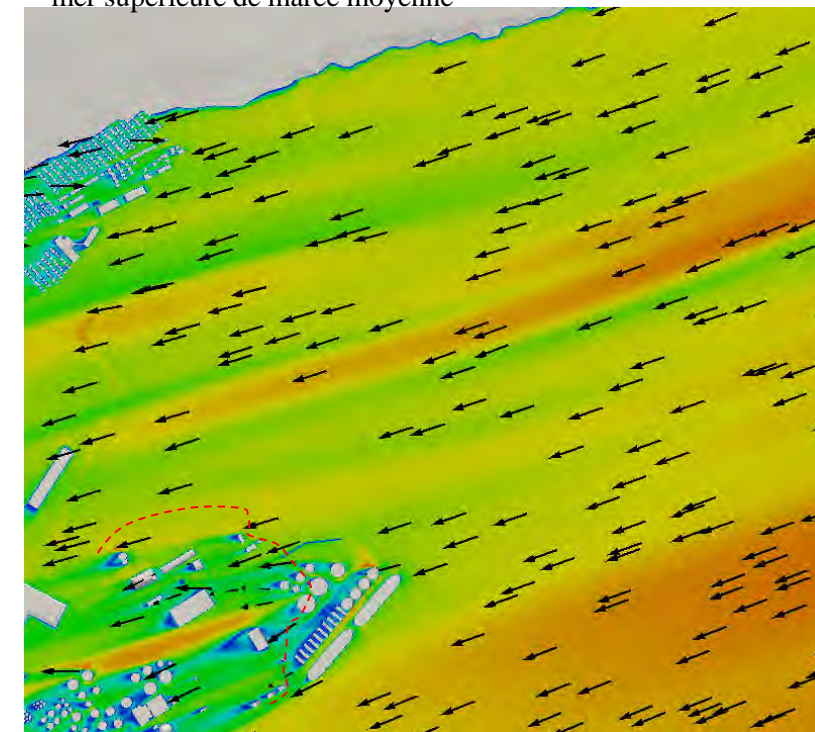
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



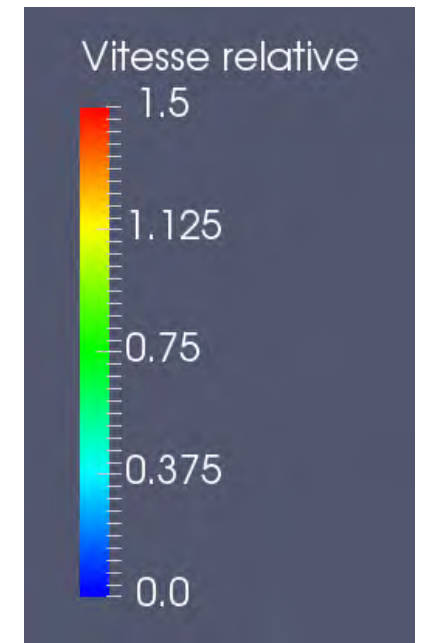
b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

lasalle nhc

CLIENT :

PORT
QUÉBEC

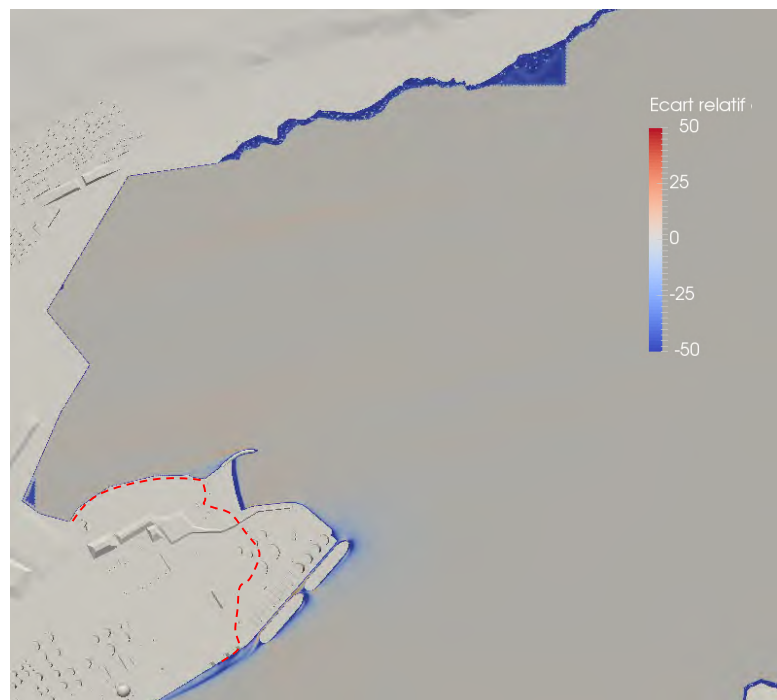
PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

TITRE : Résultats par vent de secteur ENE –
Vitesses relatives – niveau PMSMM-
brise-lame conventionnel

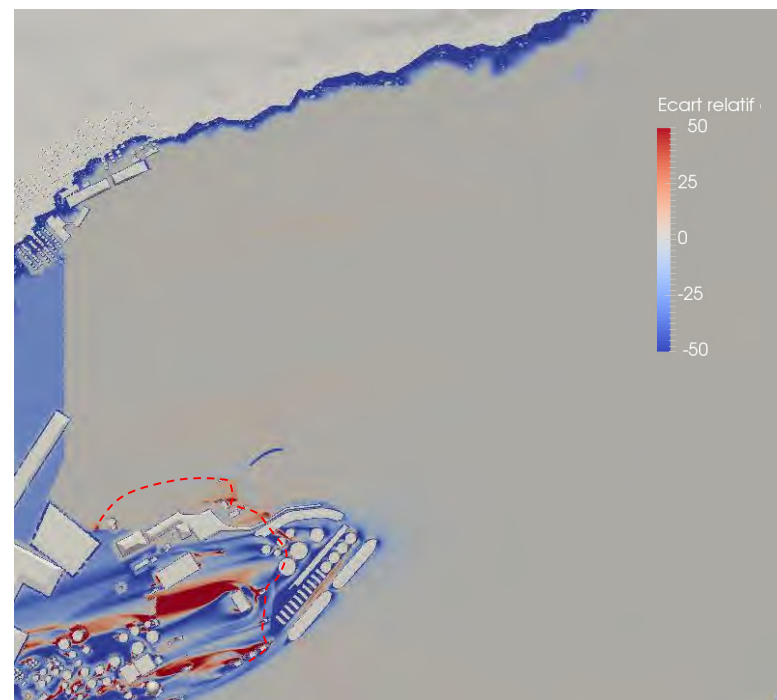
PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

DATE: Décembre 2016	FIGURE : 11
------------------------	-----------------------

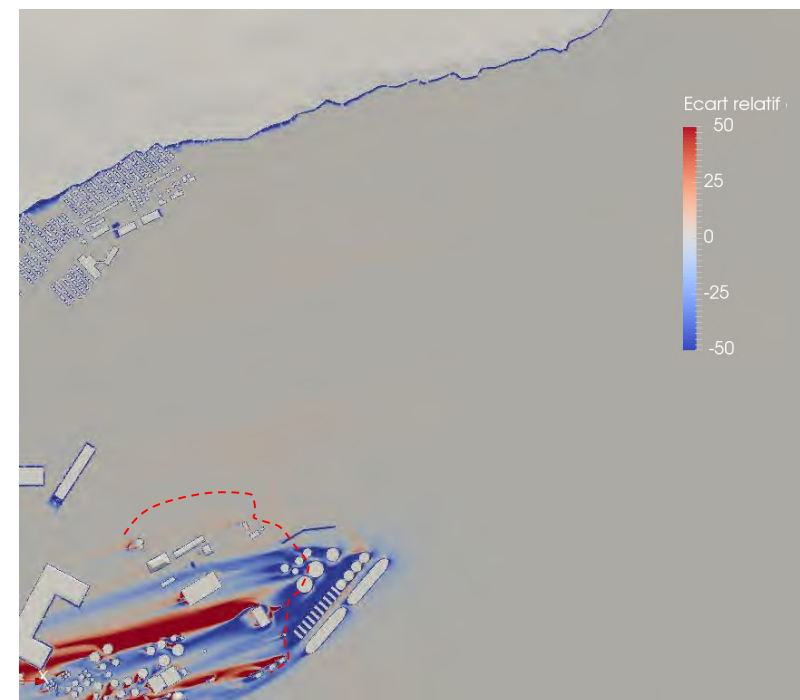
----- Limite actuelle de la pointe de Beauport



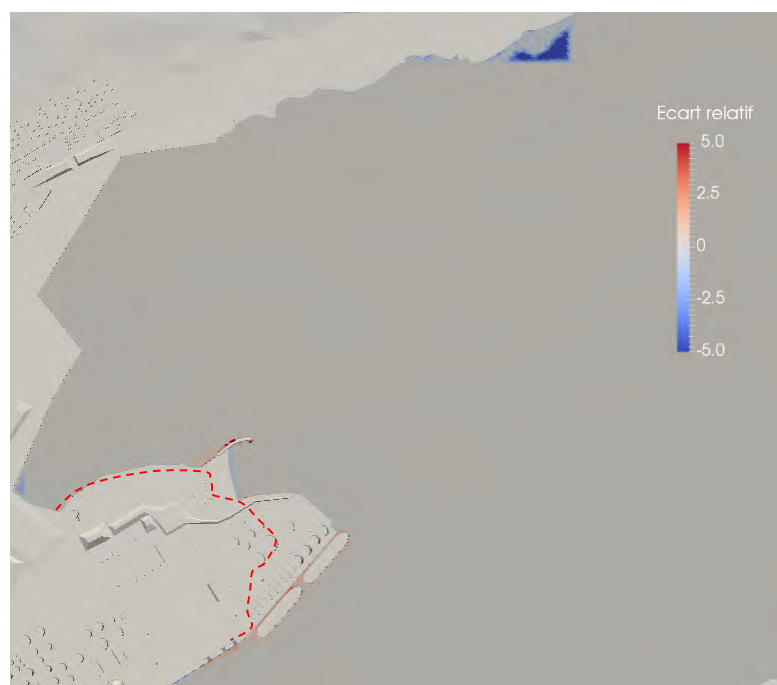
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



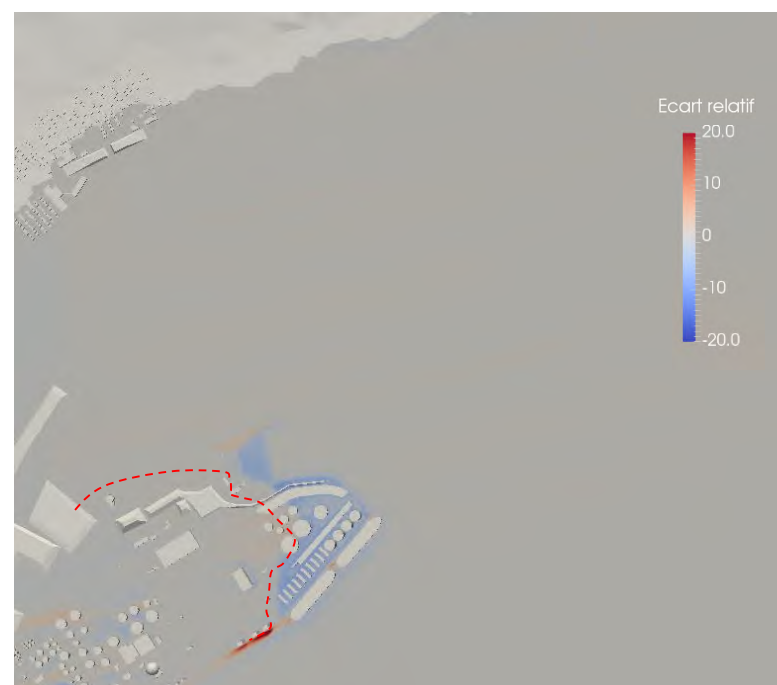
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



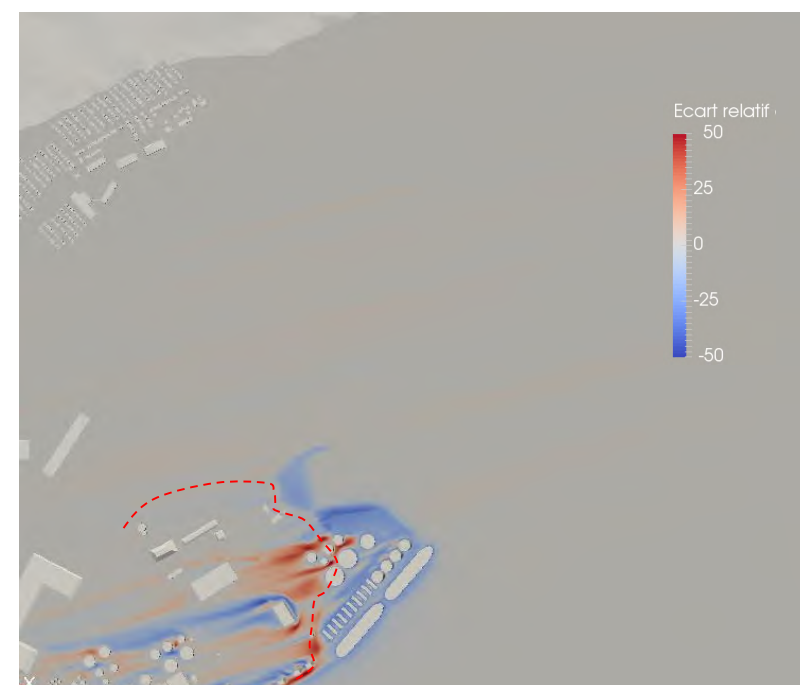
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

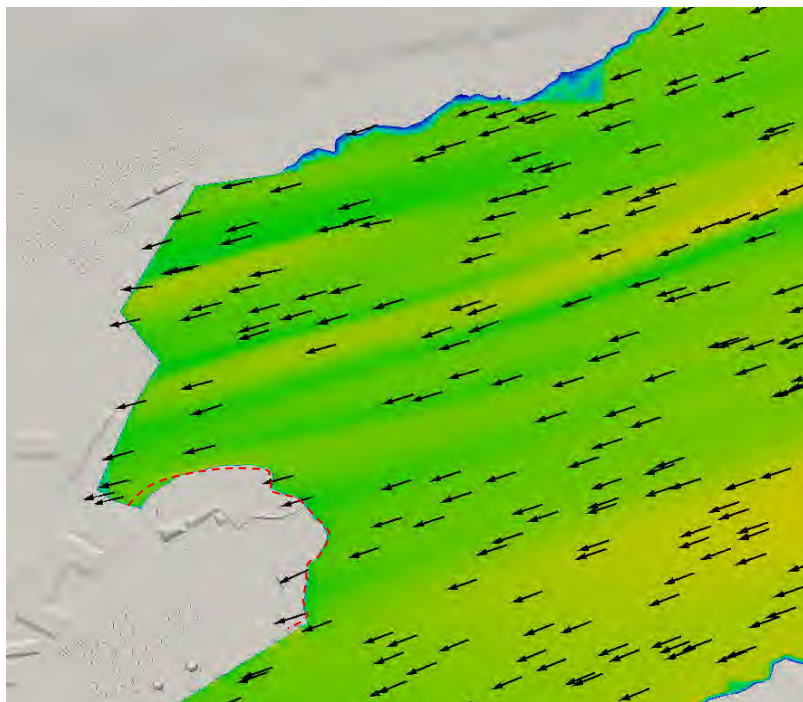


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

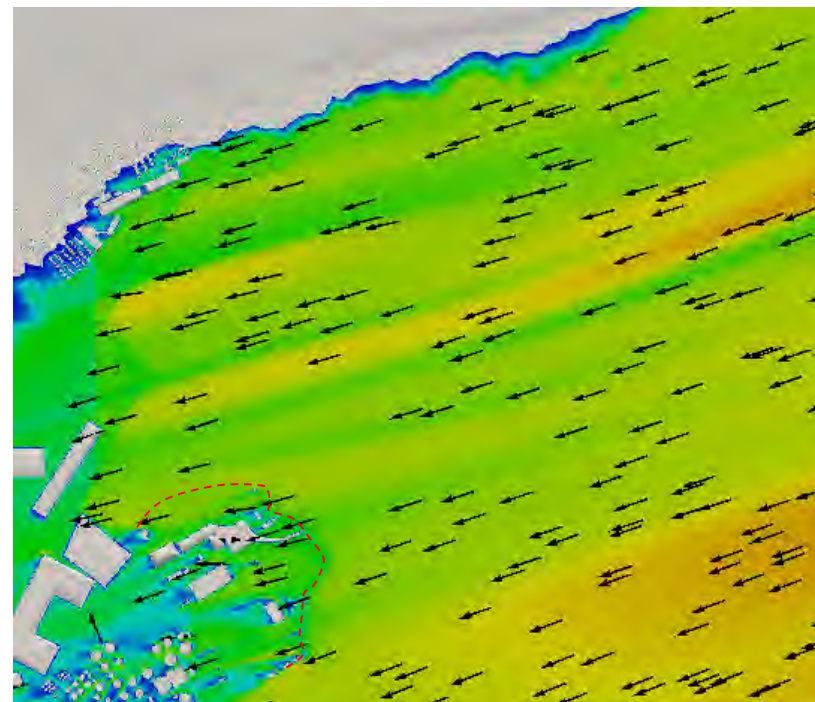
TITRE: Résultats par vent de secteur ENE –
Écarts relatifs– niveau PMSMM- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

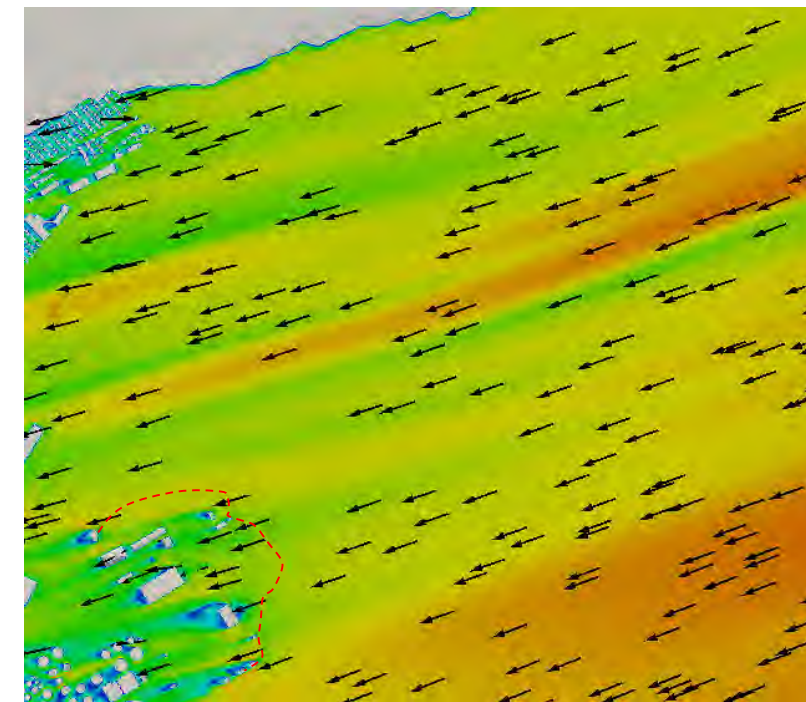
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 12
------------------------	-----------------------



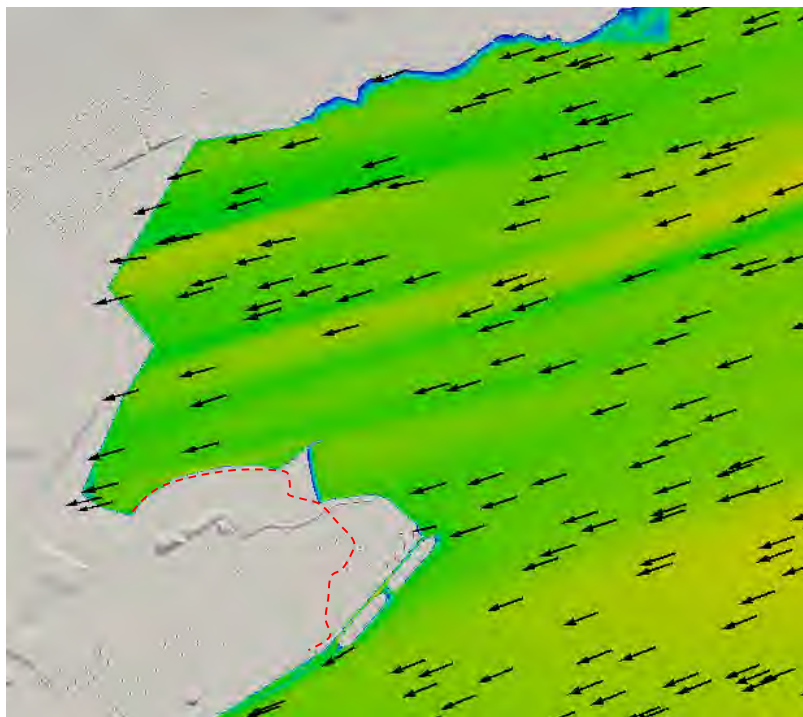
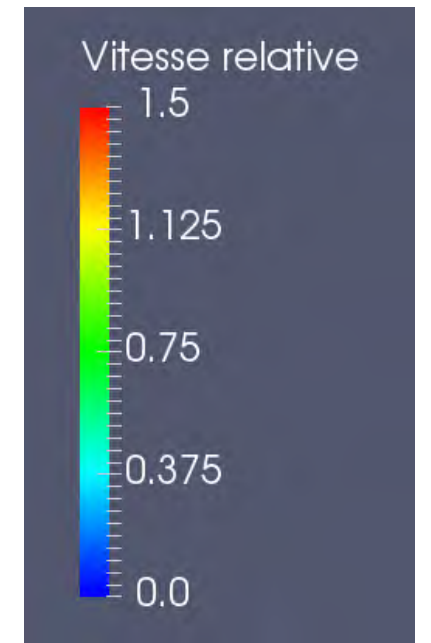
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



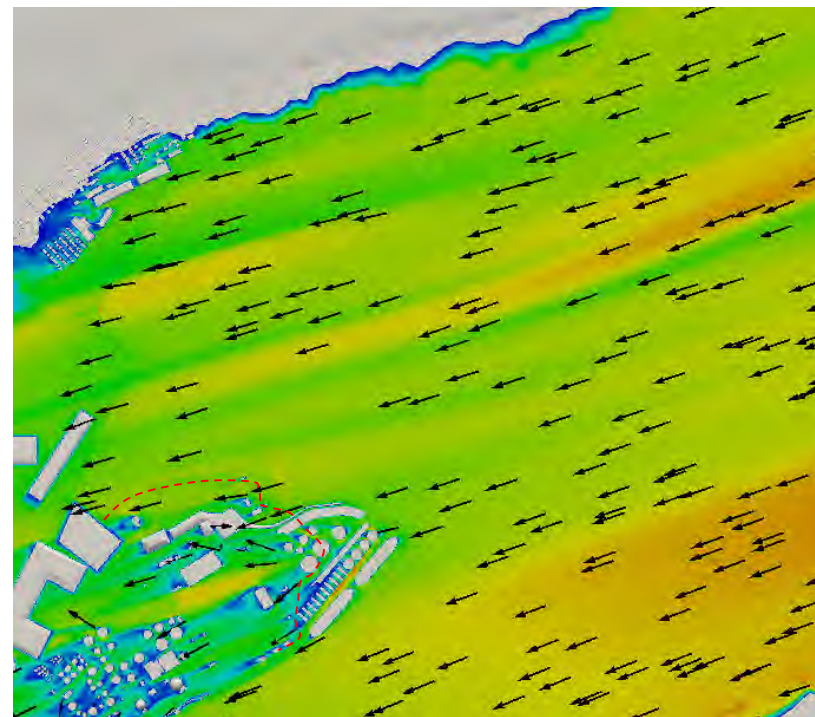
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



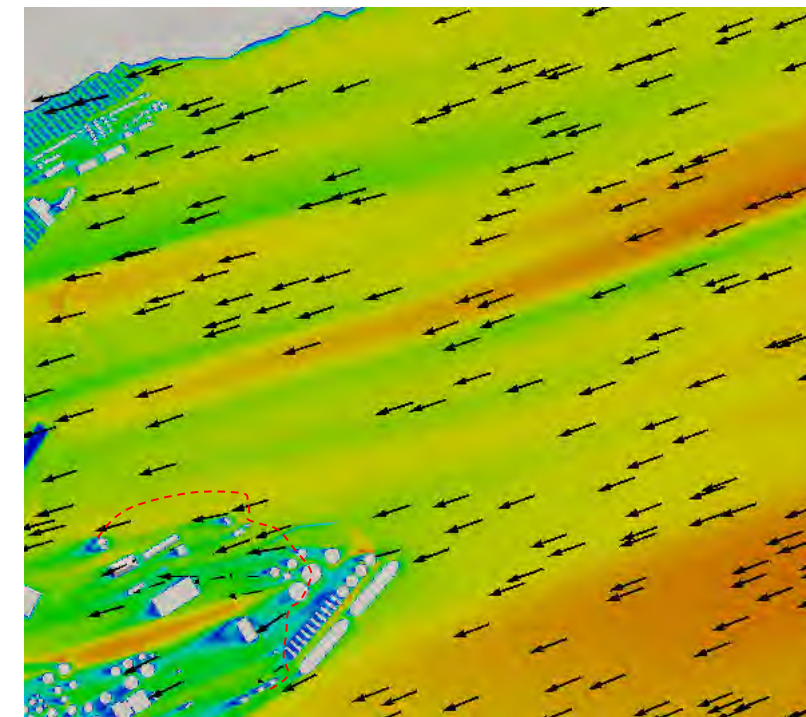
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

lasalle nhc

CLIENT :



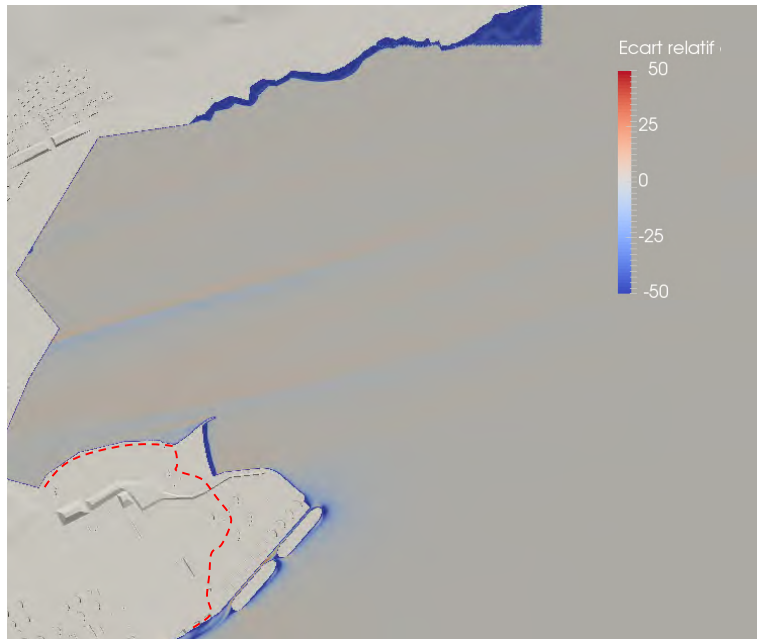
PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

TITRE : Résultats par vent de secteur ENE –
Vitesses relatives – niveau PMSMM-
brise-lame submersible

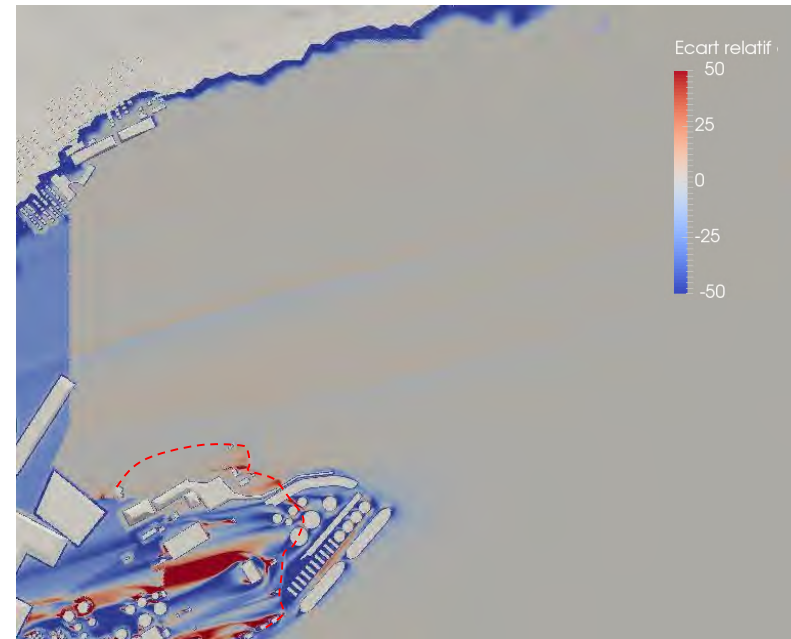
PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

DATE: Décembre 2016	FIGURE : 13
------------------------	-----------------------

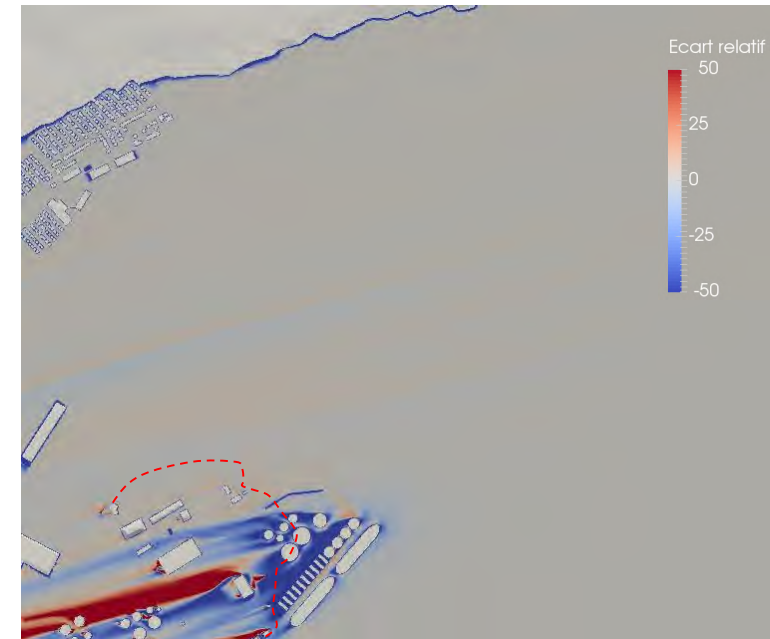
----- Limite actuelle de la pointe de Beauport



a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



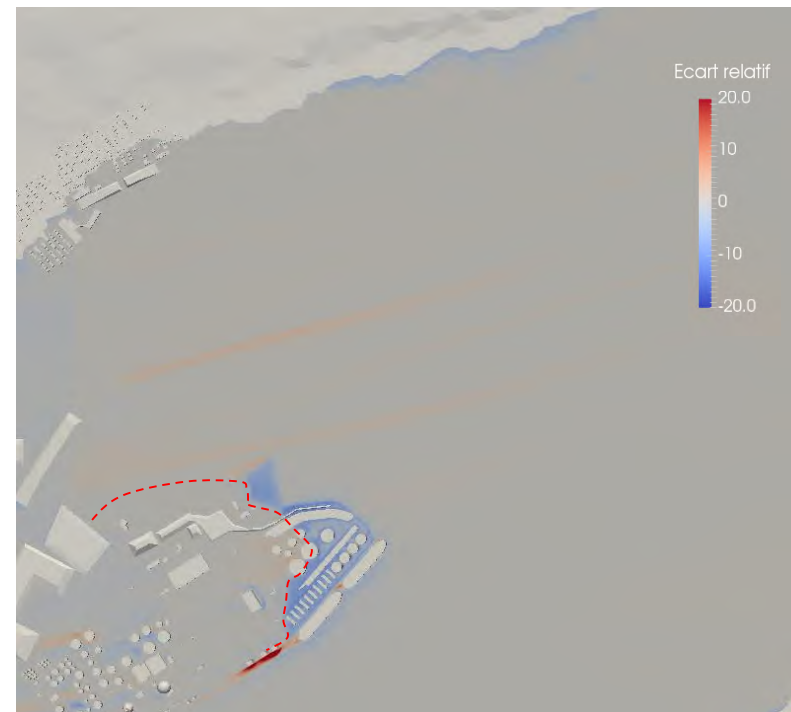
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



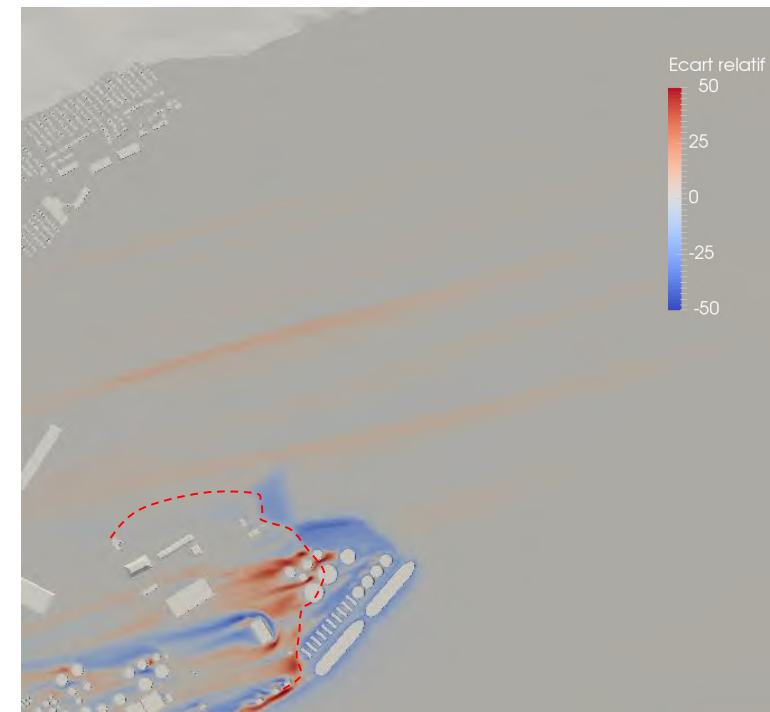
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

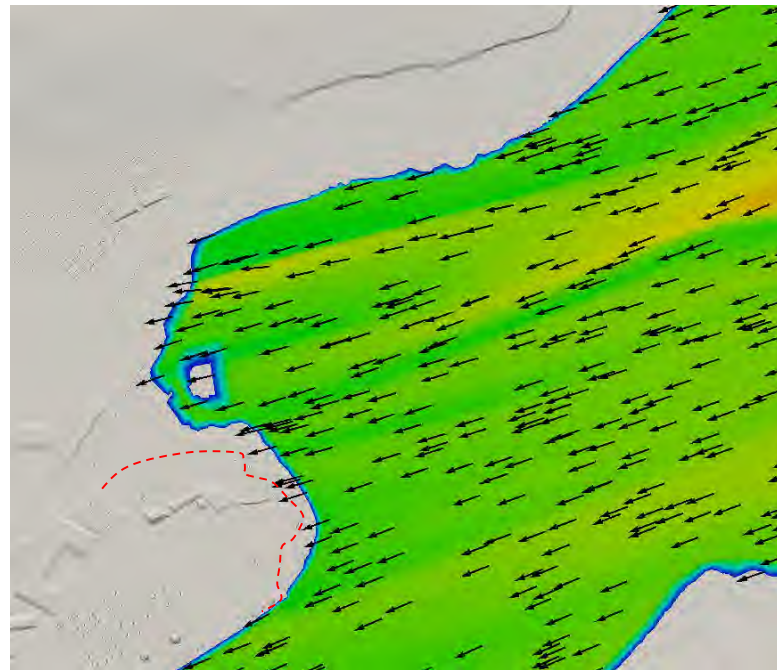


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

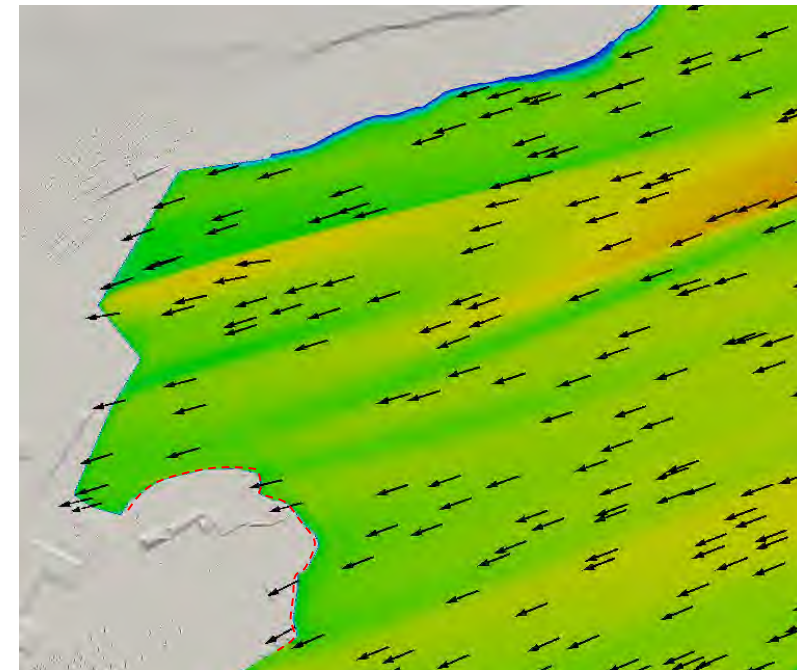
TITRE: Résultats par vent de secteur ENE
– Écart relatif– niveau PMSMM-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

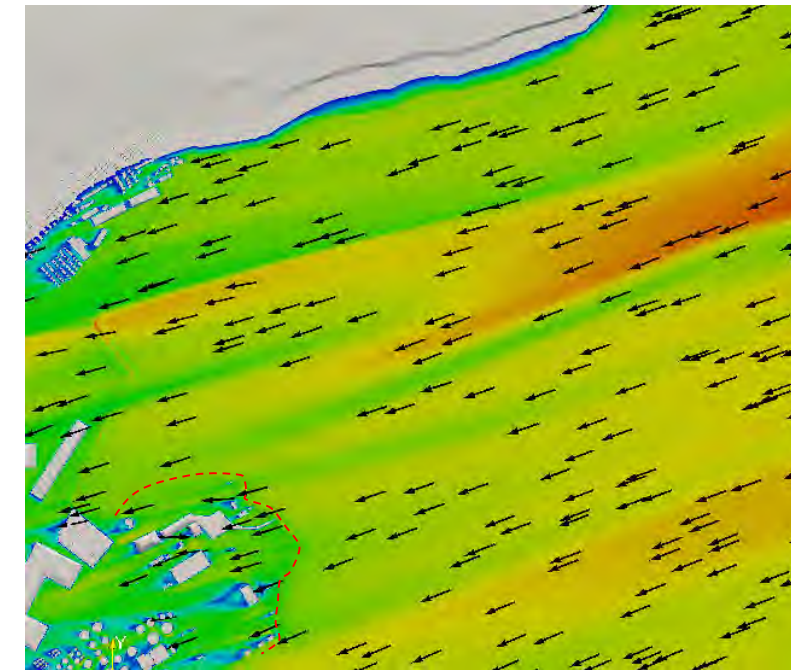
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 14
------------------------	-----------------------



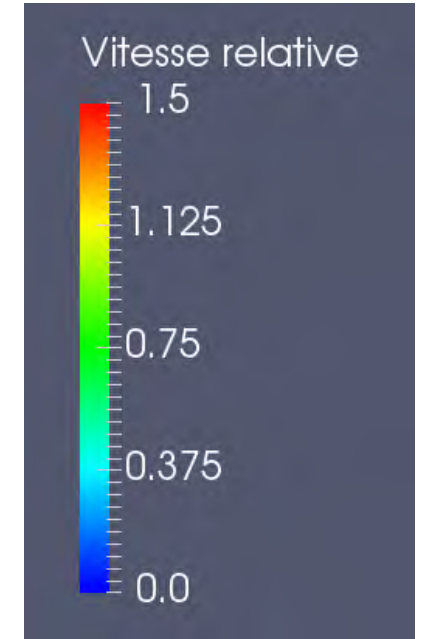
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

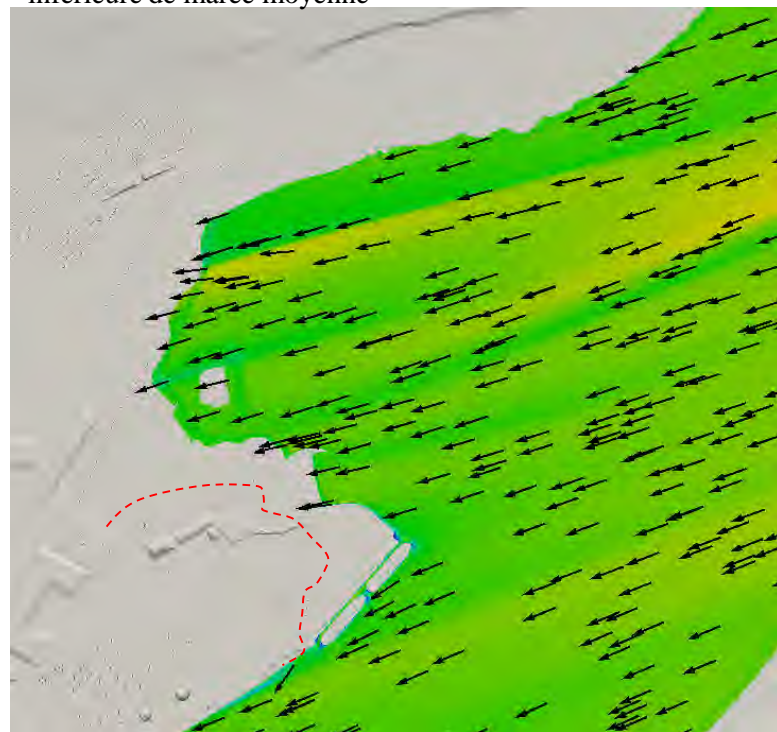


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

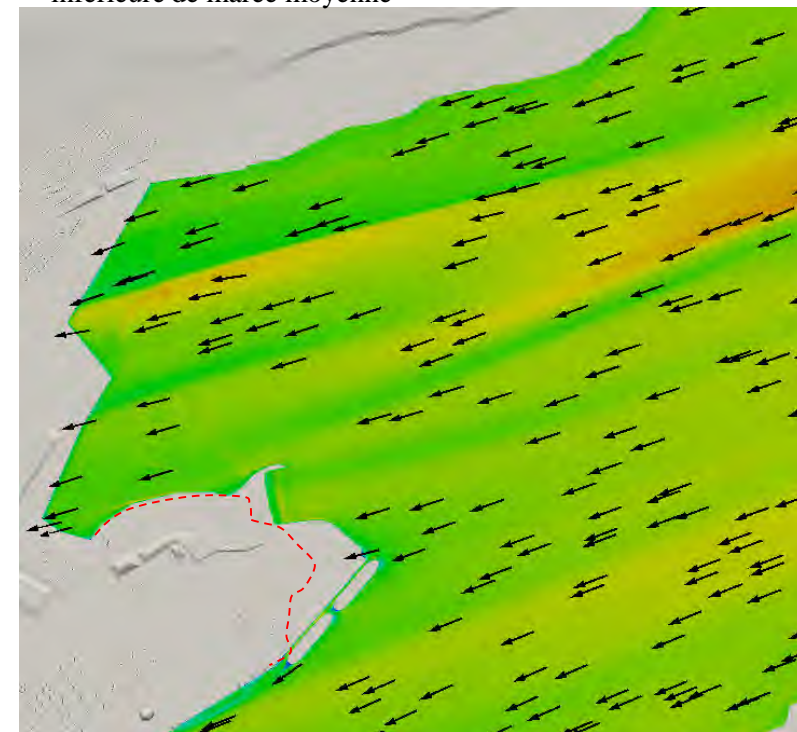


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

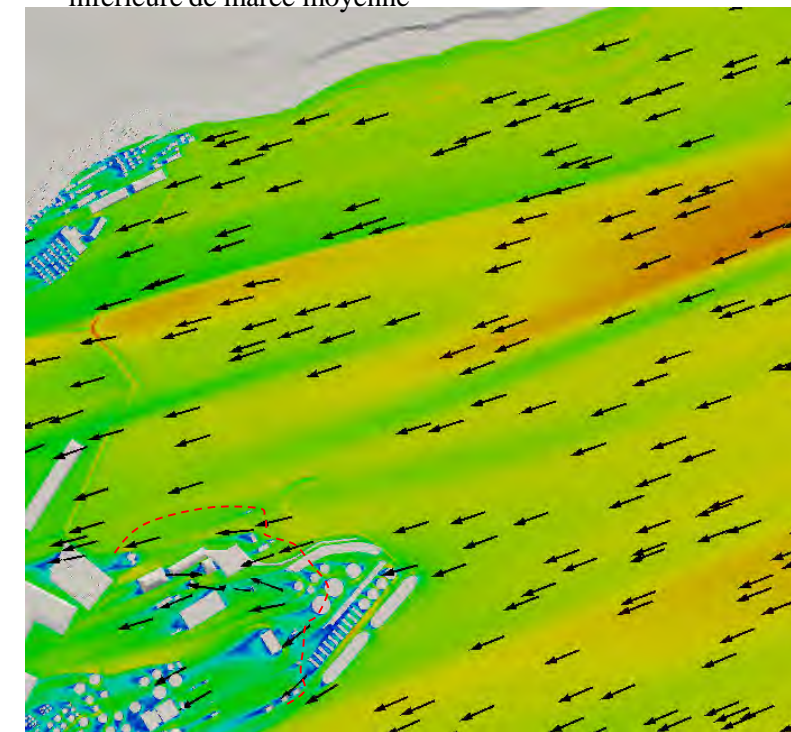
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

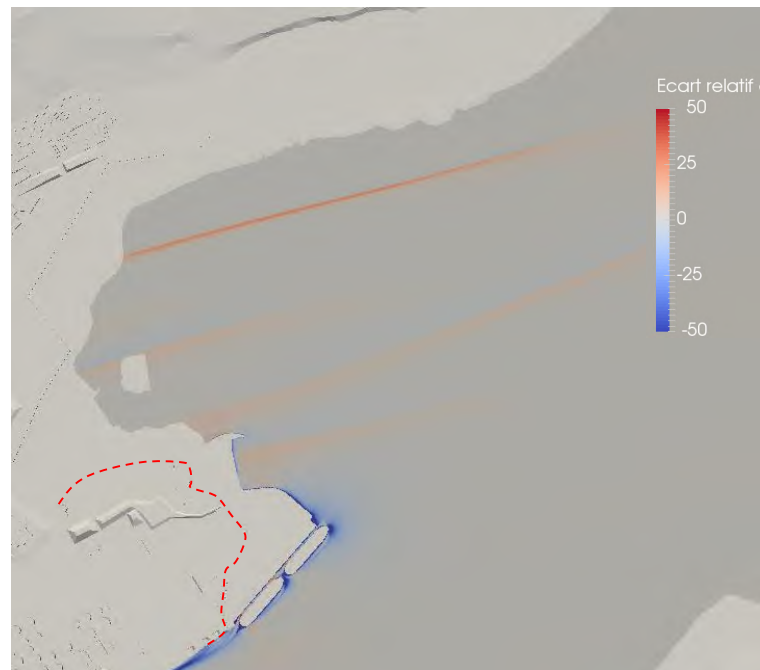


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

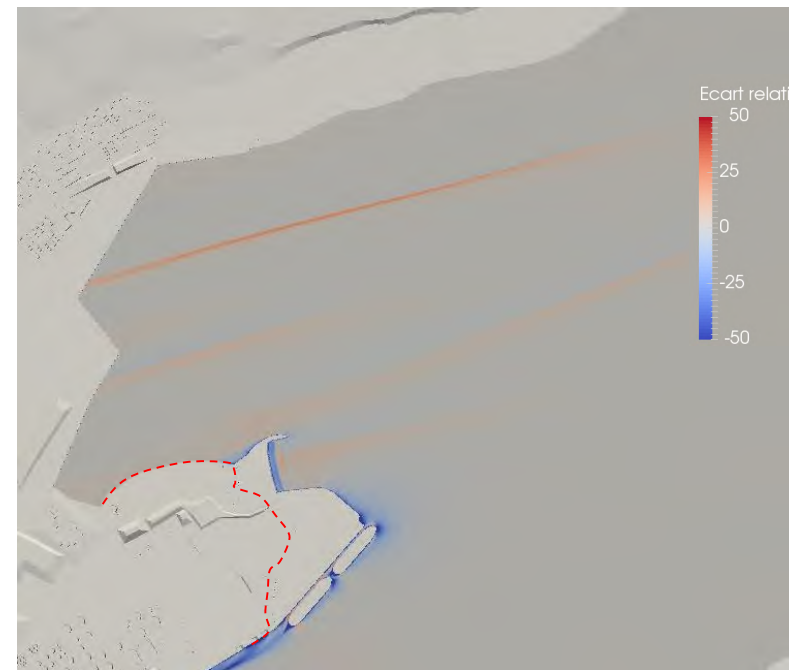
TITRE : Résultats par vent de secteur ENE –
Vitesses relatives – niveau BMIMM-
brise-lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

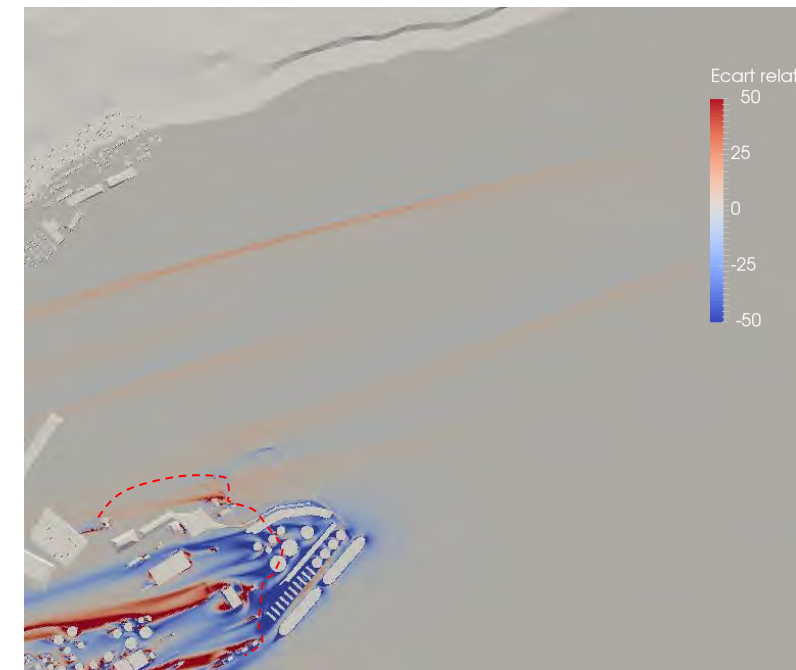
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 15
------------------------	-----------------------



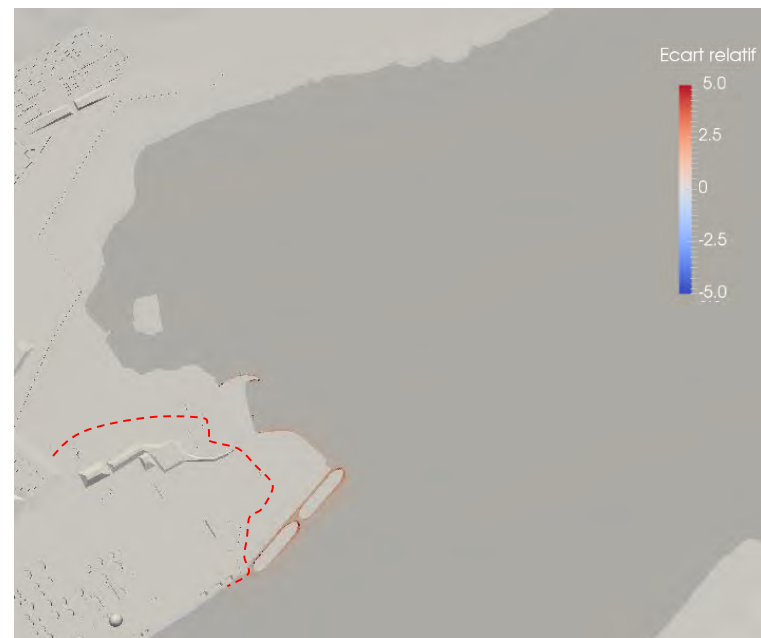
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



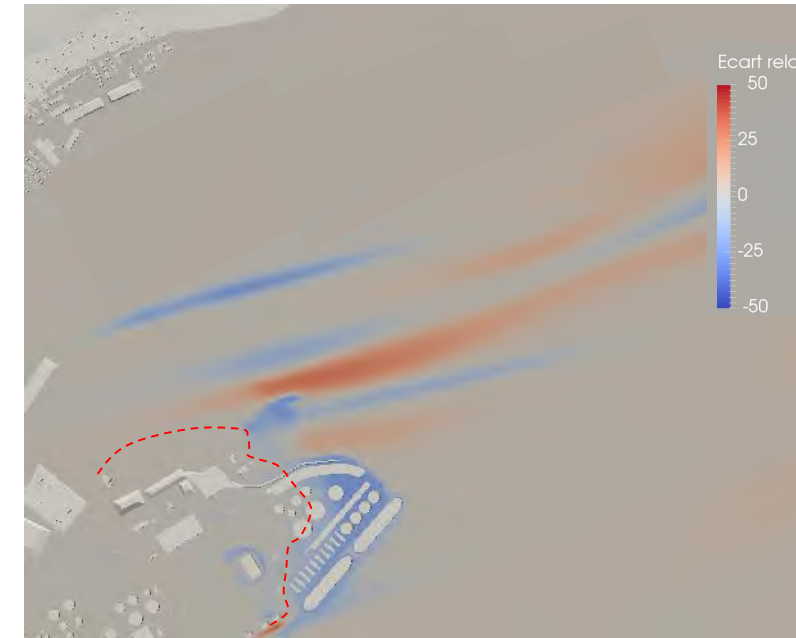
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

lasalle nhc

CLIENT :

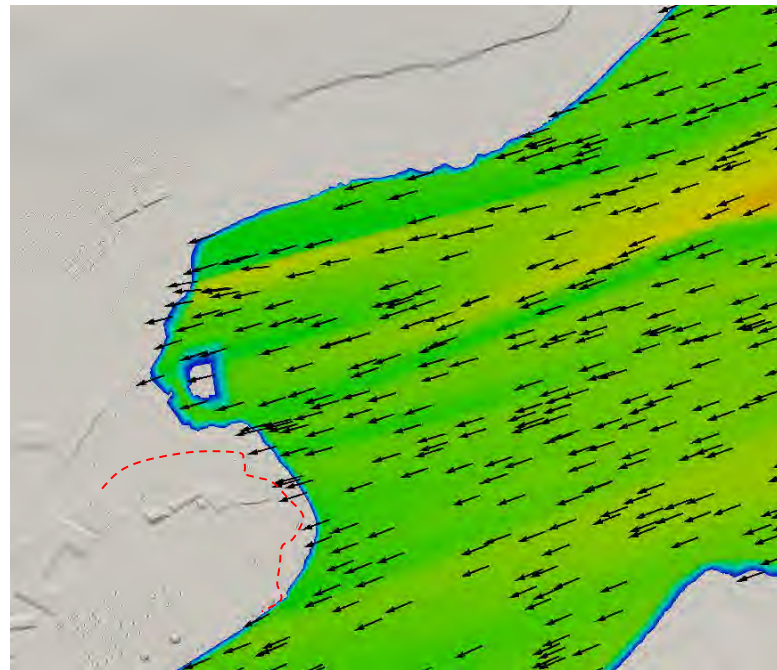


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

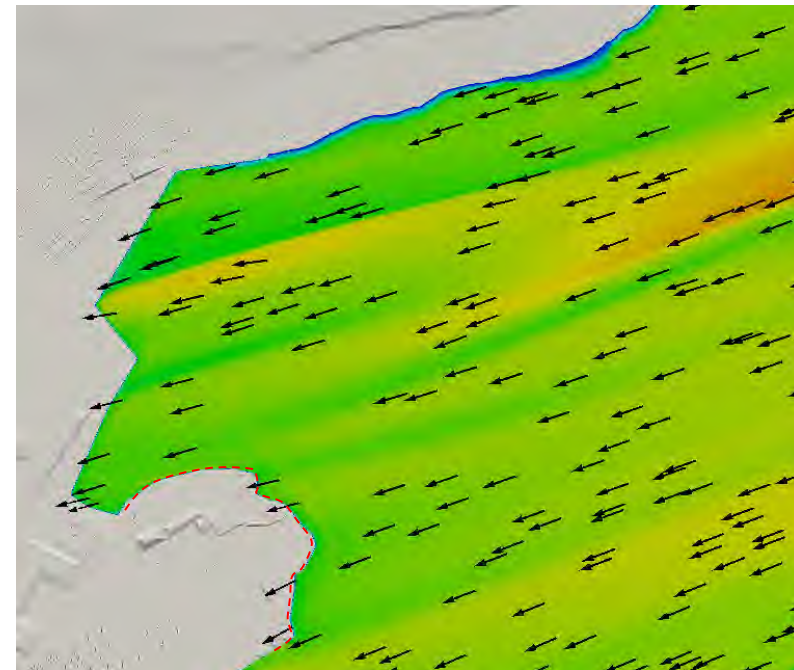
TITRE: Résultats par vent de secteur ENE –
Écarts relatifs– niveau BMIMM- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

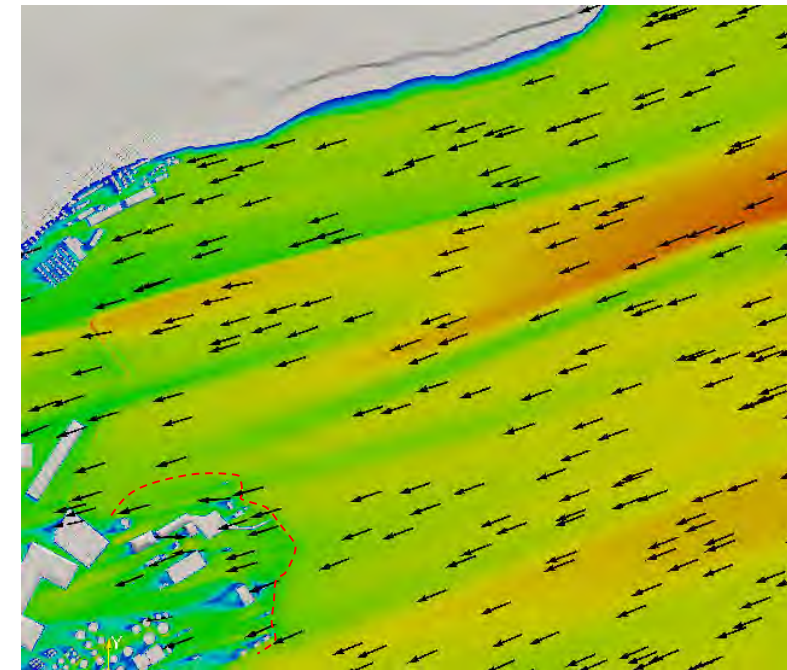
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 16
------------------------	-----------------------



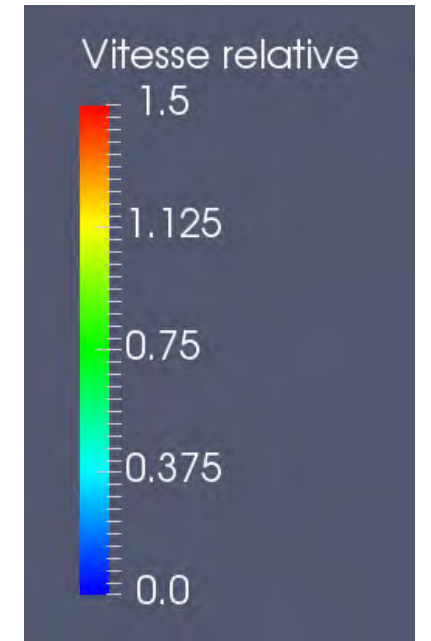
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

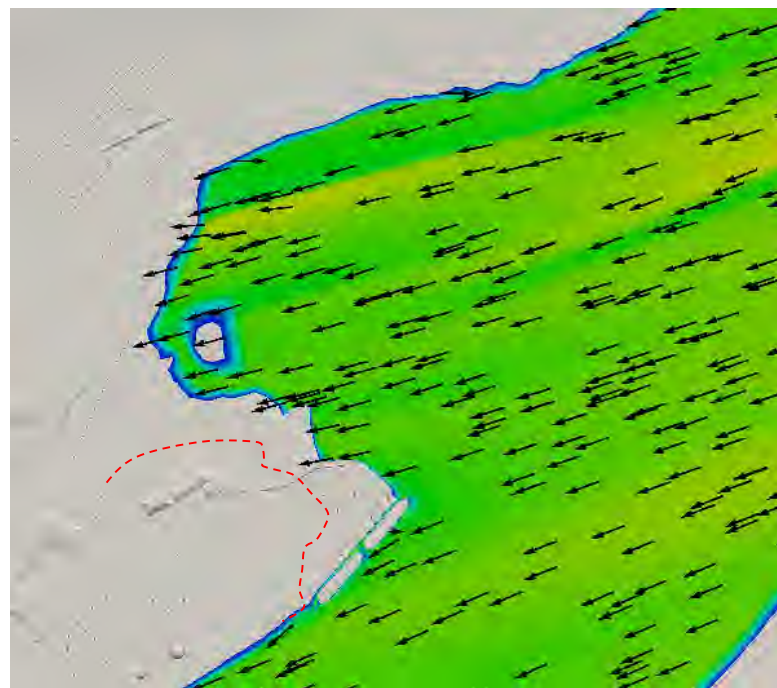


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

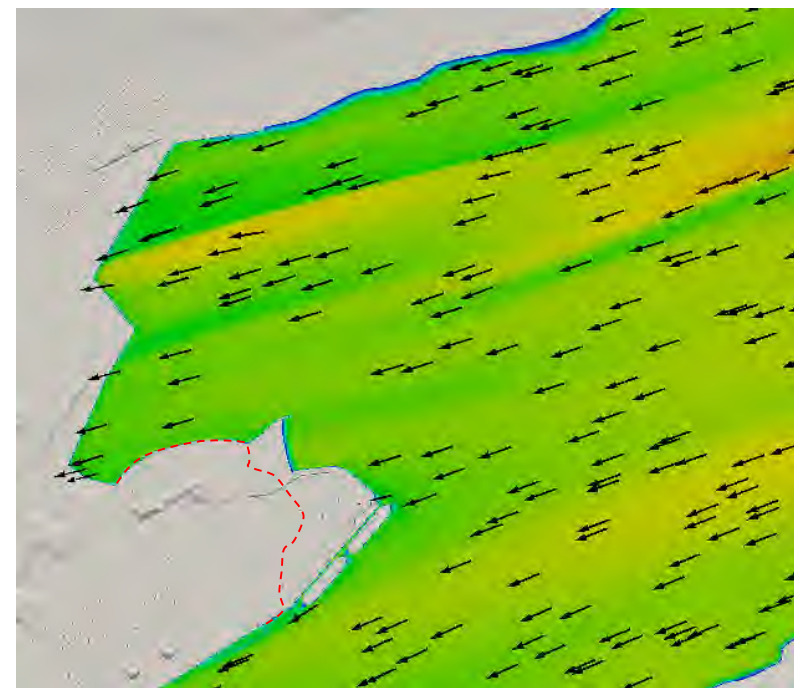


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

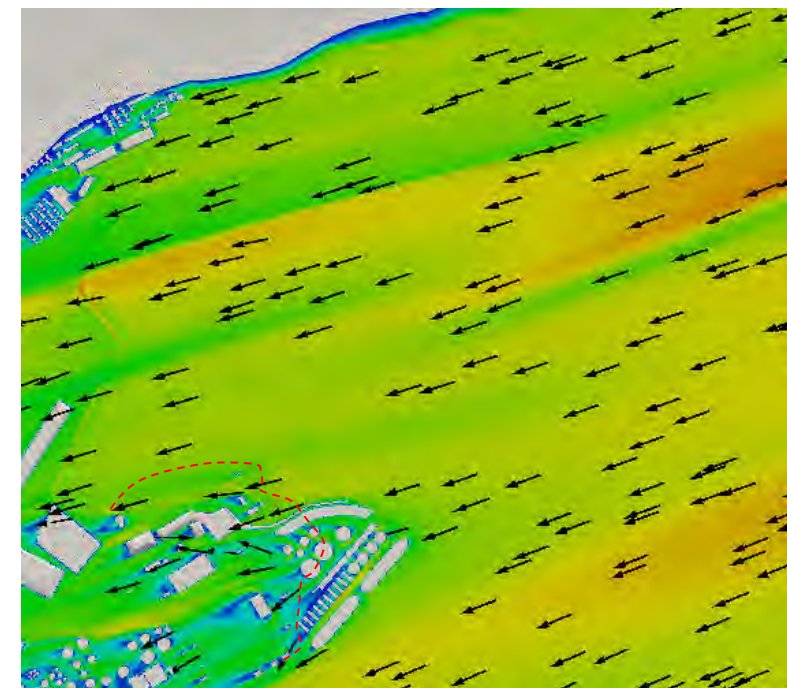
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :



PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

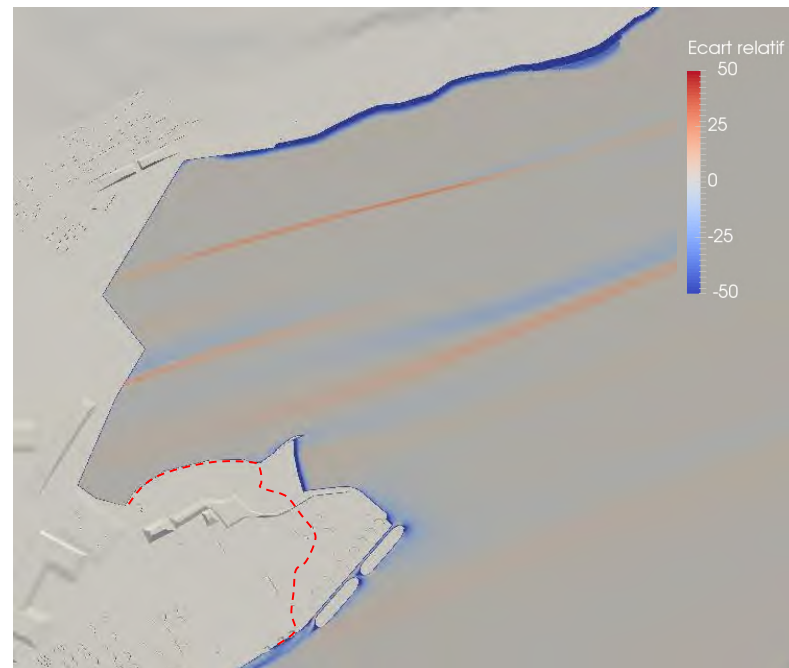
TITRE : Résultats par vent de secteur ENE –
Vitesses relatives – niveau BMIMM-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

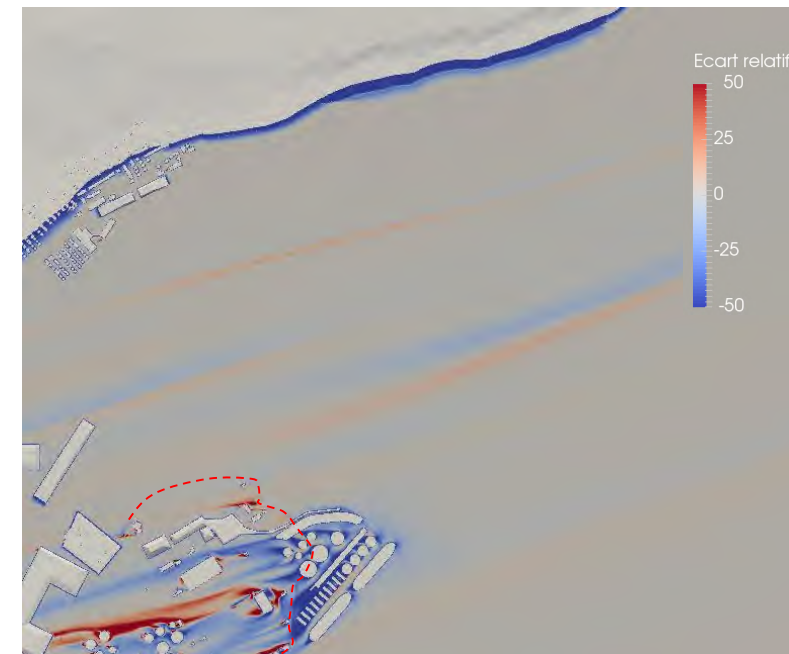
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 17
------------------------	----------------



a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



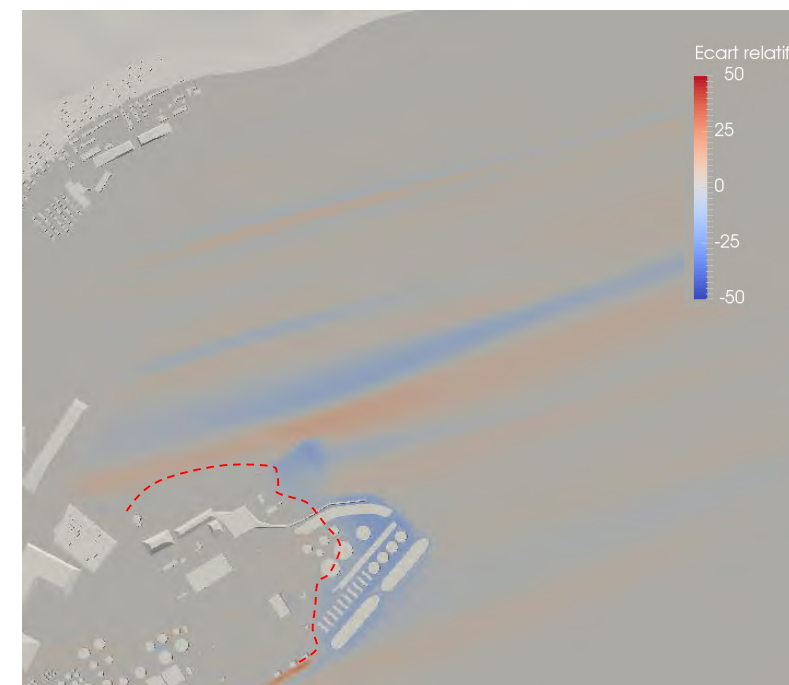
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

lasalle **nhc**

CLIENT :

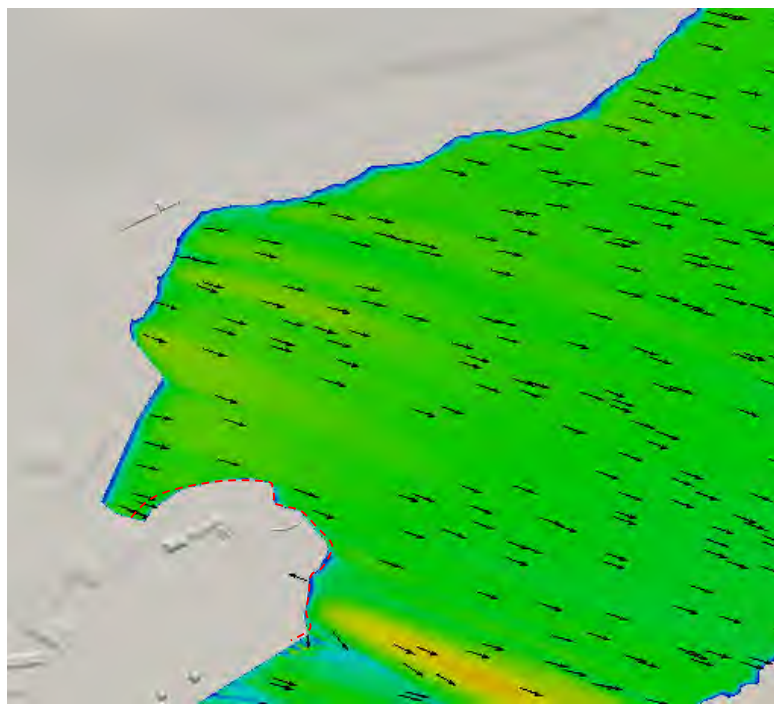


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

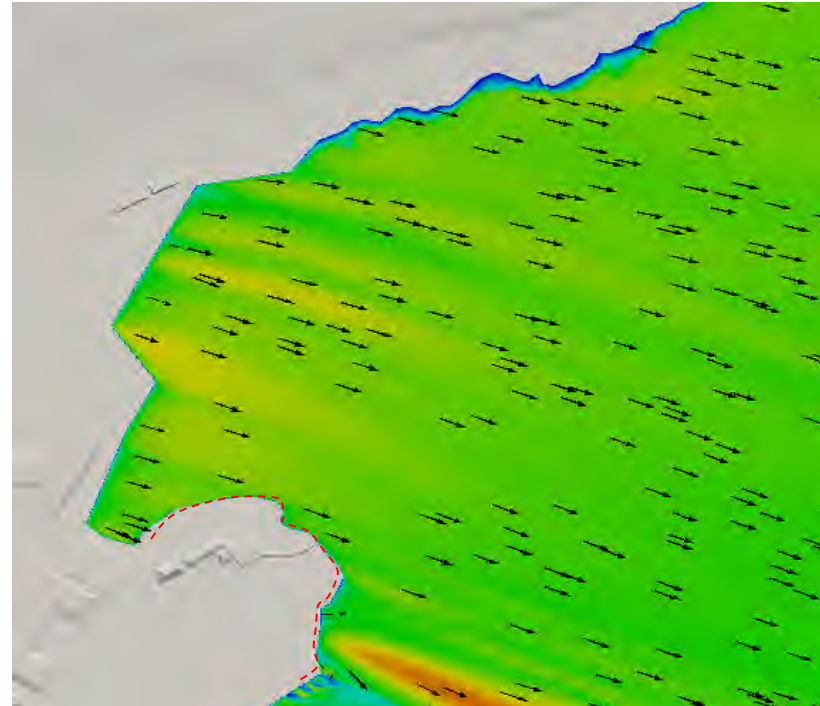
TITRE: Résultats par vent de secteur ENE
– Écarts relatifs– niveau BMIMM-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

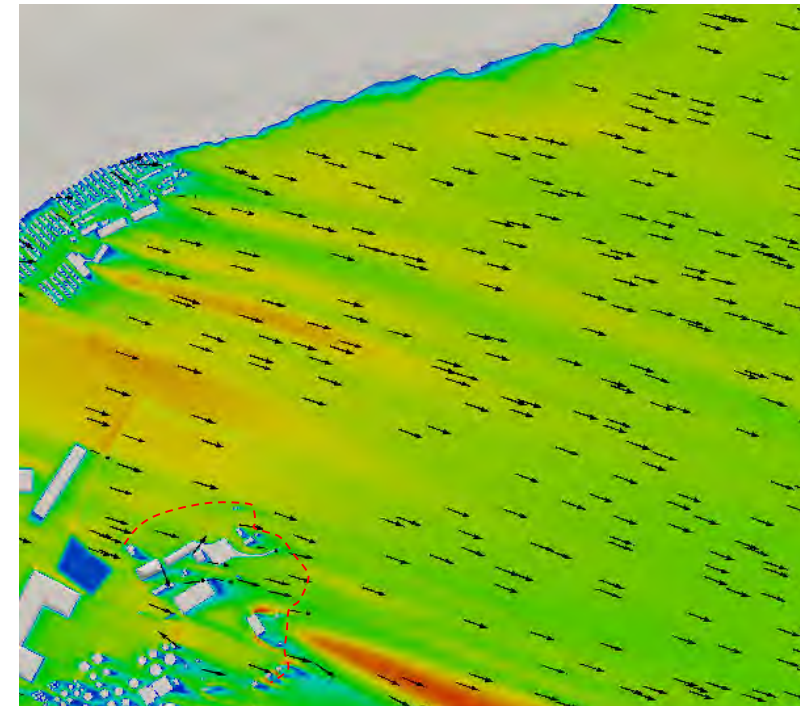
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 18
------------------------	-----------------------



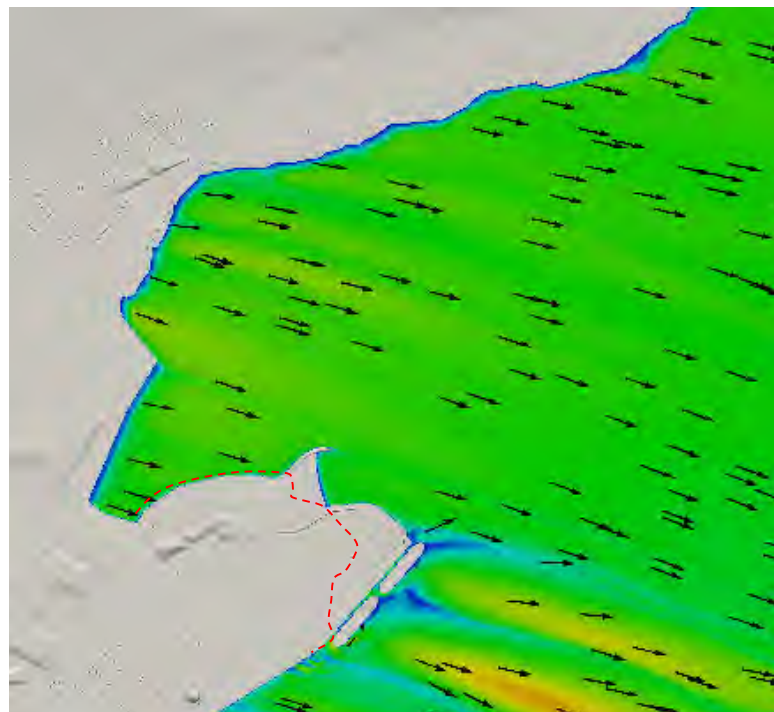
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



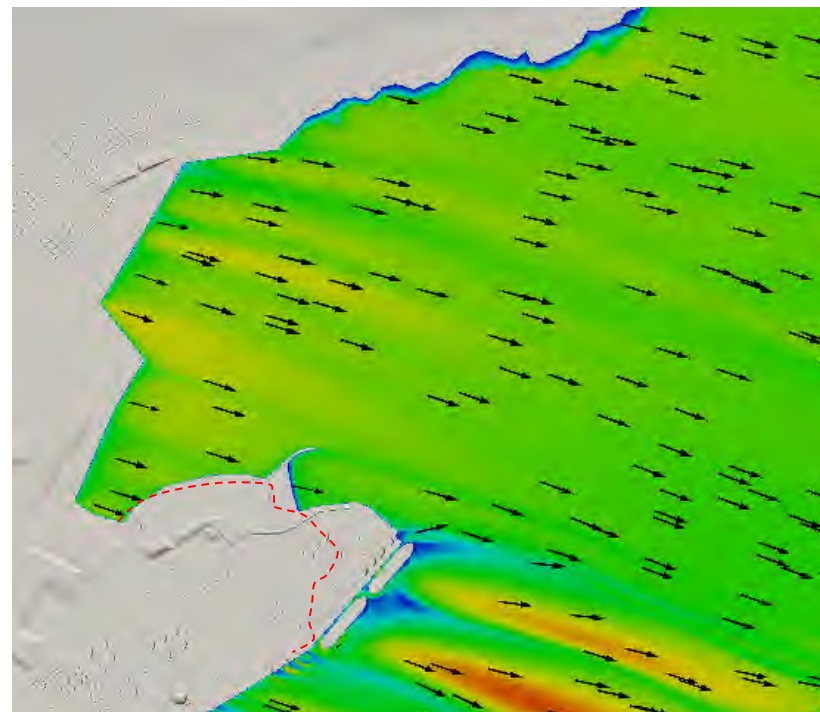
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



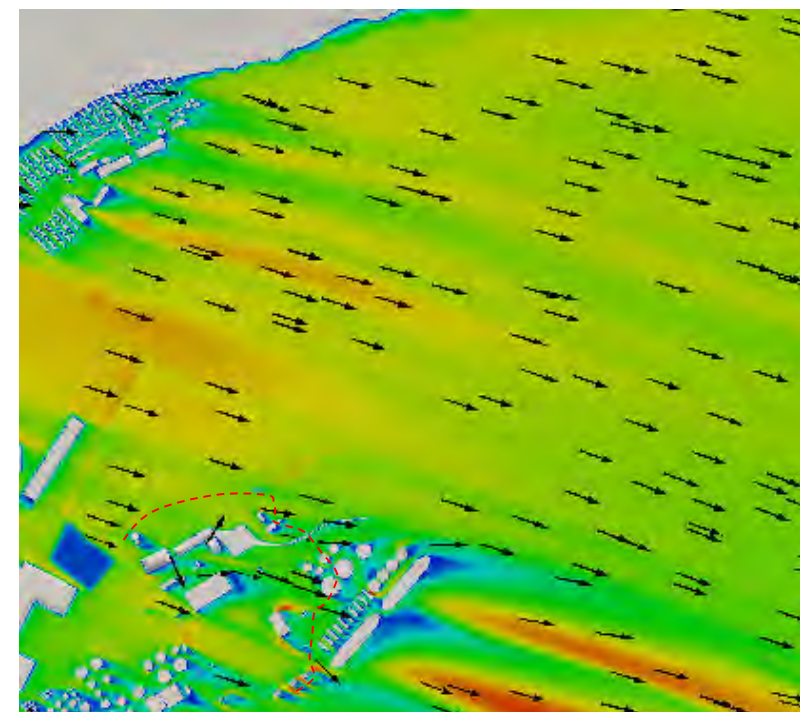
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



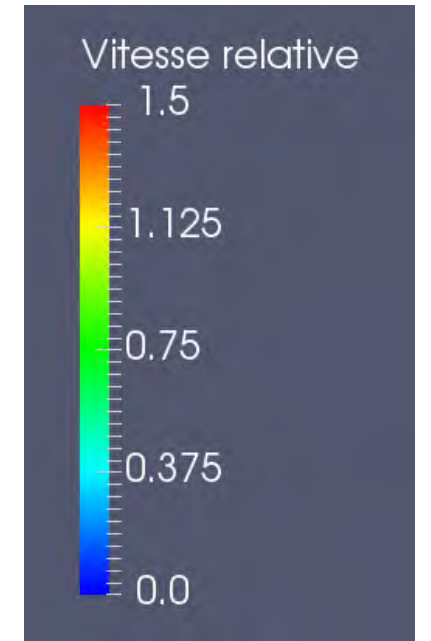
b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

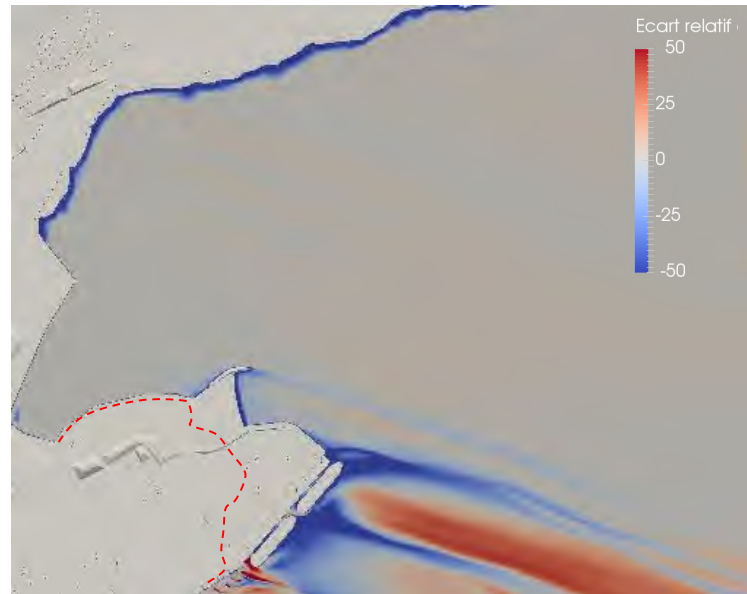


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

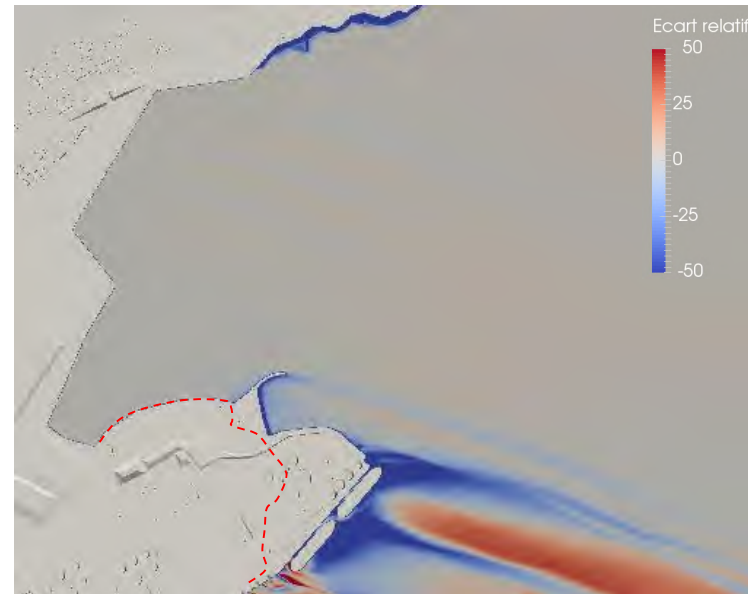
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Vitesses relatives – niveau moyen-
brise-lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

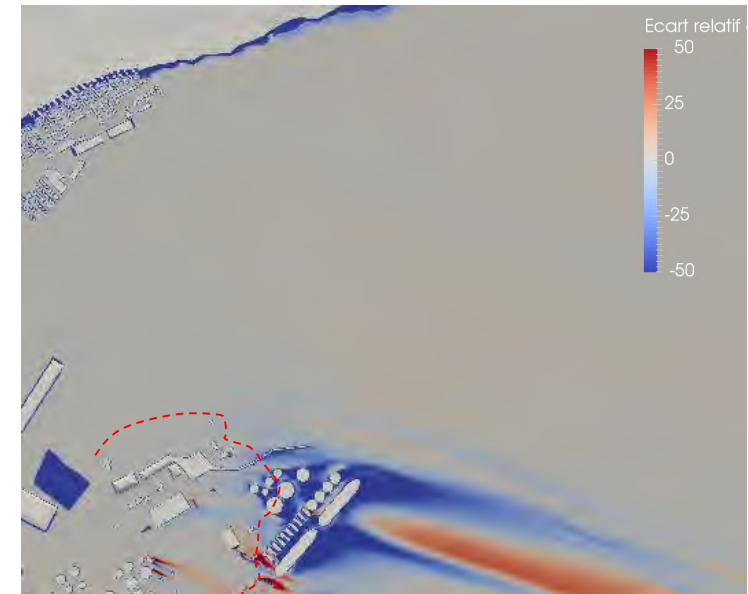
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 19
------------------------	-----------------------



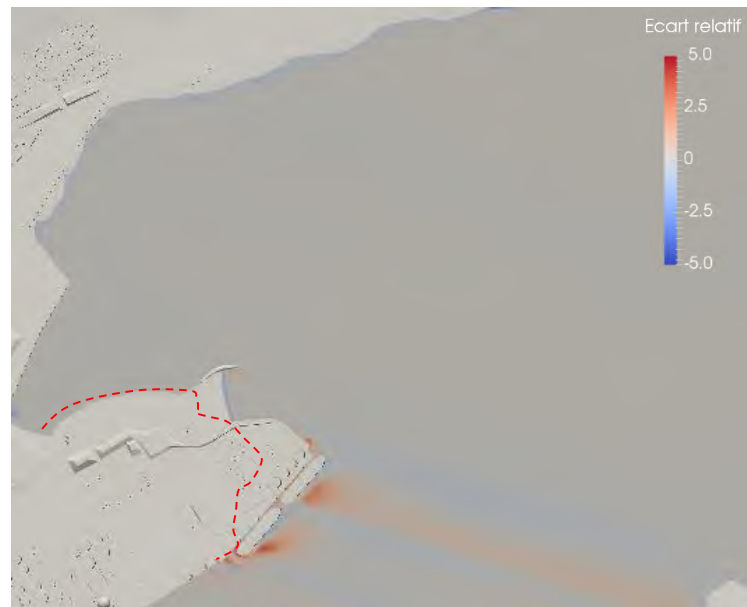
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



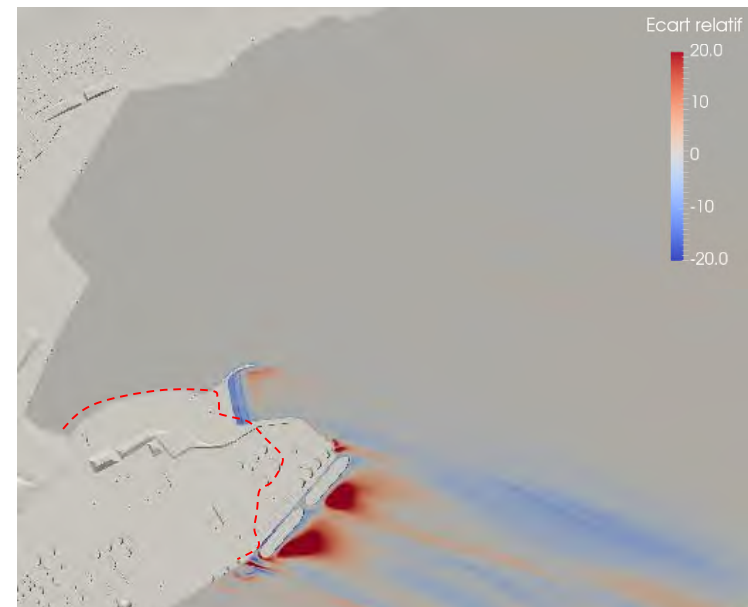
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



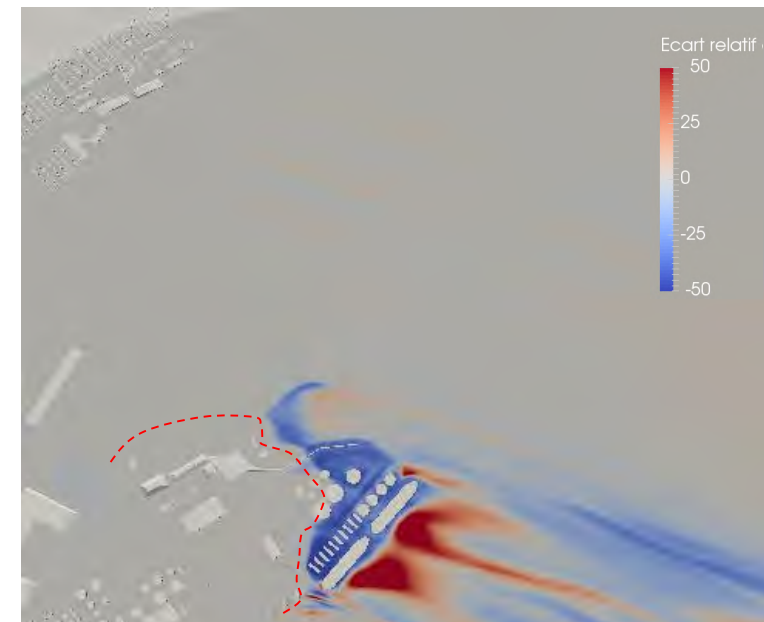
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

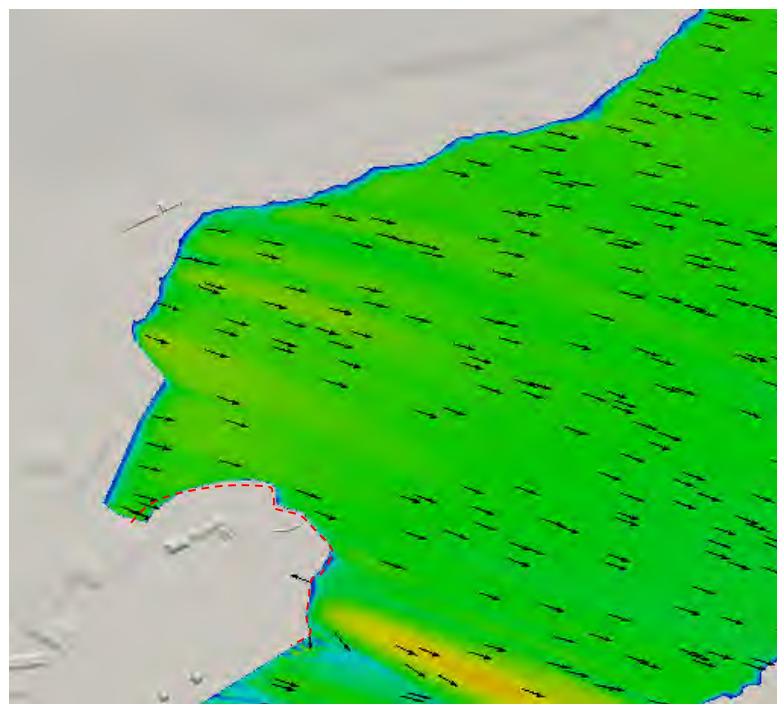


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

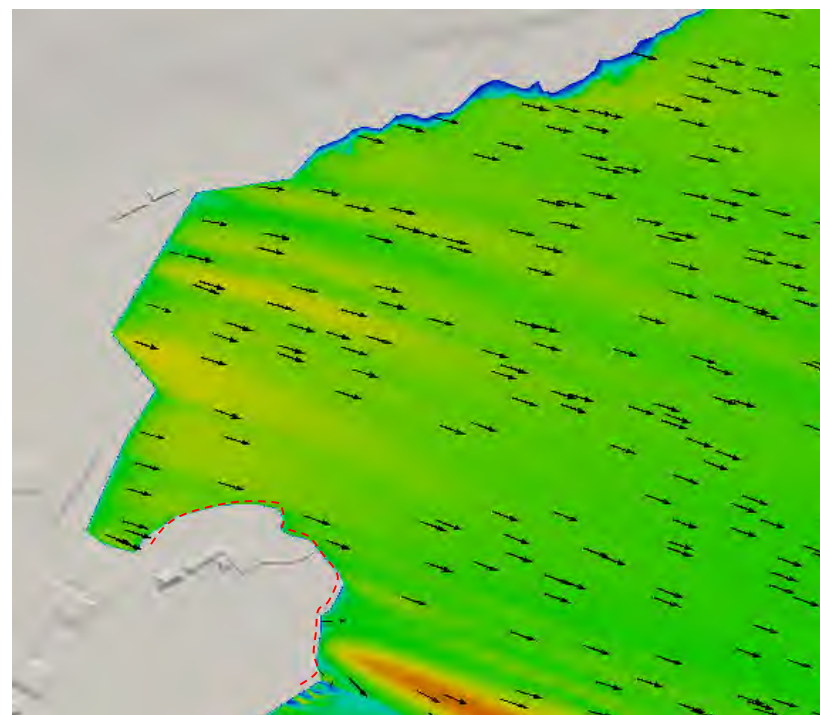
TITRE: Résultats par vent de secteur ONO –
Écarts relatifs– niveau moyen- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

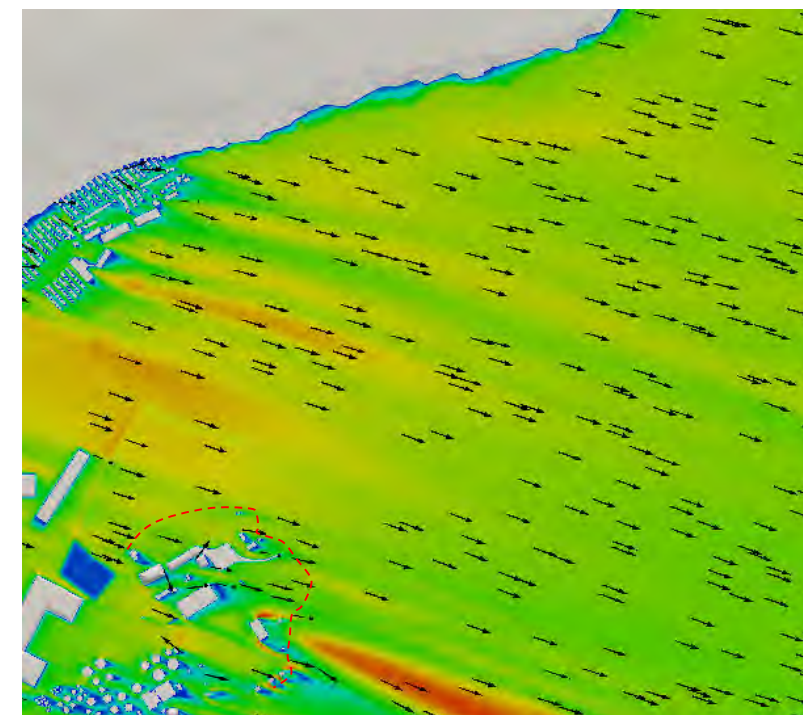
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 20
------------------------	-----------------------



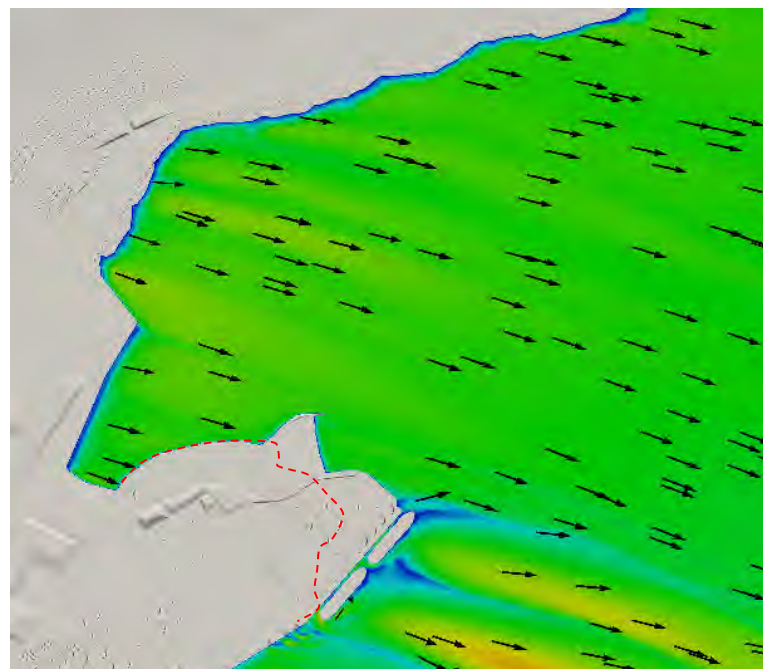
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



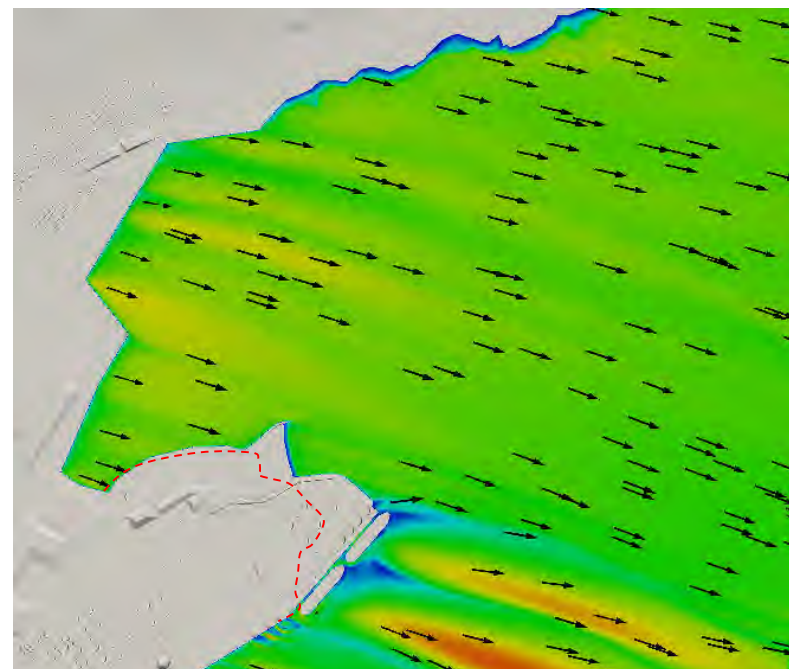
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



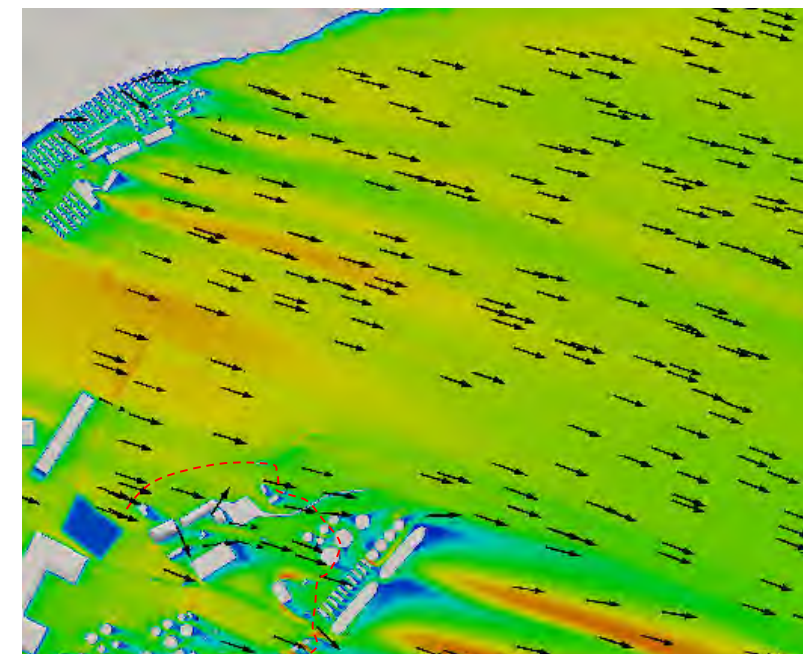
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



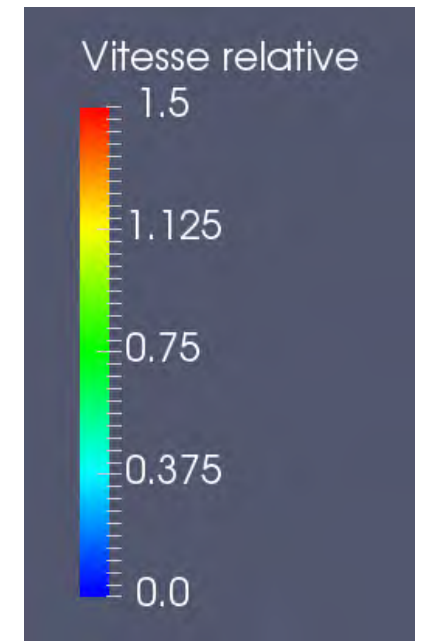
b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

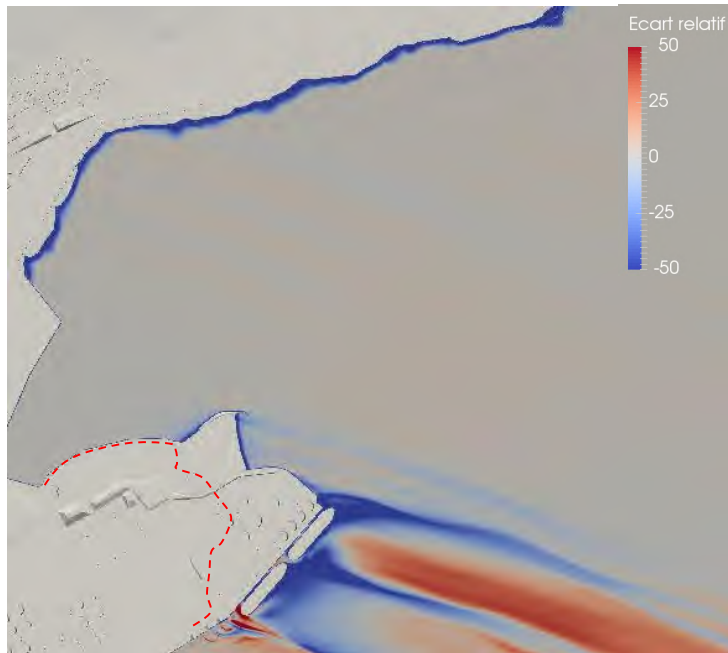


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

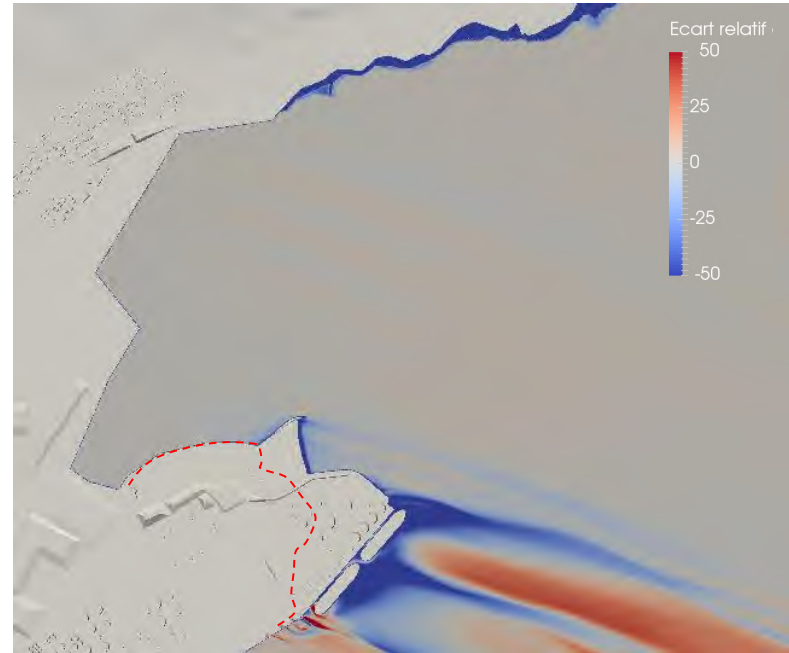
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Vitesses relatives – niveau moyen-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

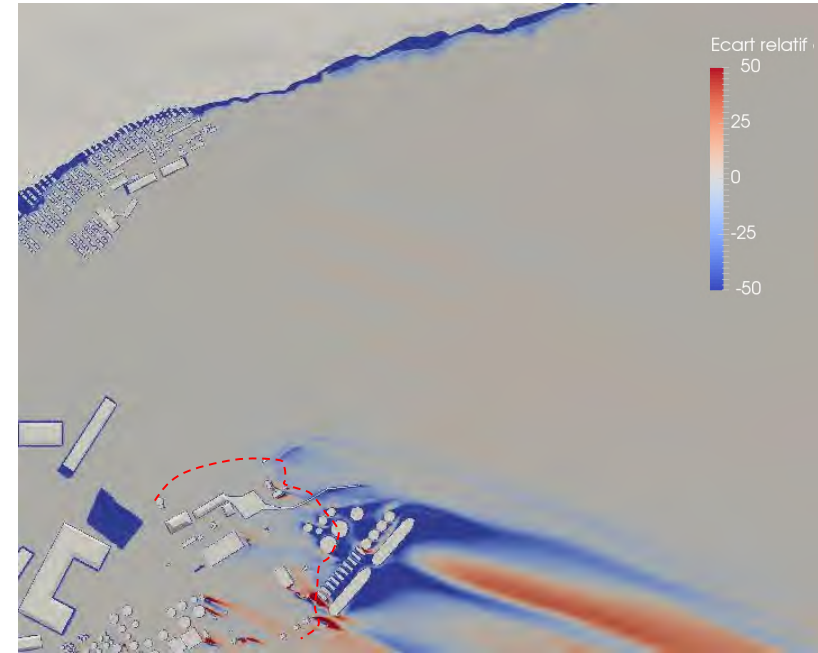
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 21
------------------------	-----------------------



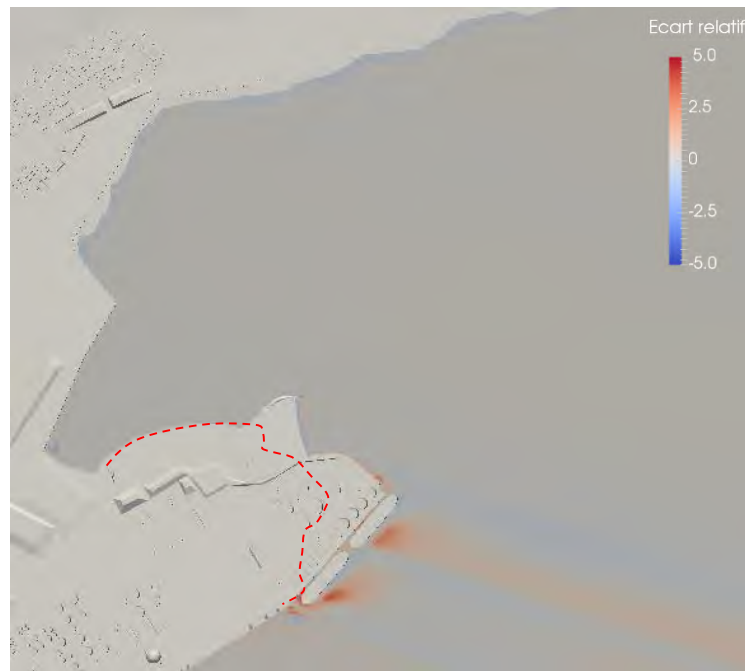
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



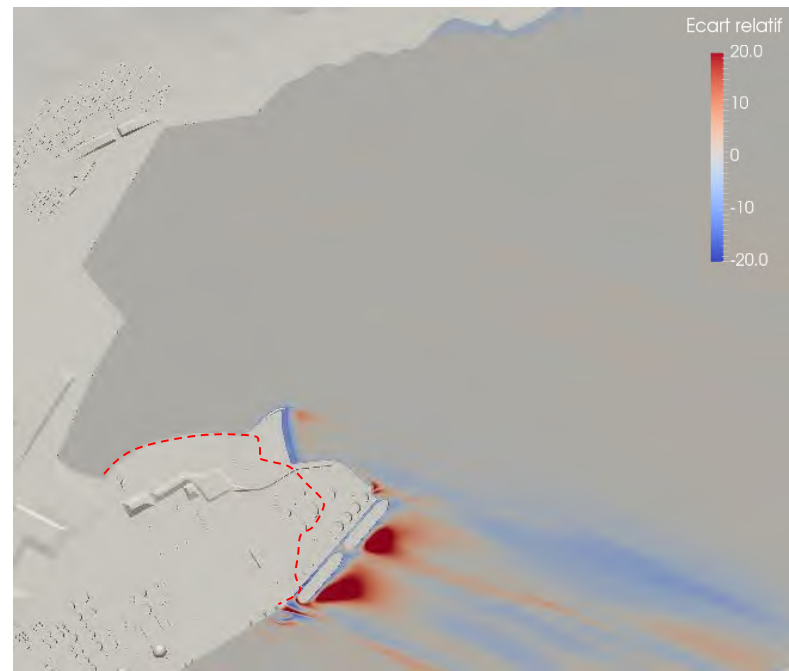
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



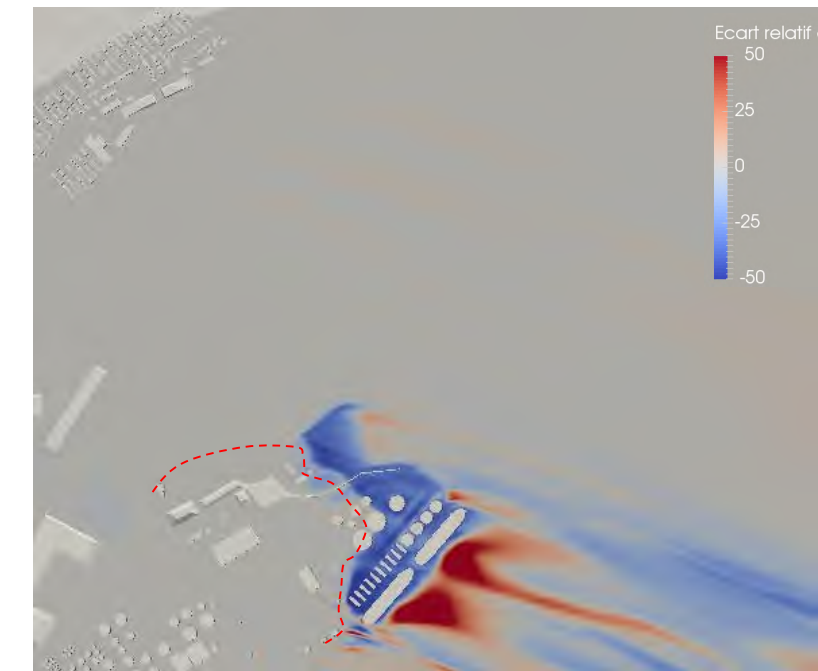
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

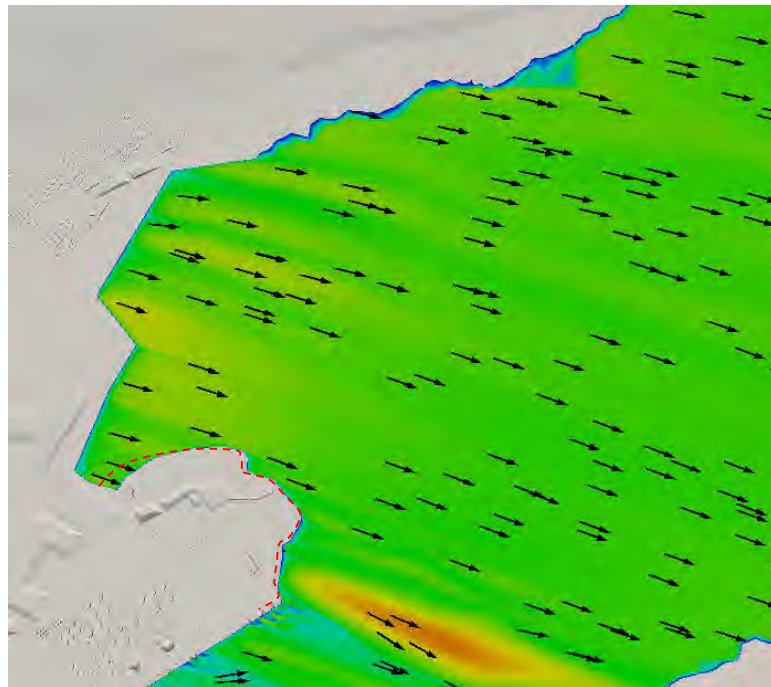


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

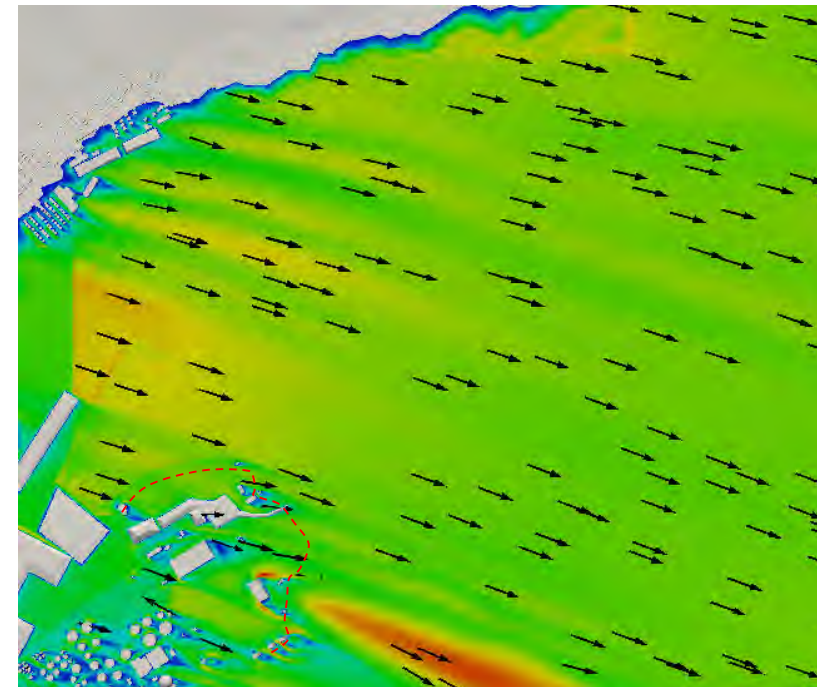
TITRE: Résultats par vent de secteur ONO –
Écarts relatifs– niveau moyen- brise-
lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

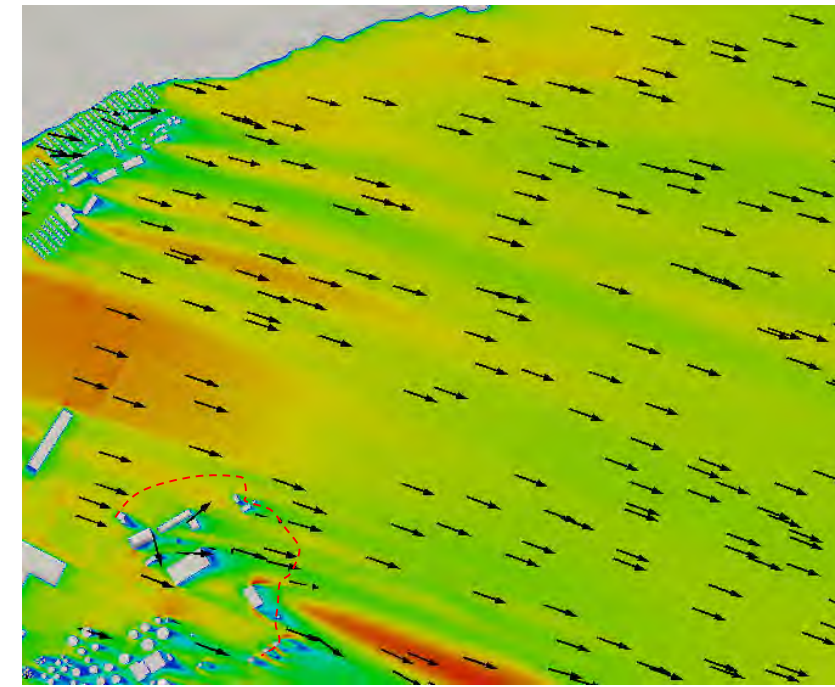
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 22
------------------------	-----------------------



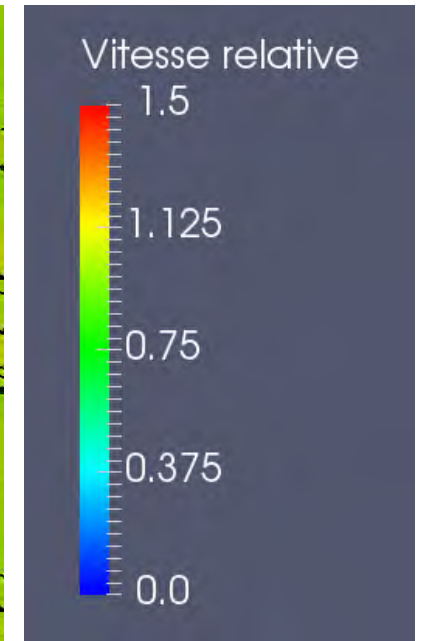
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

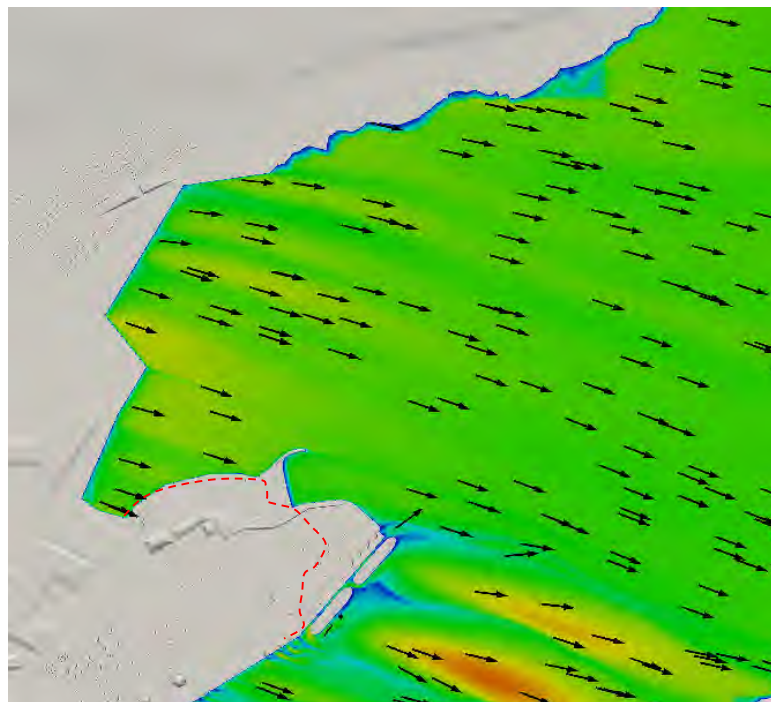


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

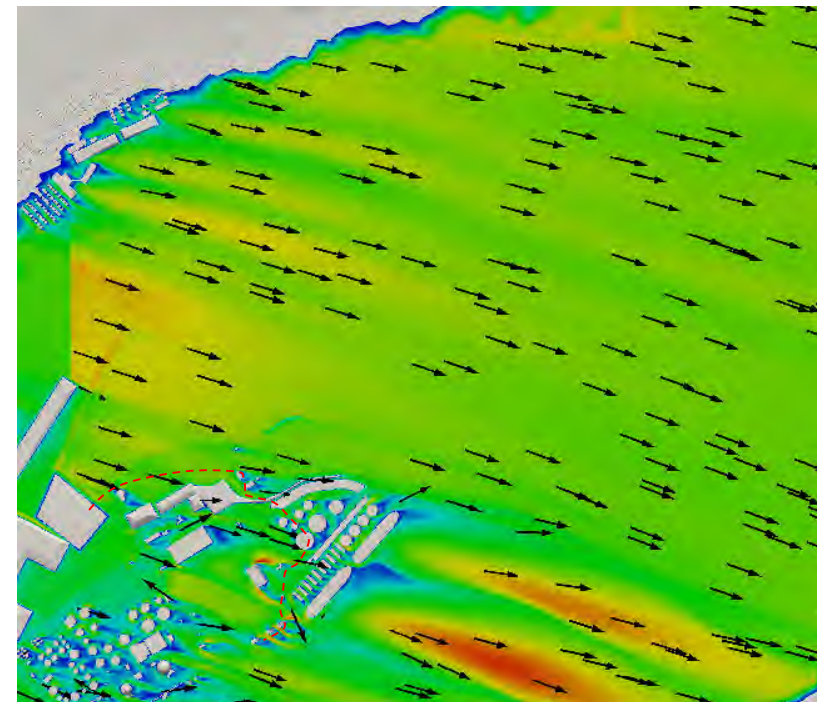


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

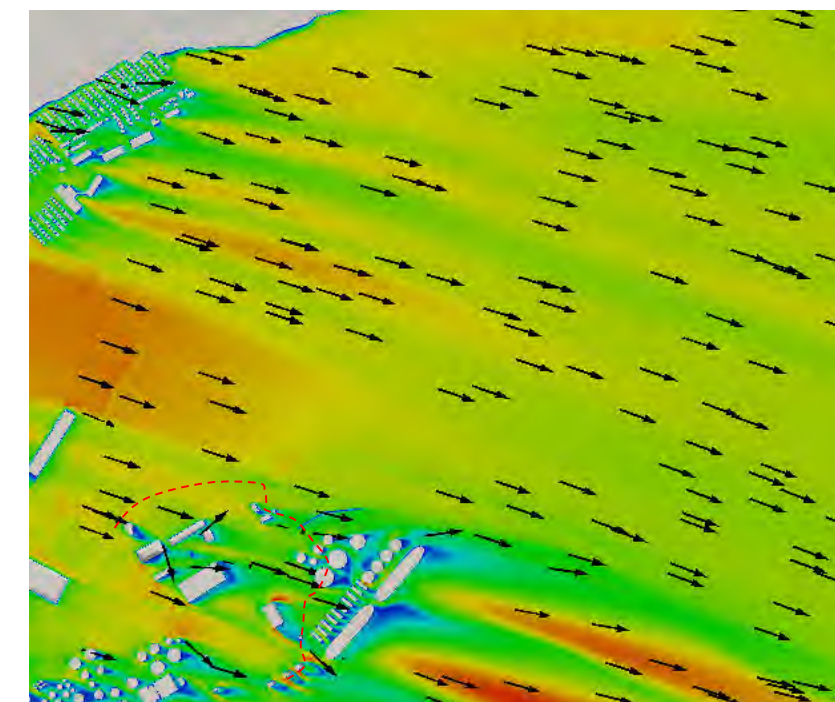
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

--- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

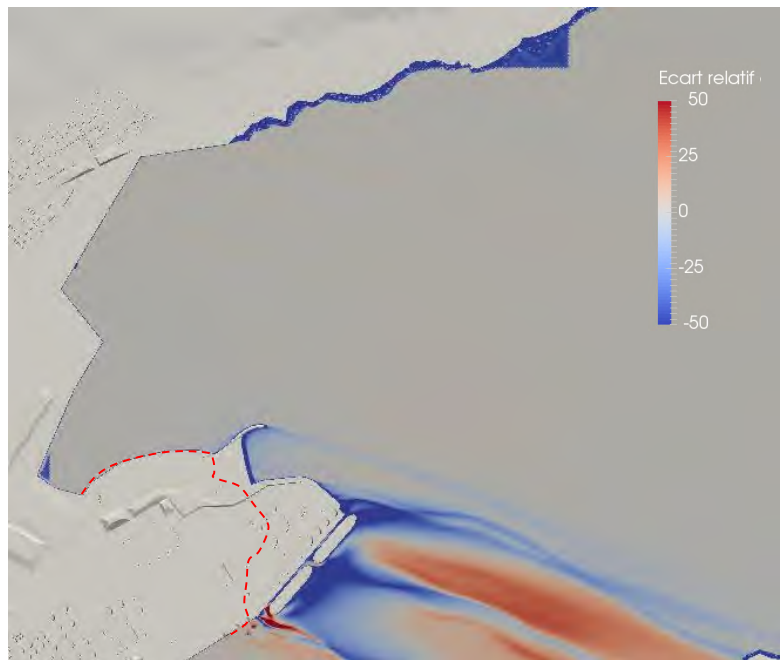


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

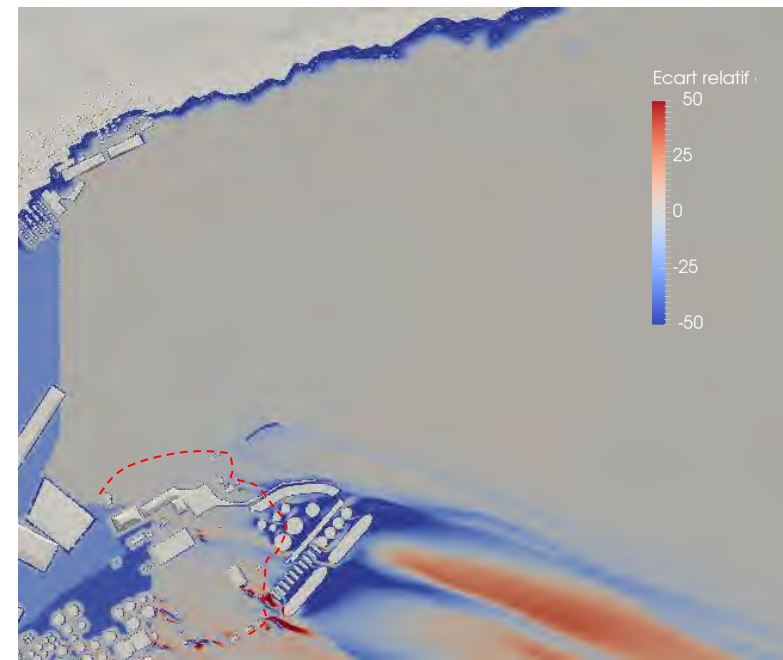
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Vitesses relatives – niveau PMSMM-
brise-lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

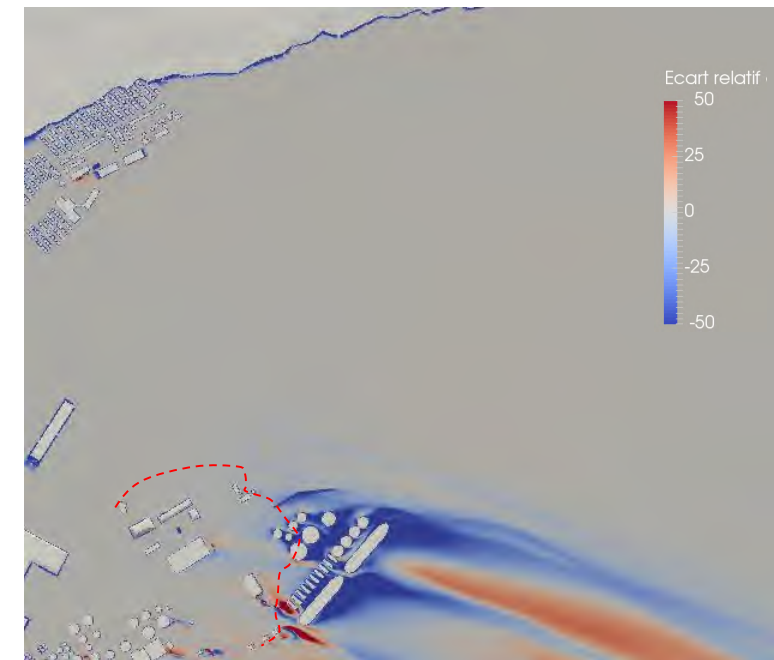
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 23
------------------------	-----------------------



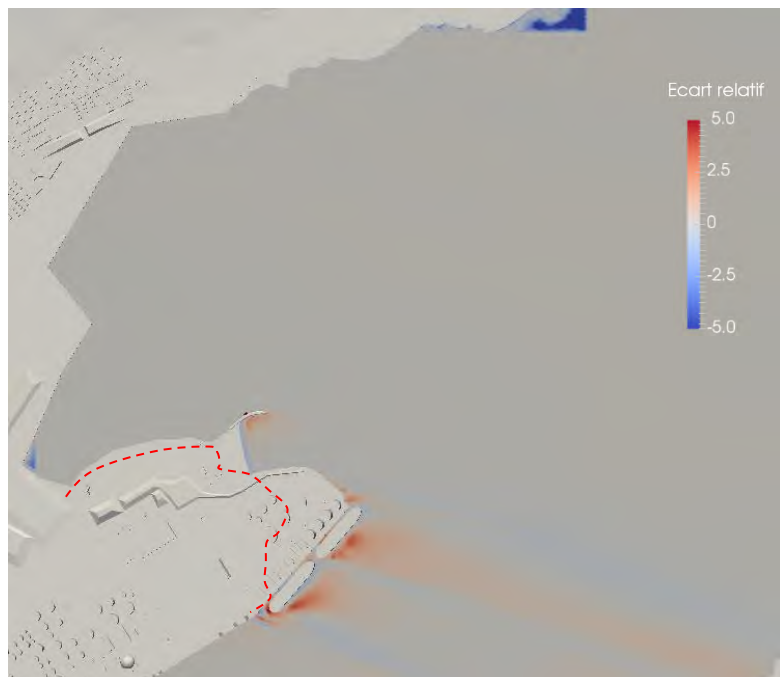
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



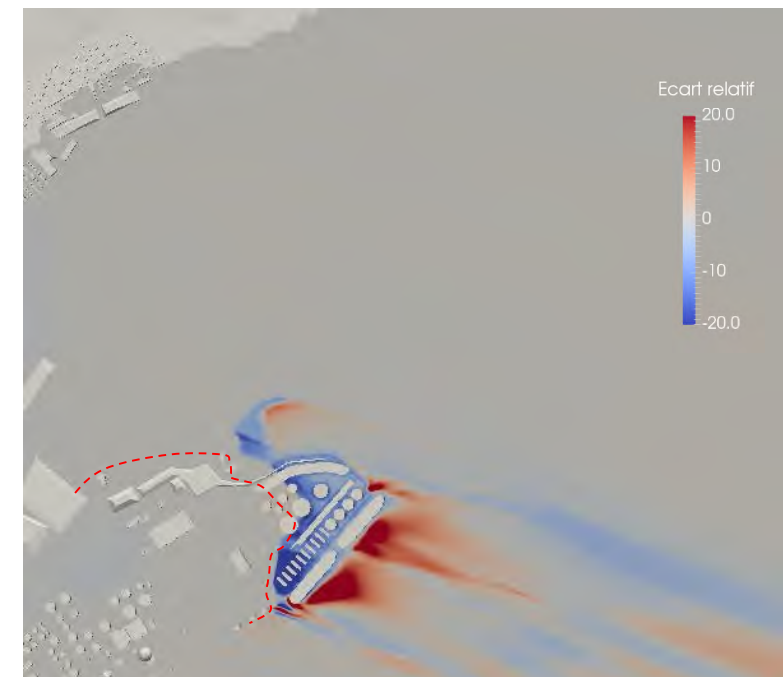
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



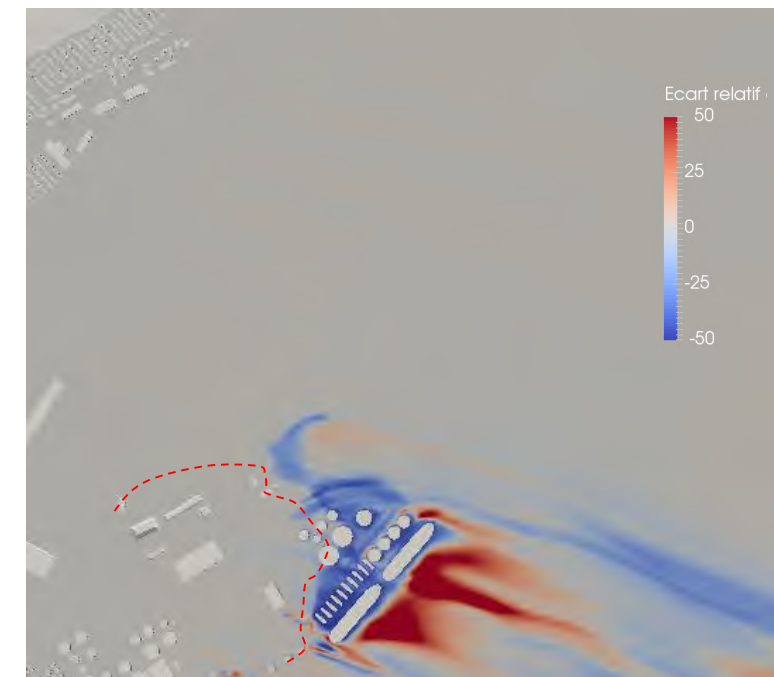
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

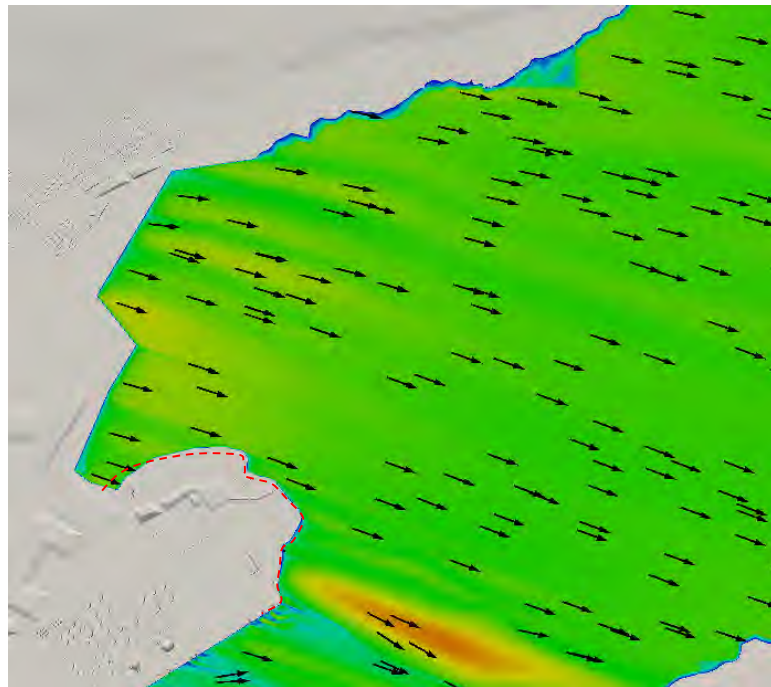


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

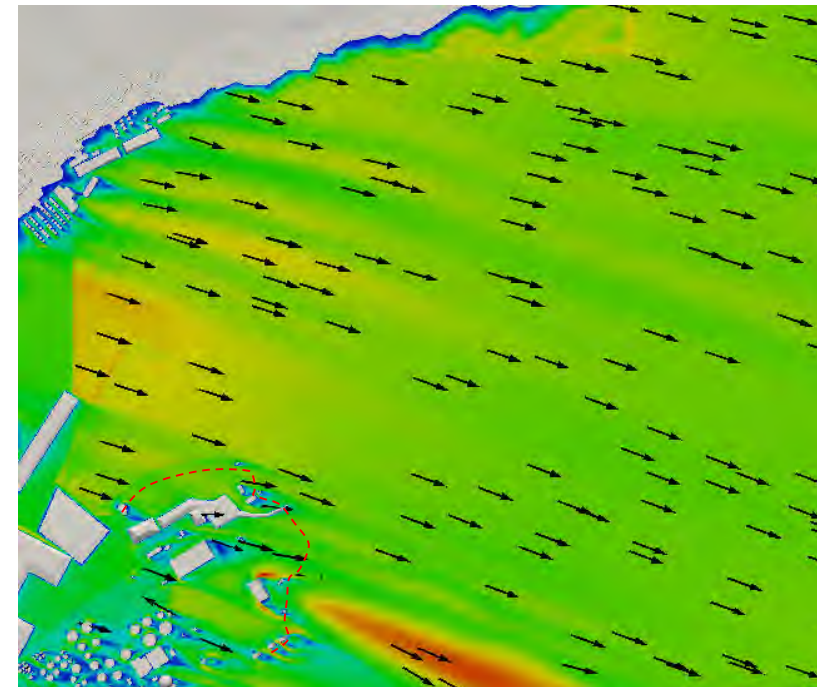
TITRE: Résultats par vent de secteur ONO –
Écarts relatifs– niveau PMSMM- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

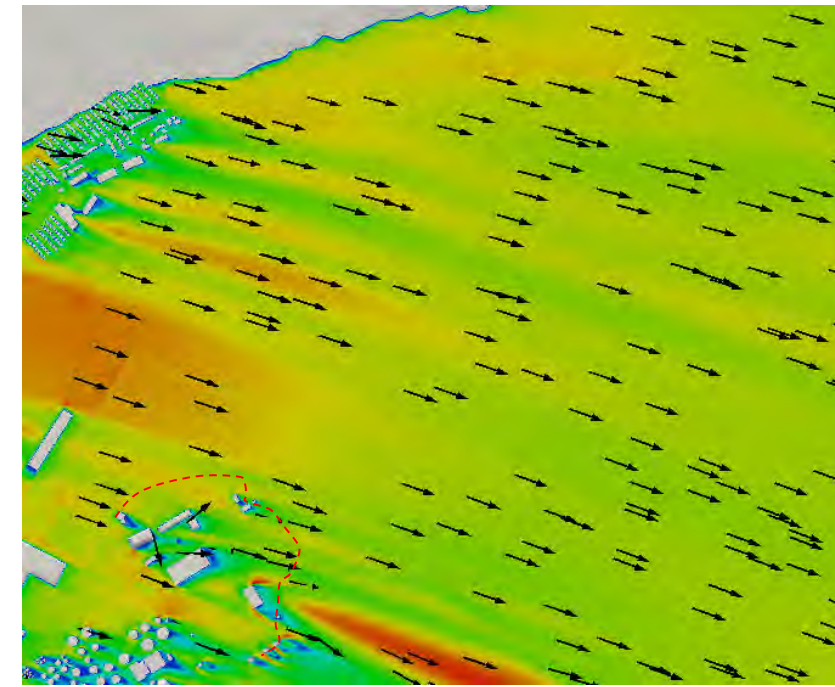
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 24
------------------------	-----------------------



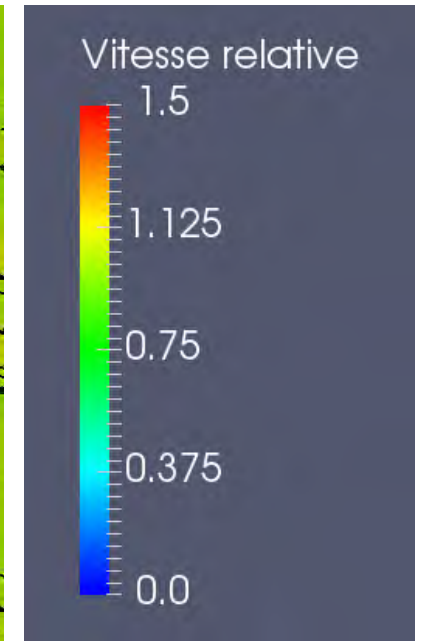
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

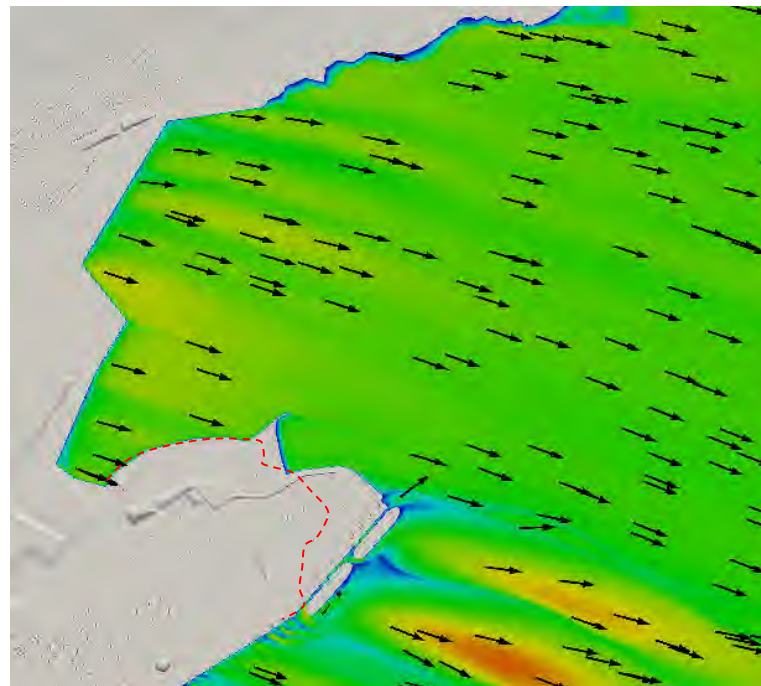


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

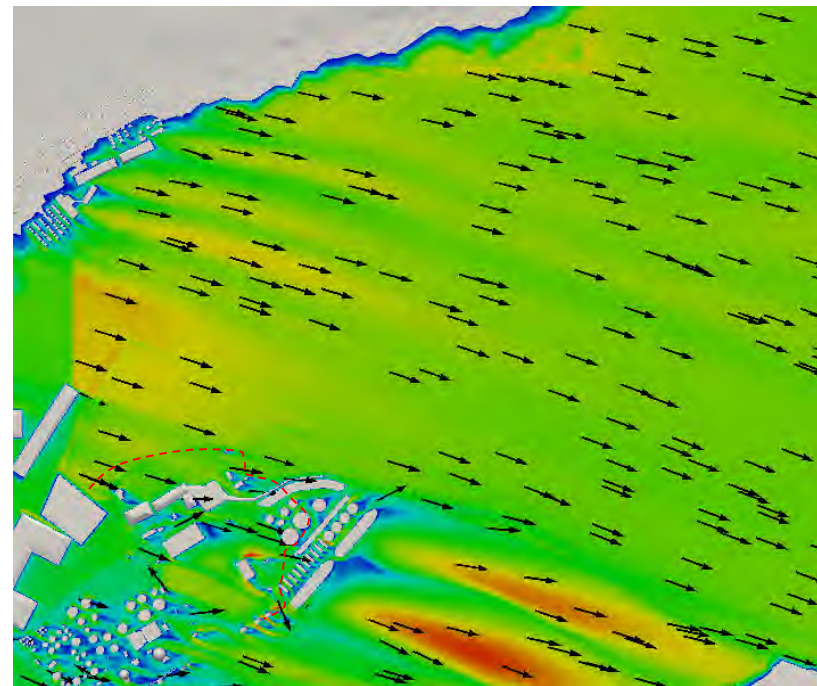


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

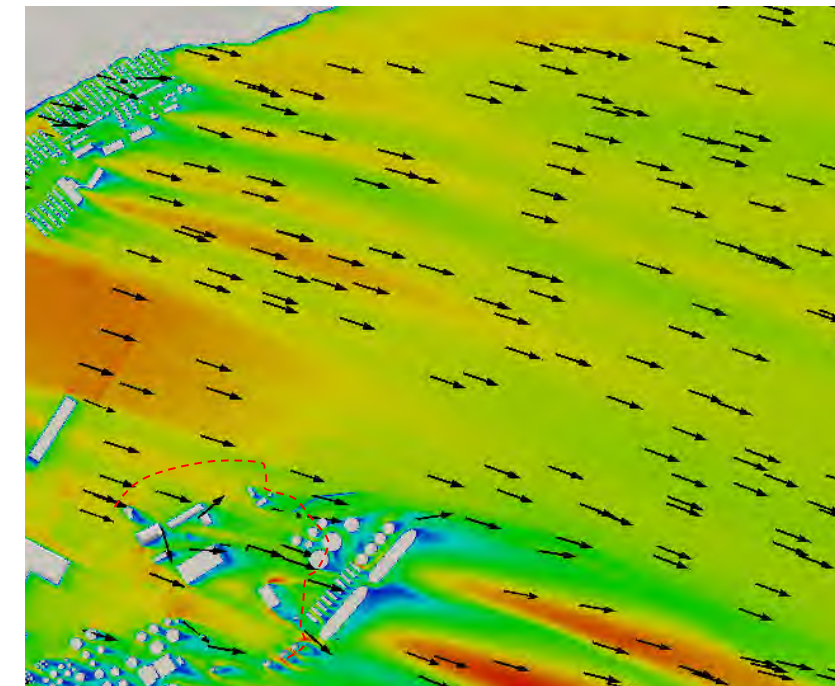
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

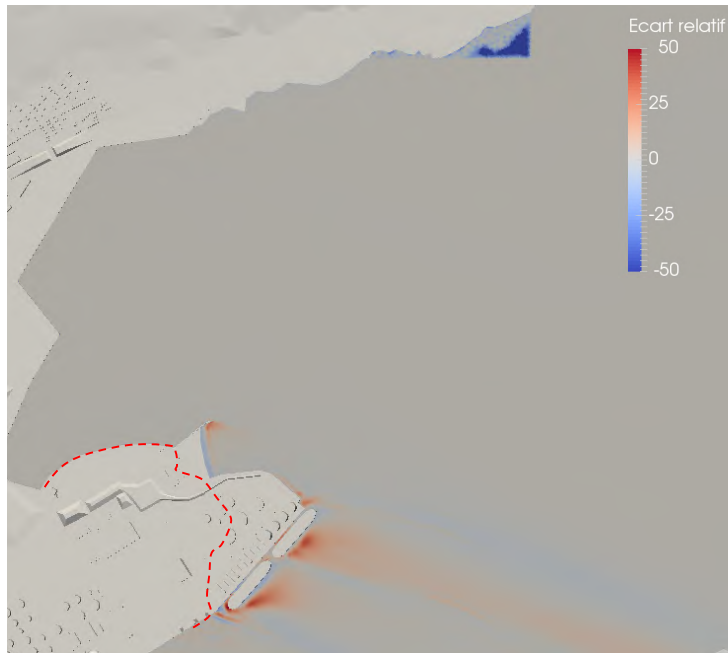
PORT
QUÉBEC

PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

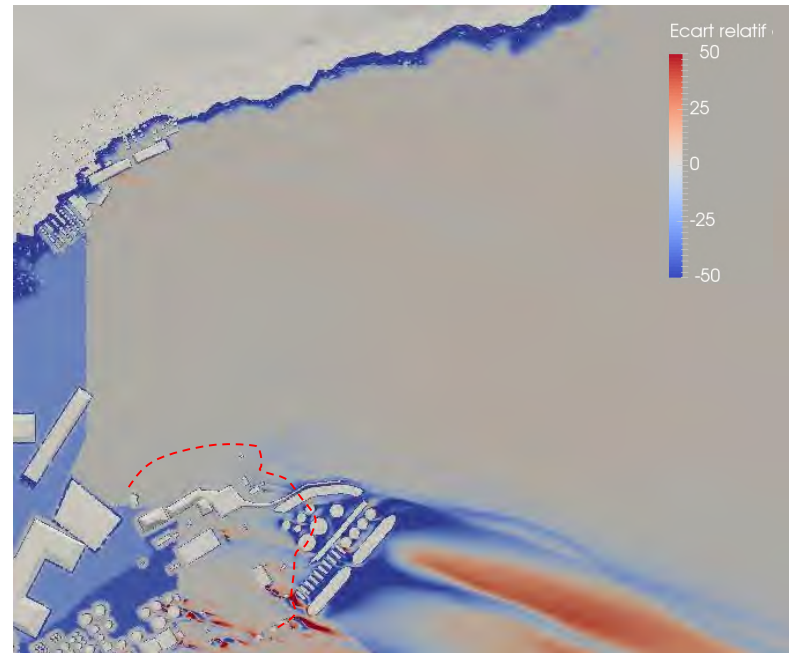
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Vitesses relatives – niveau PMSMM-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

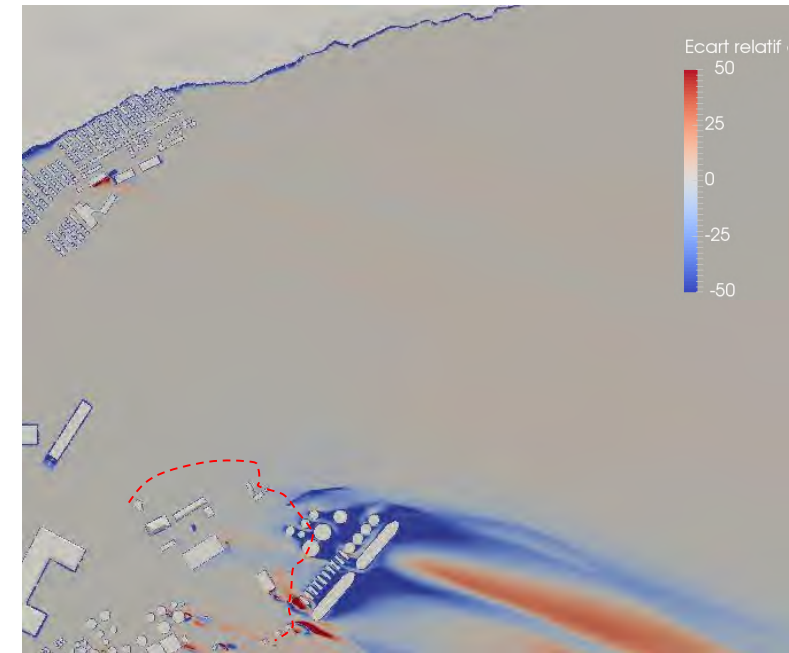
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 25
------------------------	-----------------------



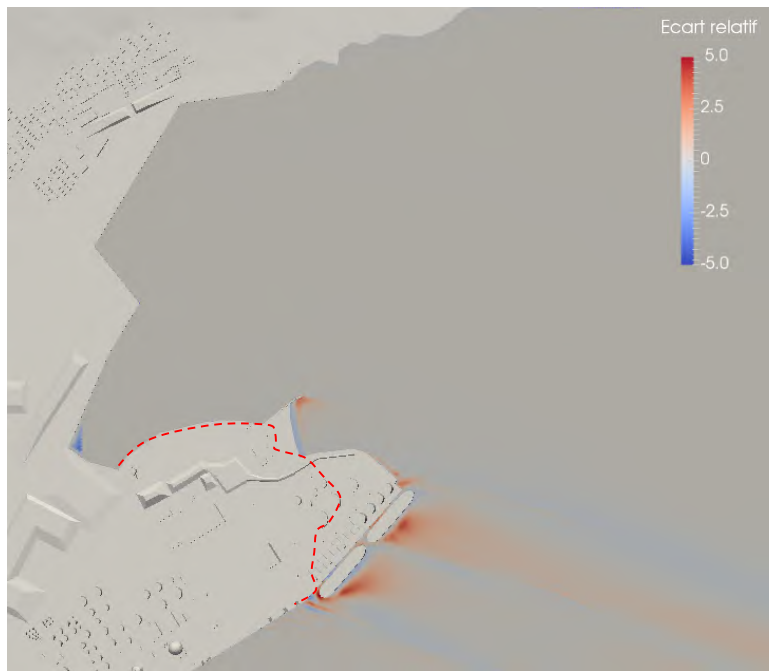
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



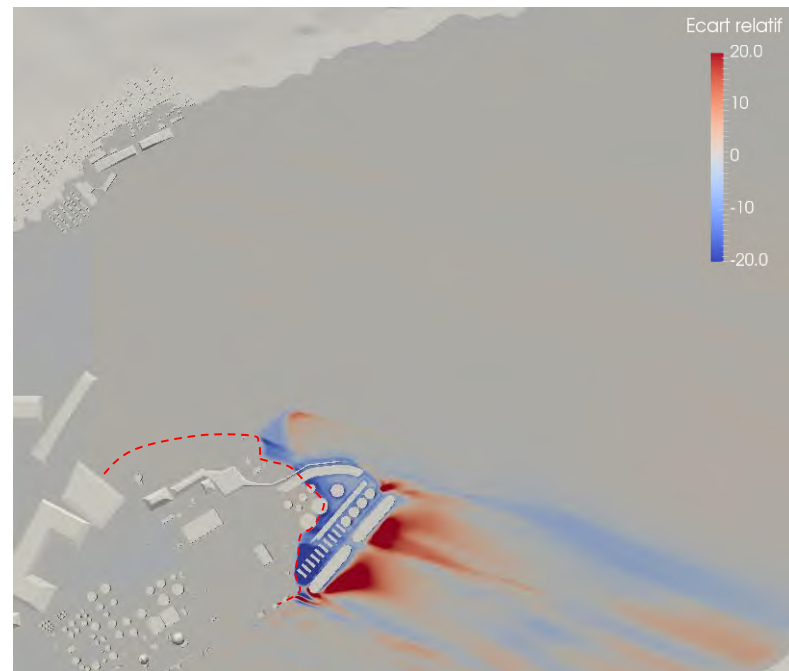
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



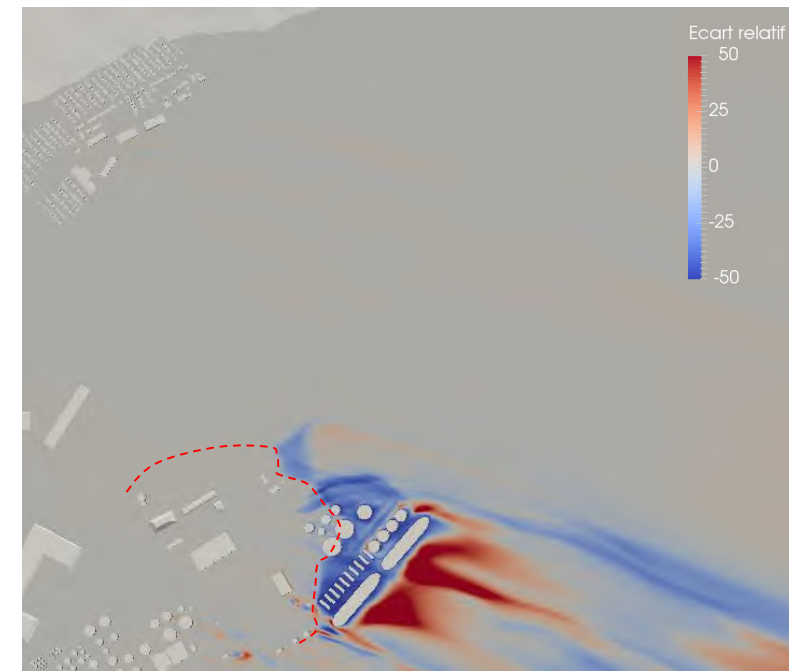
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

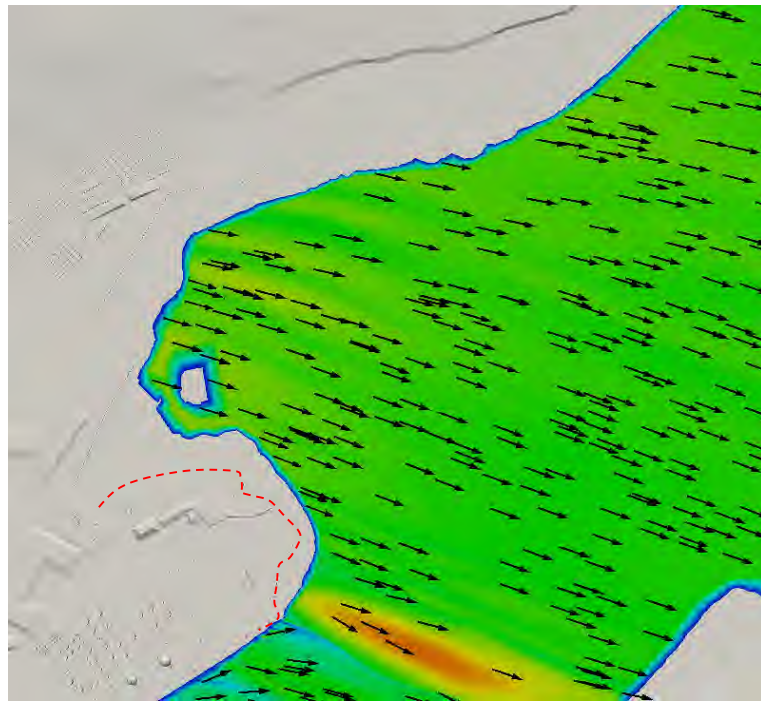


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

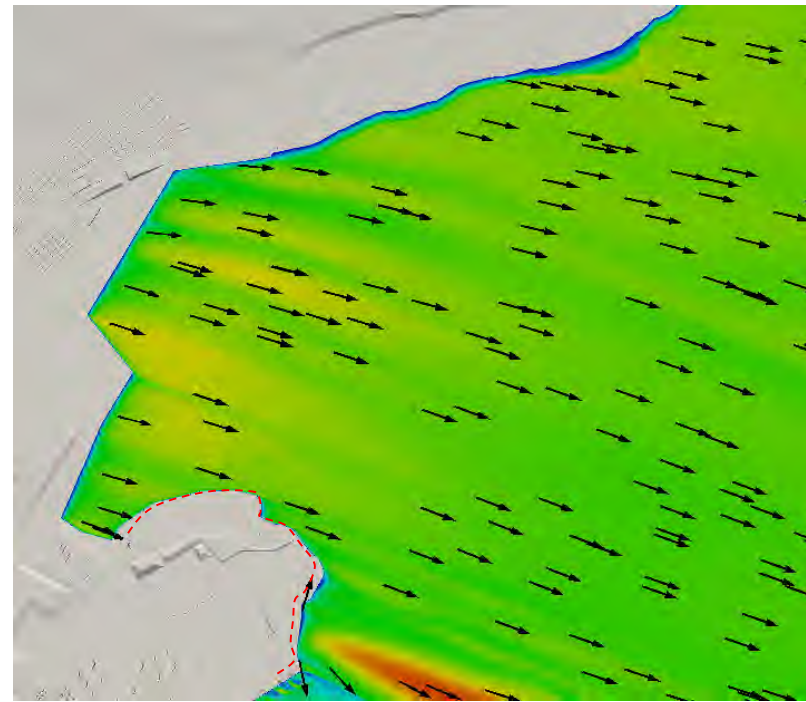
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Écarts relatifs– niveau PMSMM- brise-
lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

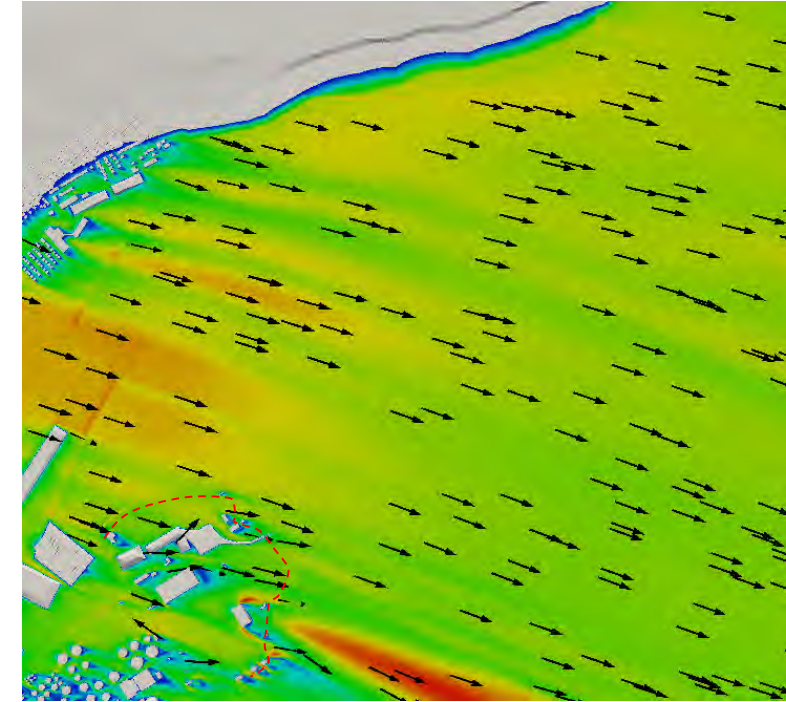
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 26
------------------------	-----------------------



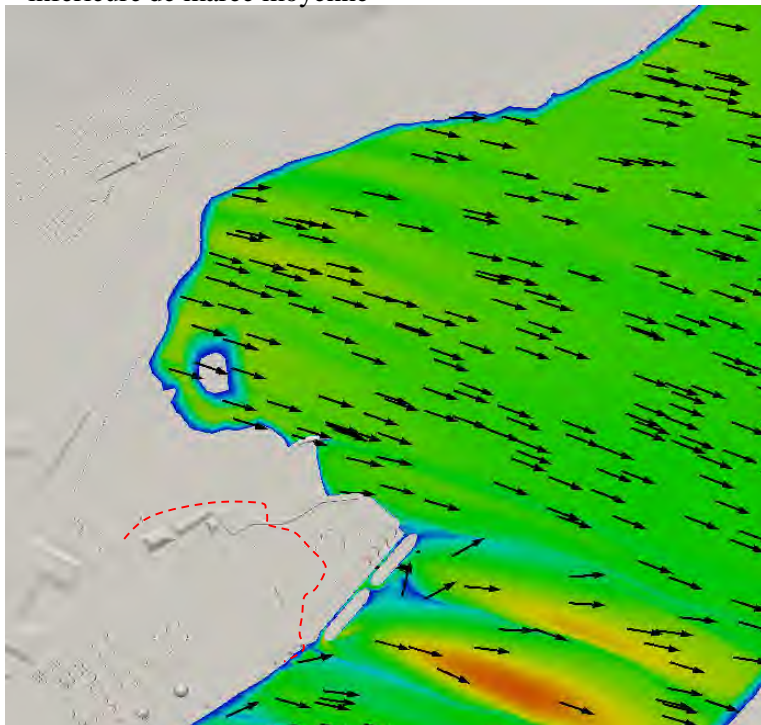
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



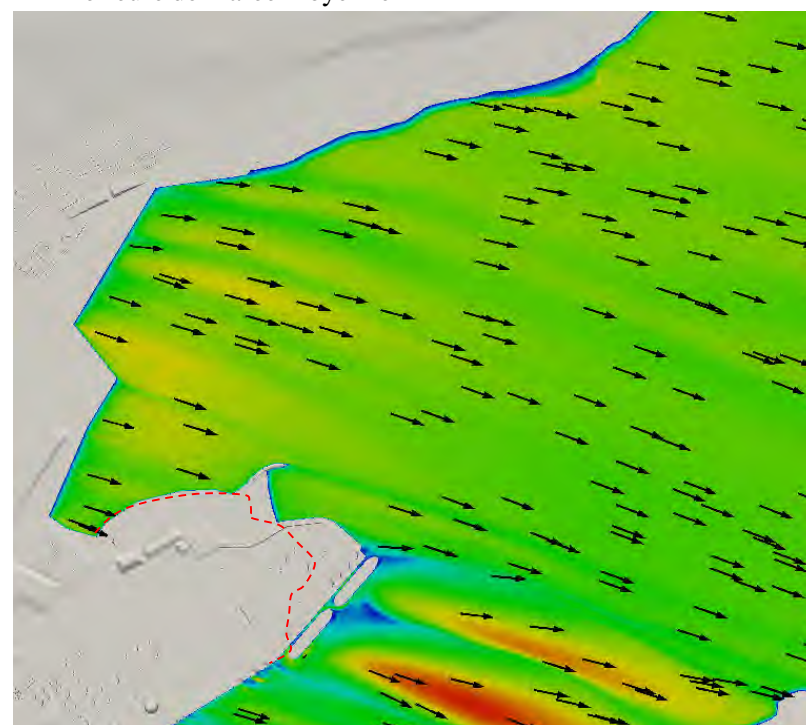
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



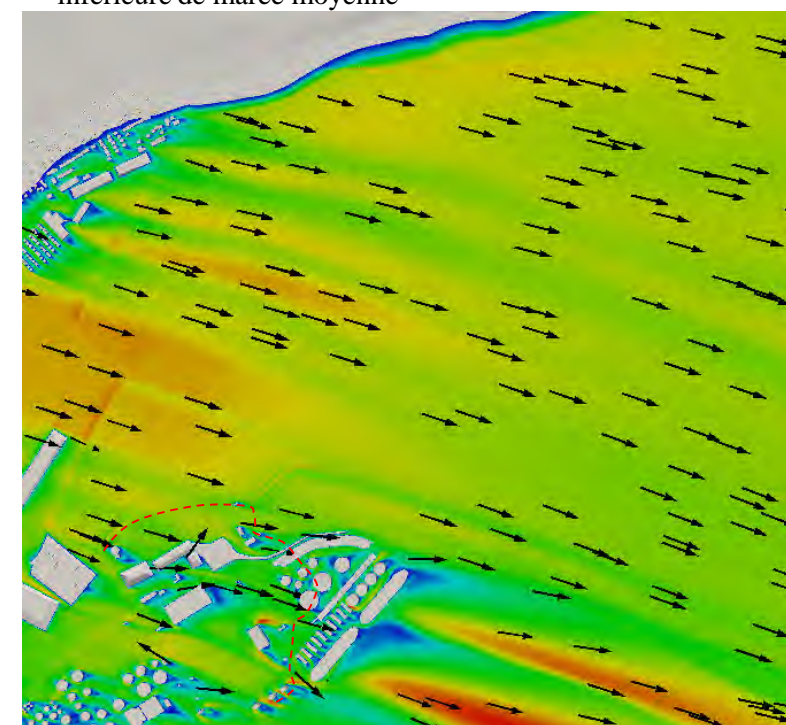
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



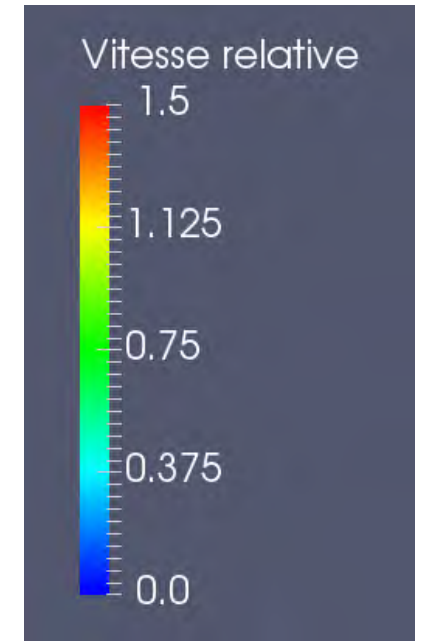
b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

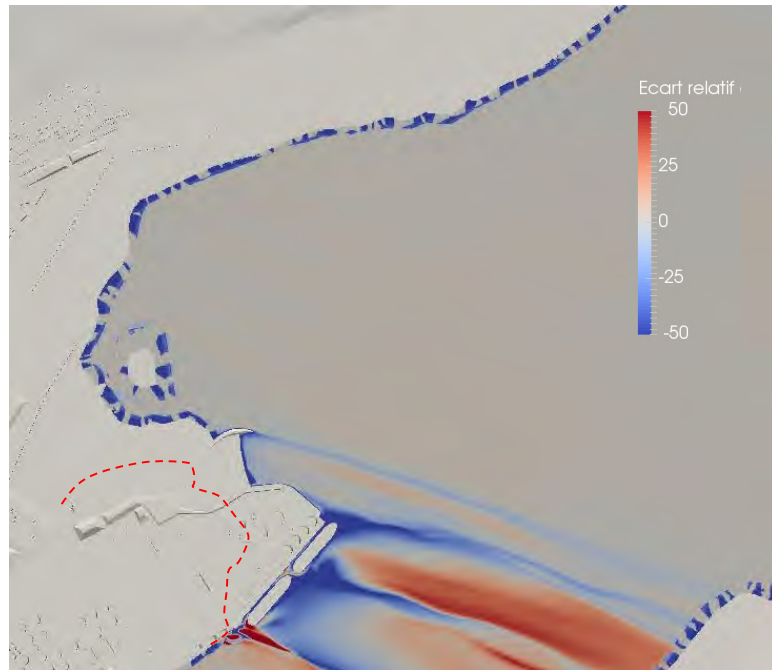


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

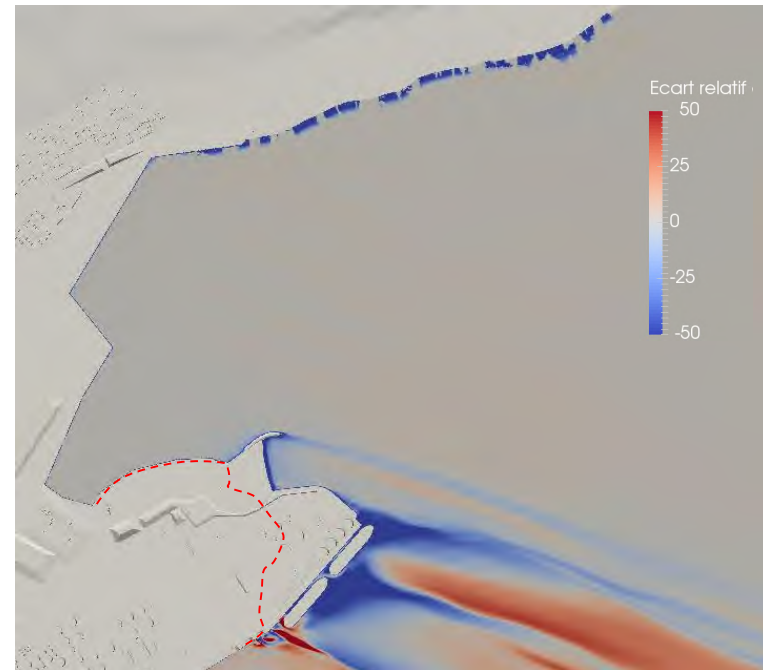
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Vitesses relatives – niveau BMIMM-
brise-lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

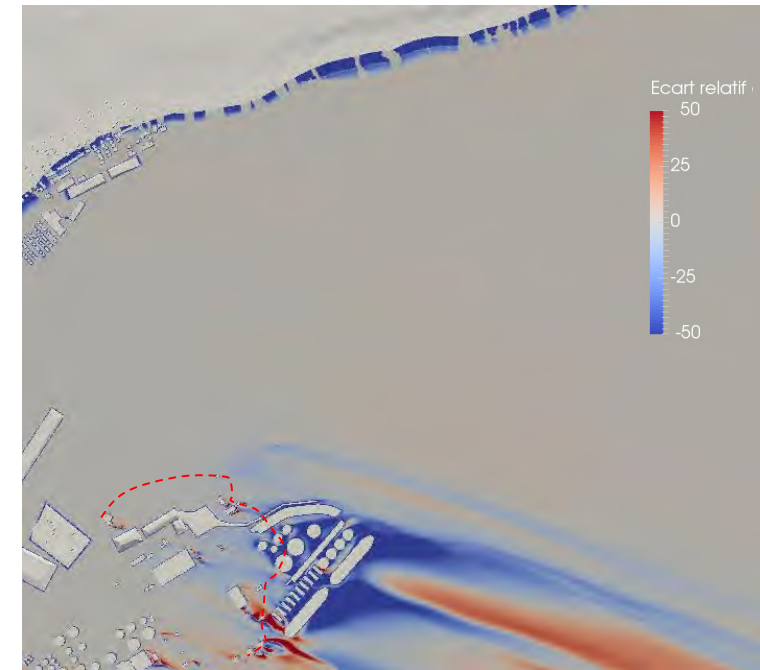
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 27
------------------------	-----------------------



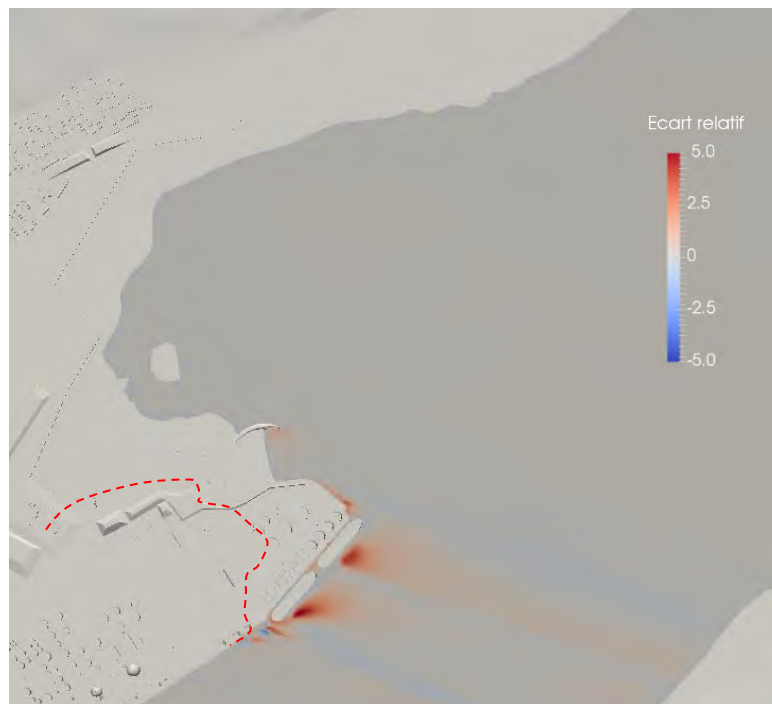
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



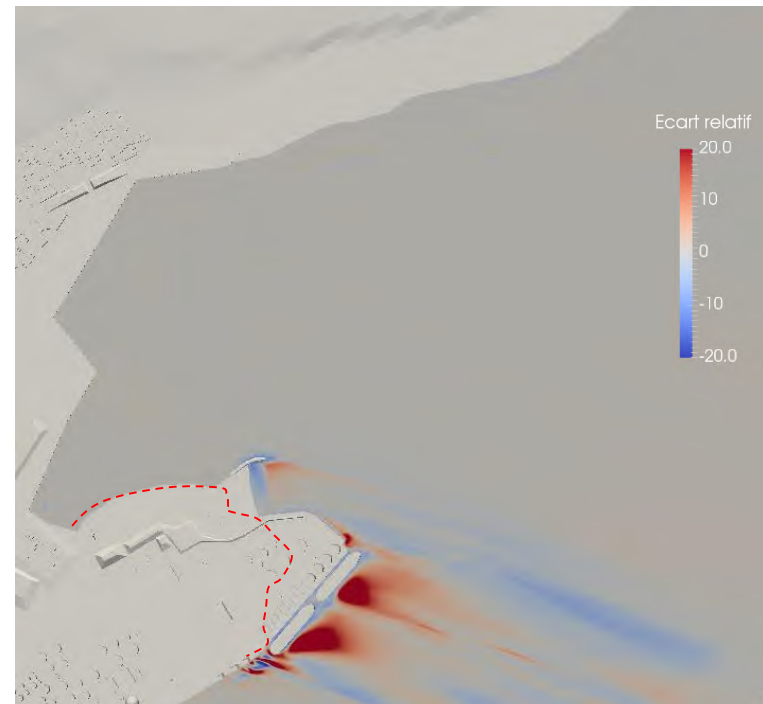
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



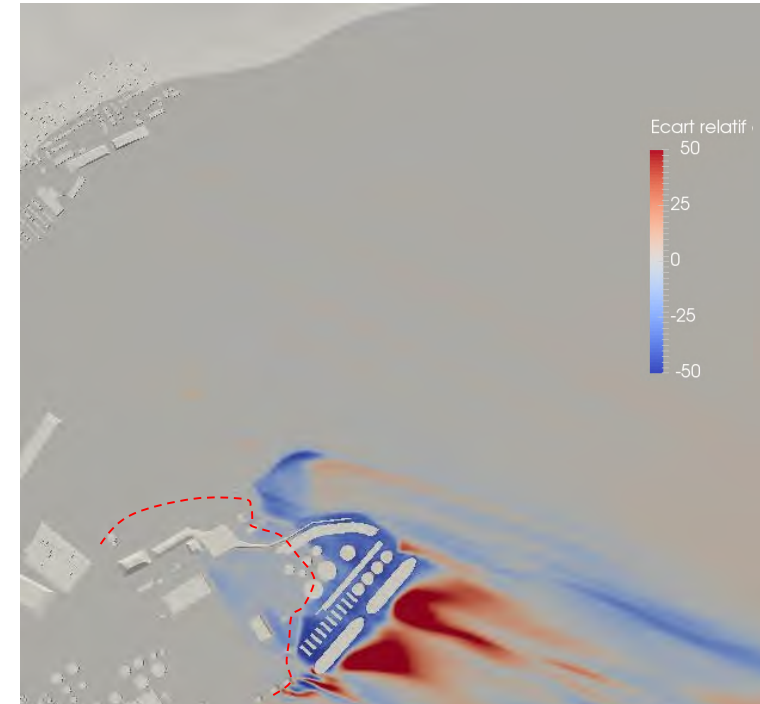
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

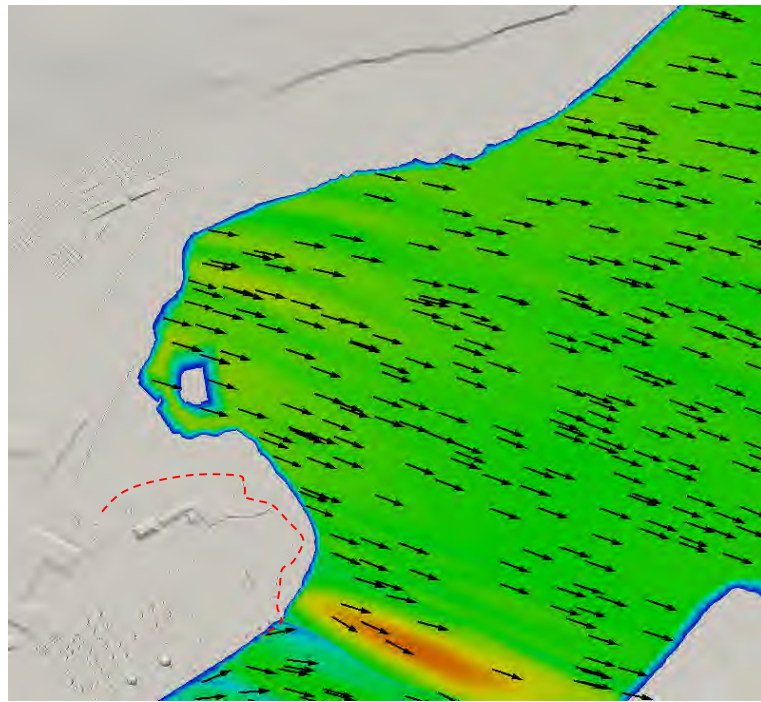


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

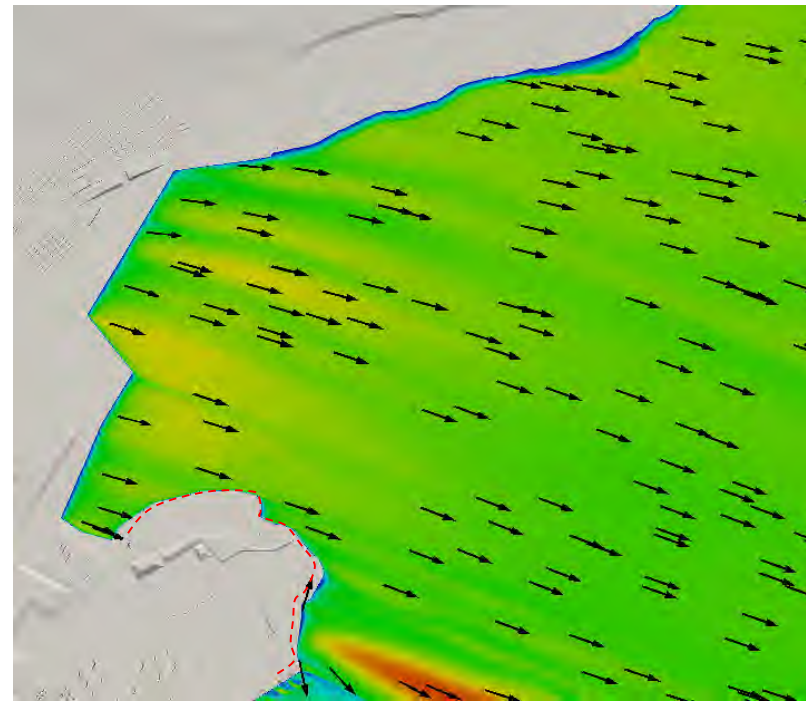
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Écarts relatifs– niveau BMIMM- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

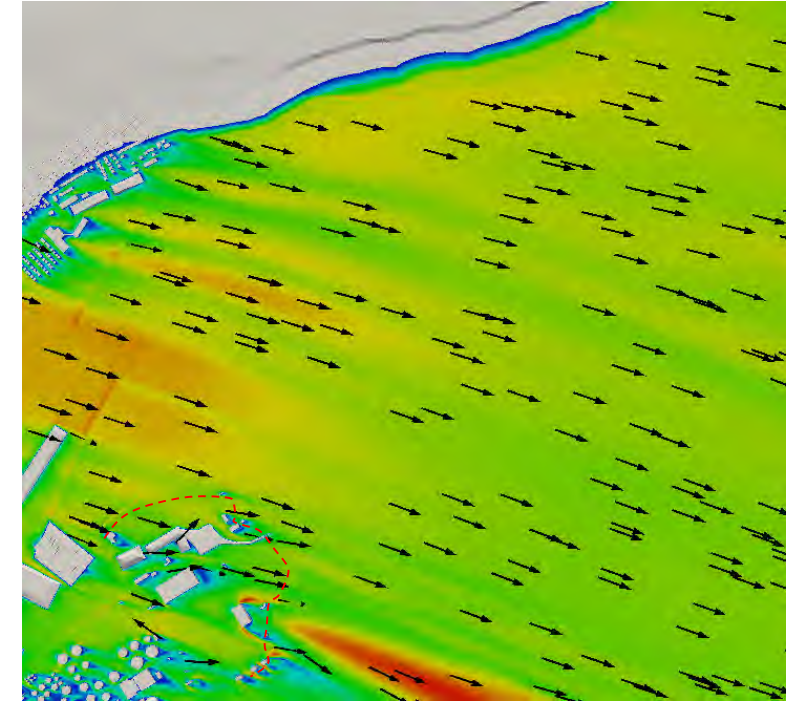
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 28
------------------------	-----------------------



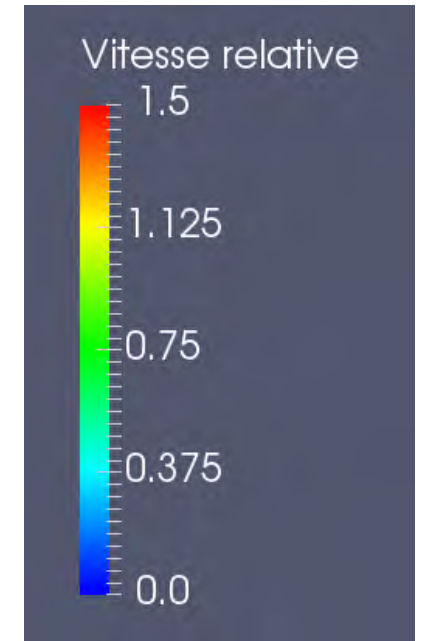
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

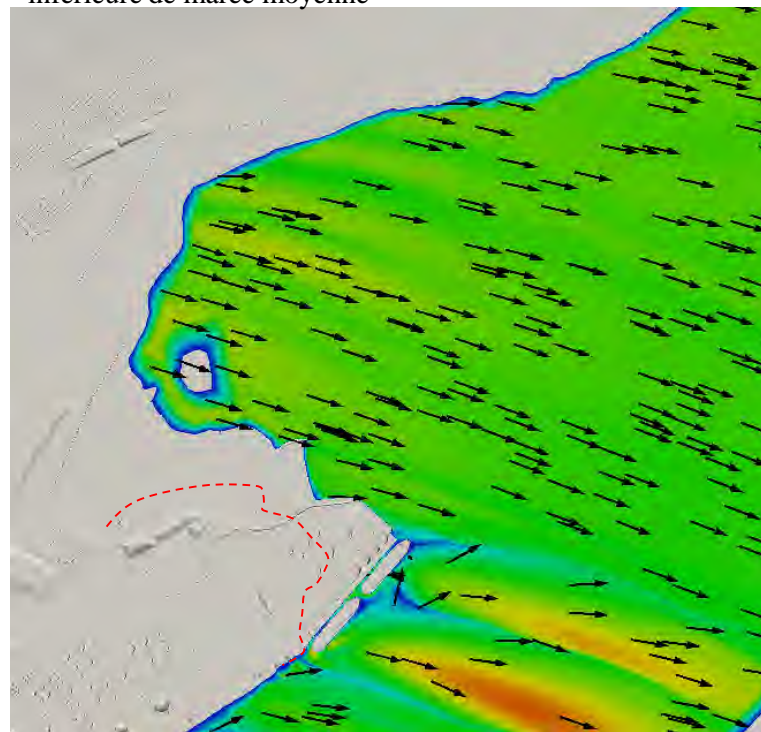


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

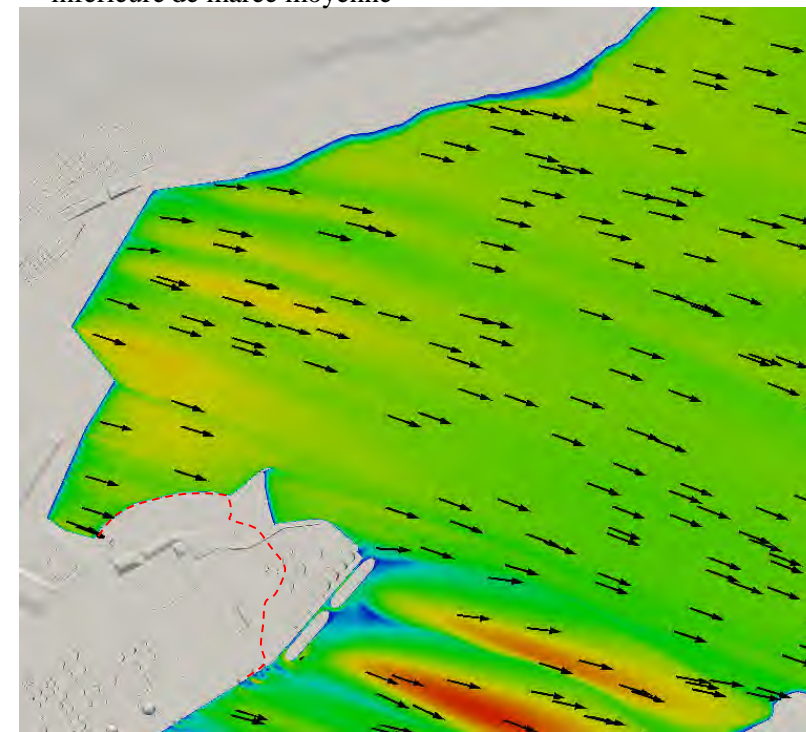


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

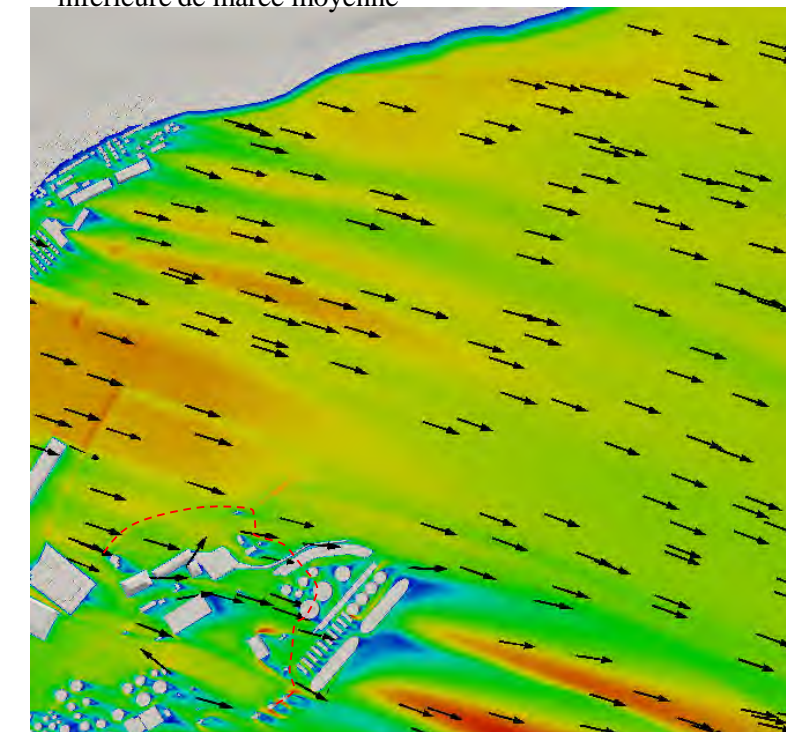
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

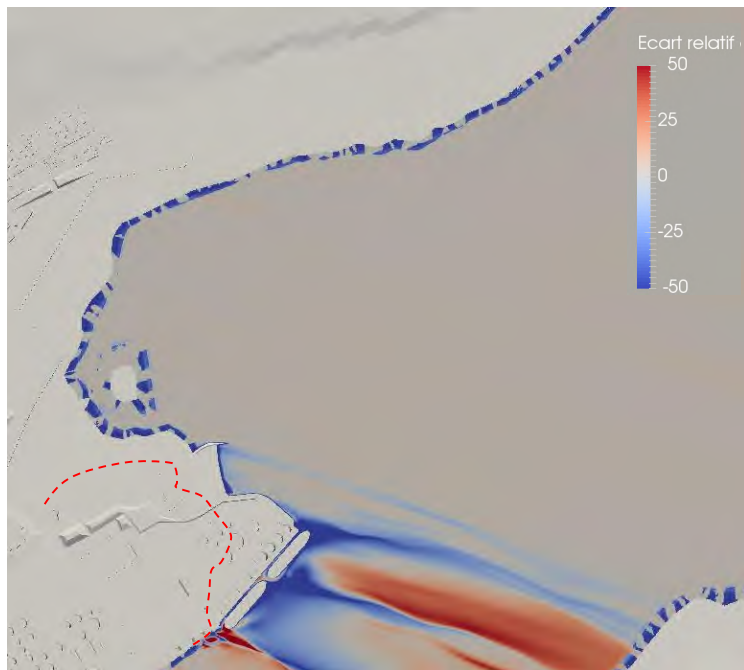
PORT QUÉBEC

PROJET: **PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens**

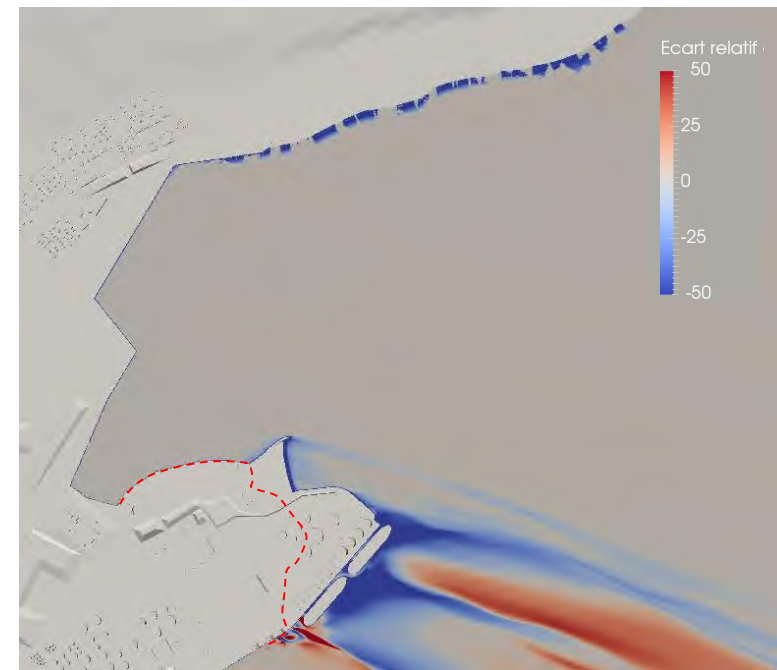
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Vitesses relatives – niveau BMIMM-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

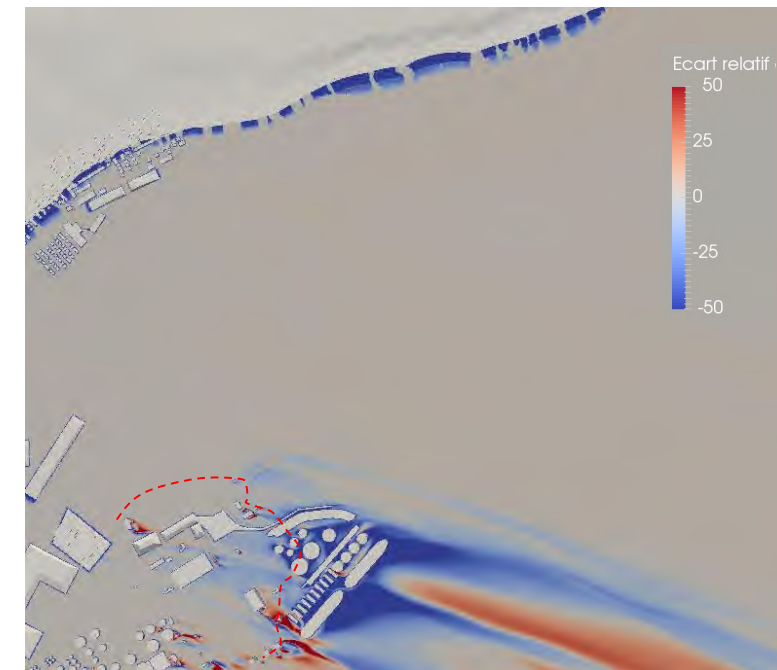
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 29
------------------------	-----------------------



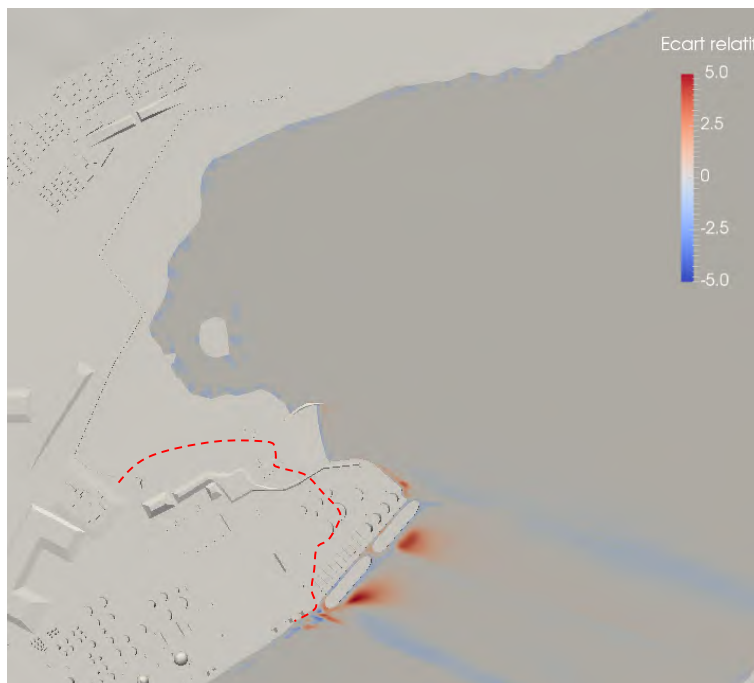
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



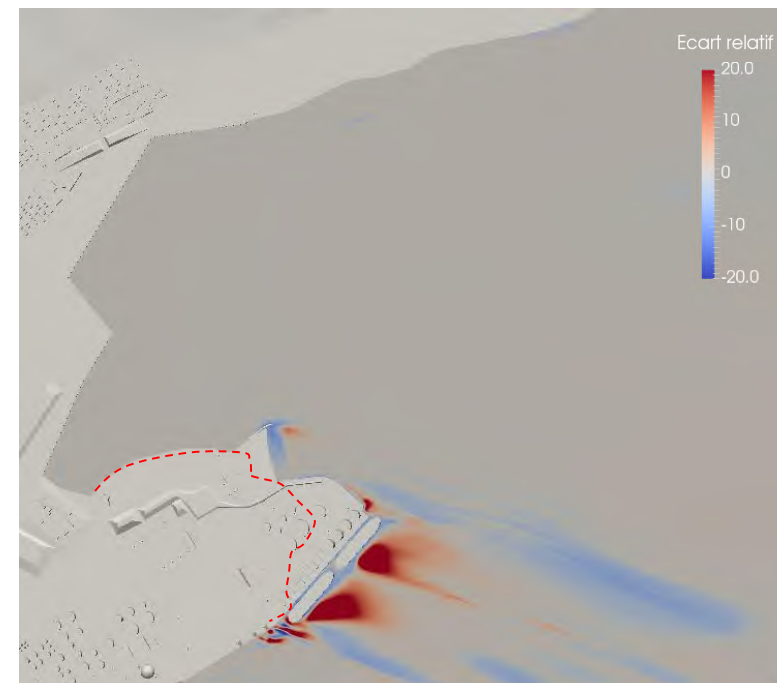
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



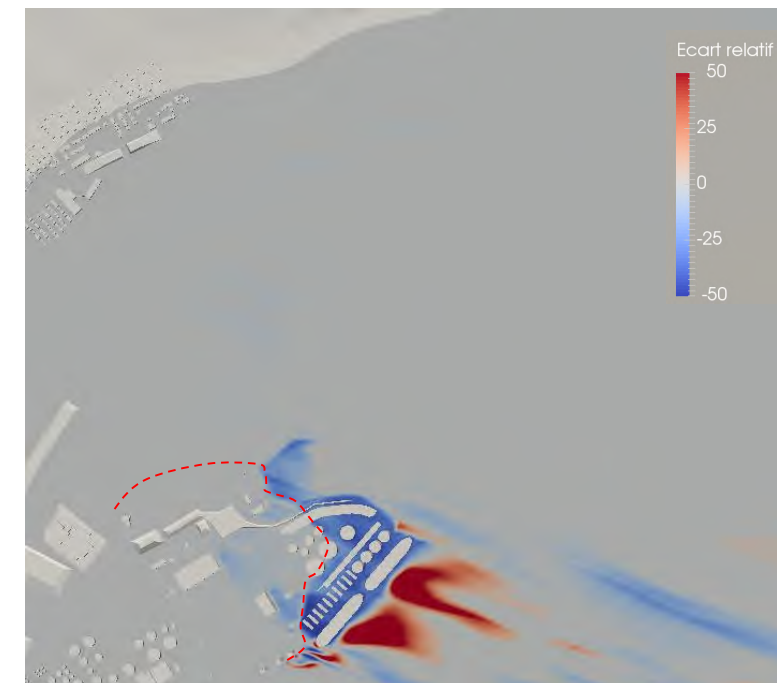
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

lasalle nhc

CLIENT :

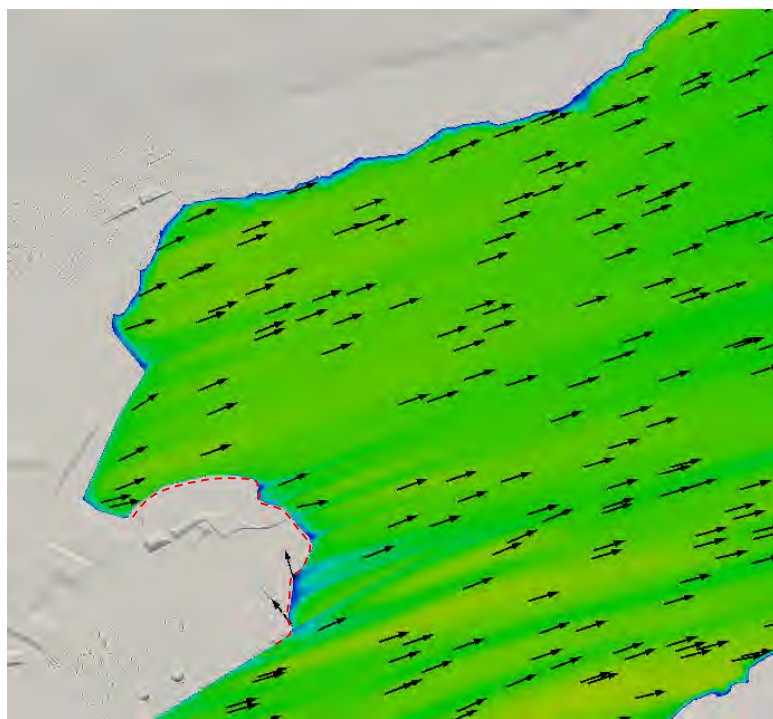


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

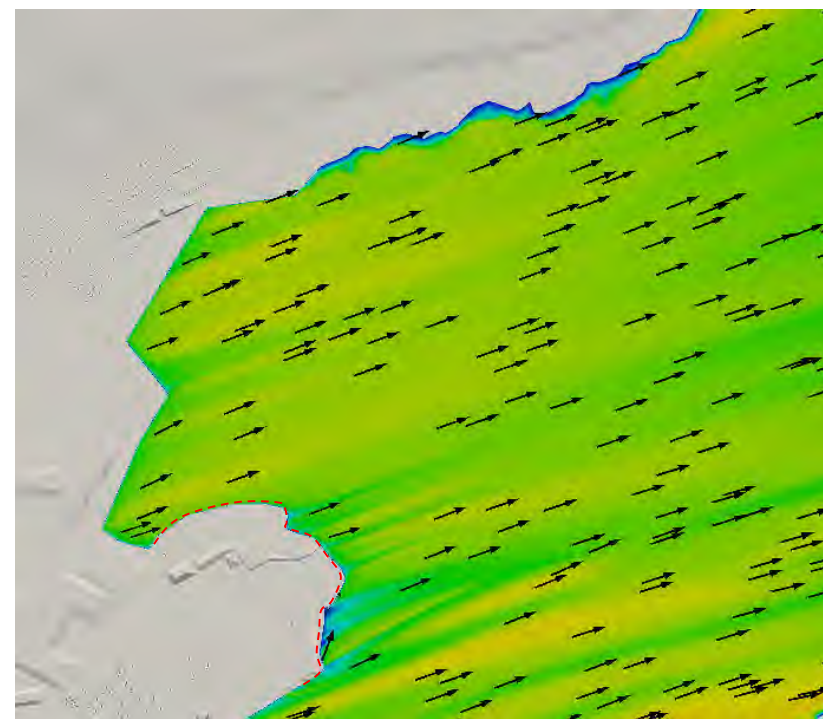
TITRE : Résultats par vent de secteur ONO –
Écarts relatifs– niveau BMIMM- brise-
lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

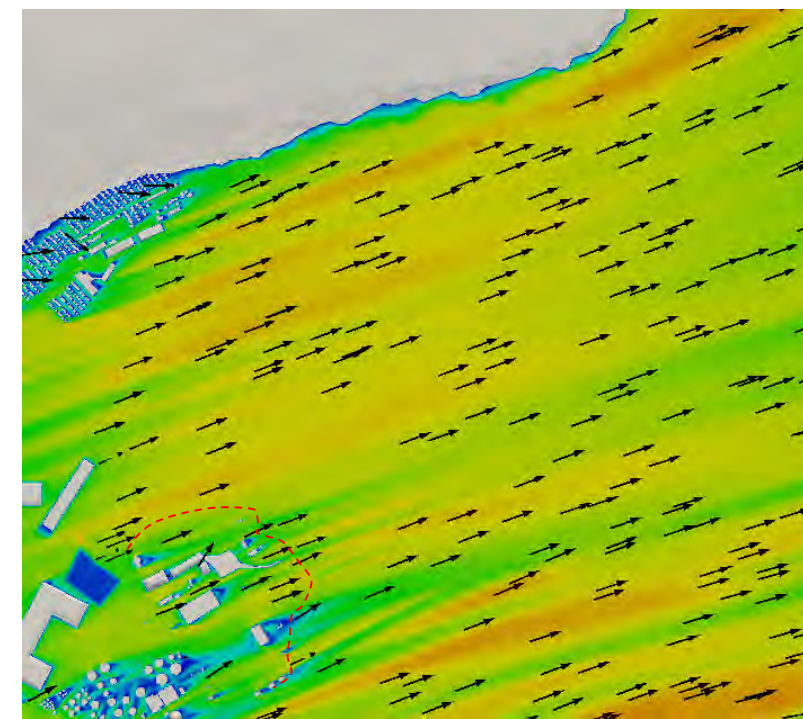
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 30
------------------------	-----------------------



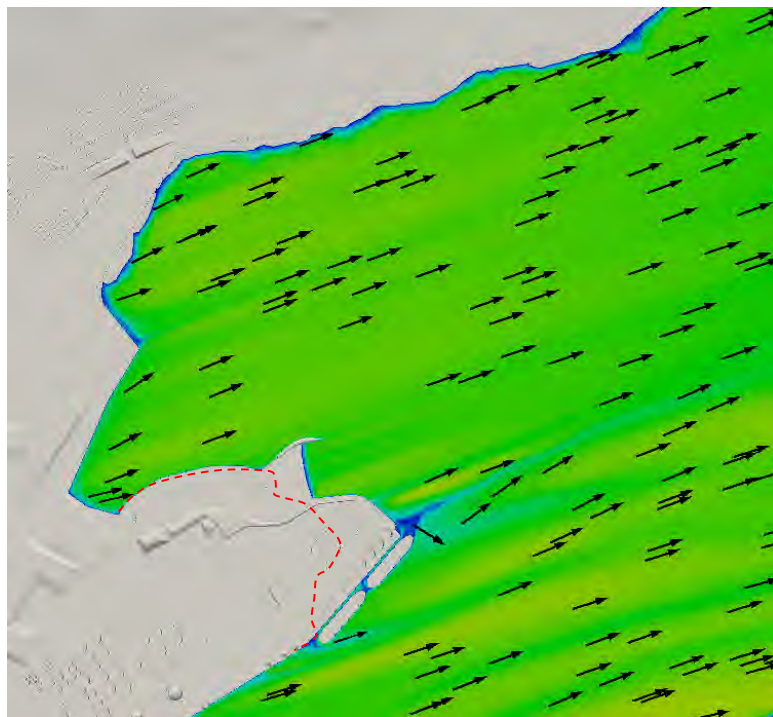
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



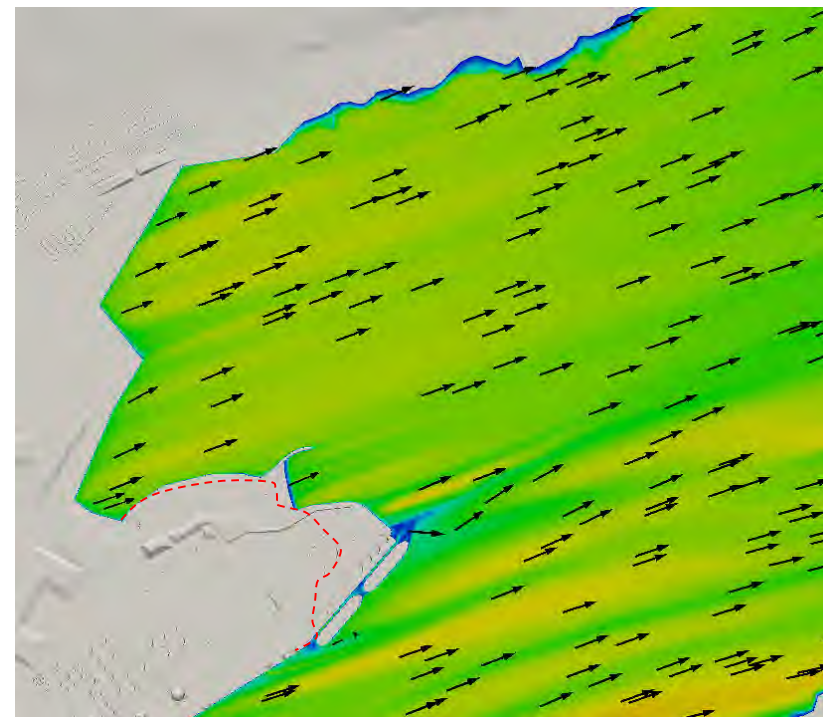
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



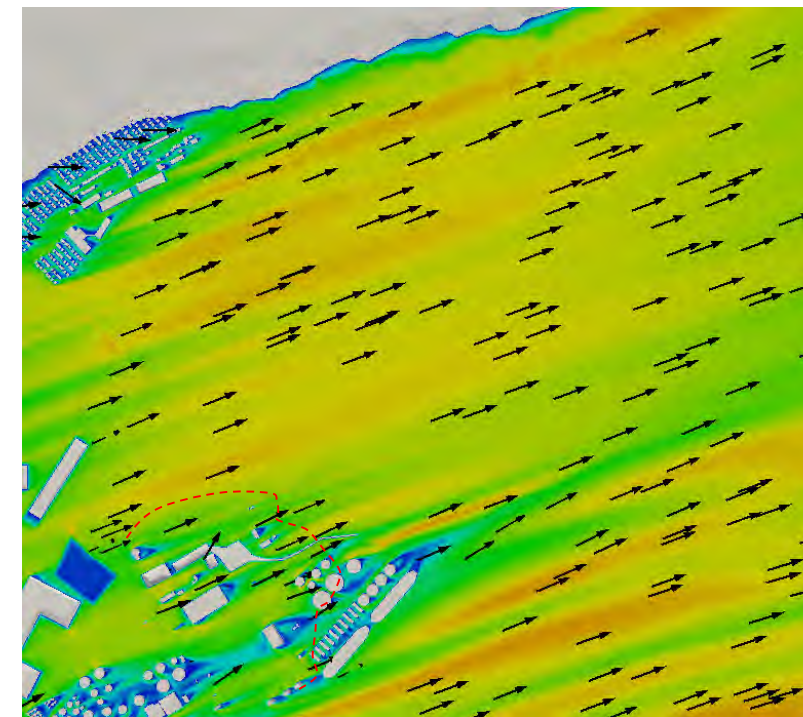
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



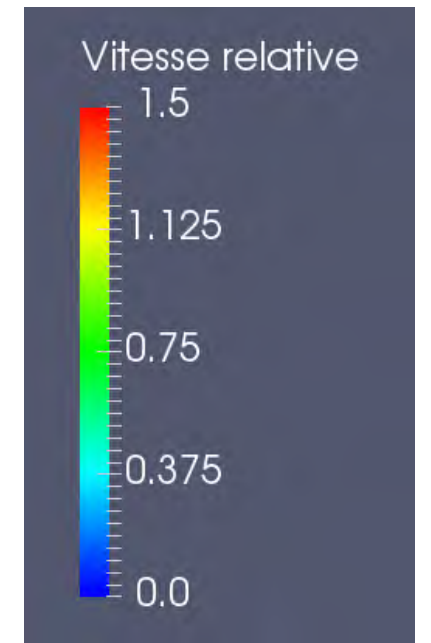
b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

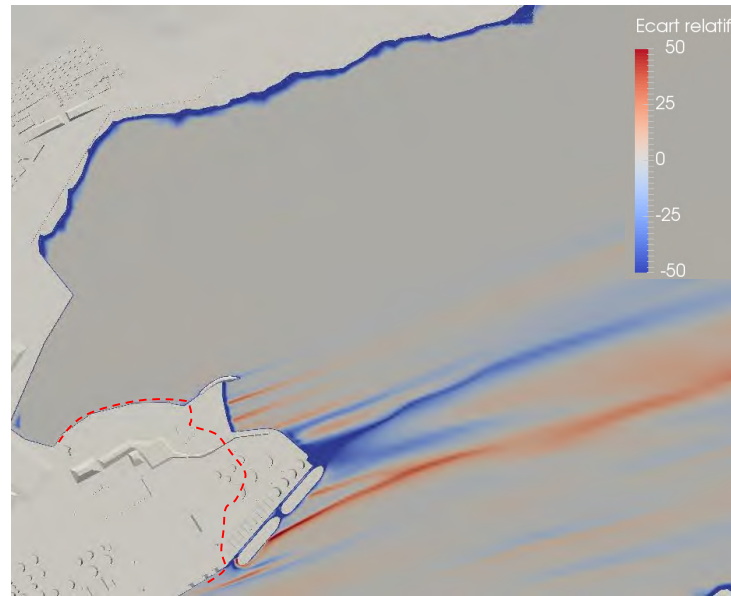


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

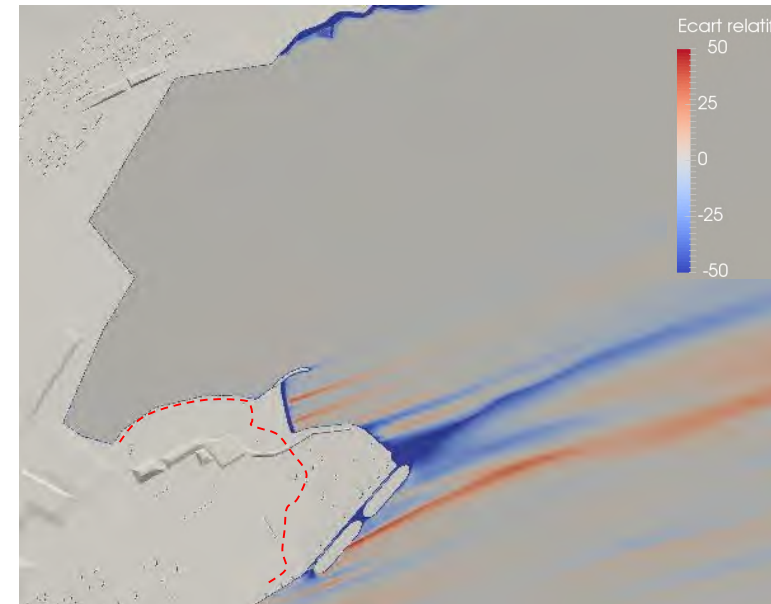
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Vitesses relatives – niveau moyen-
brise-lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

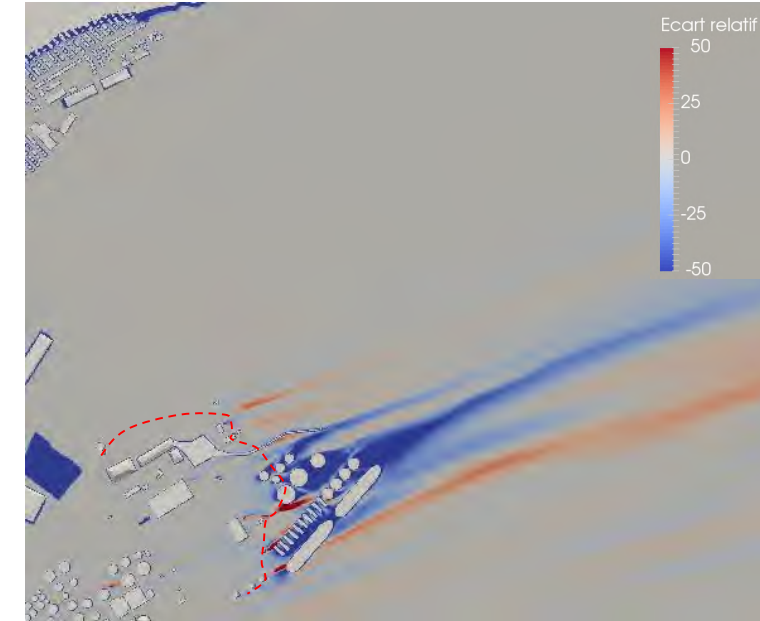
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 31
------------------------	-----------------------



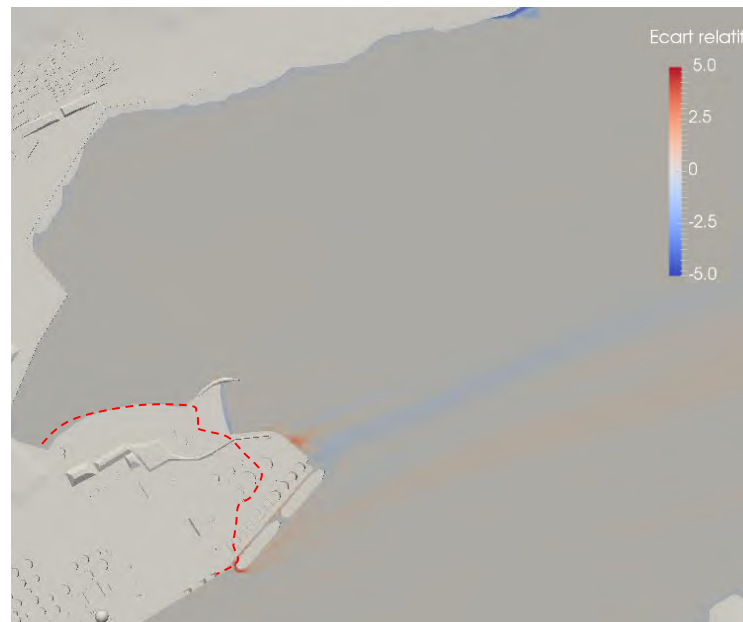
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



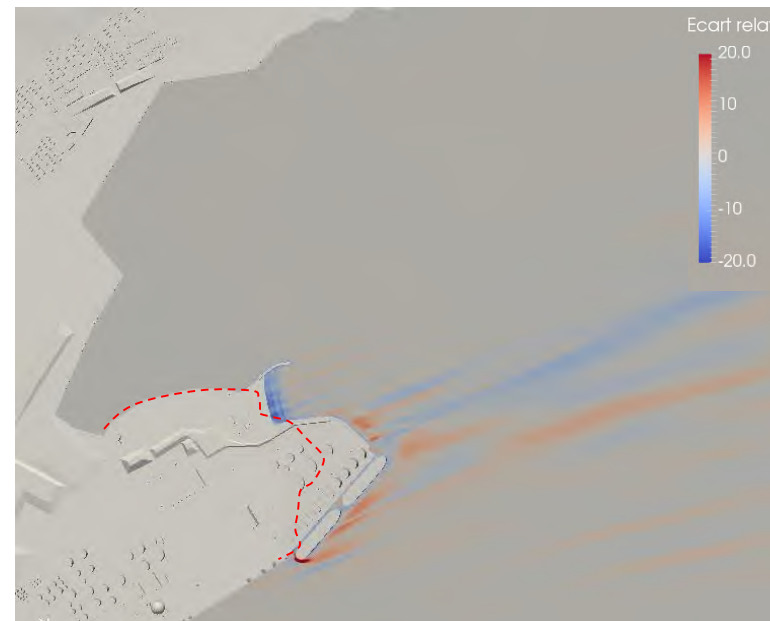
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



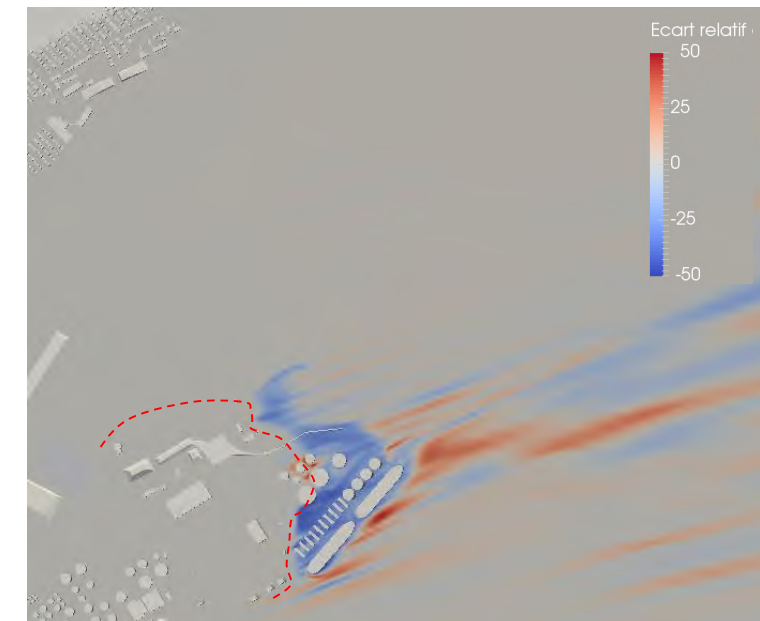
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

lasalle nhc

CLIENT :

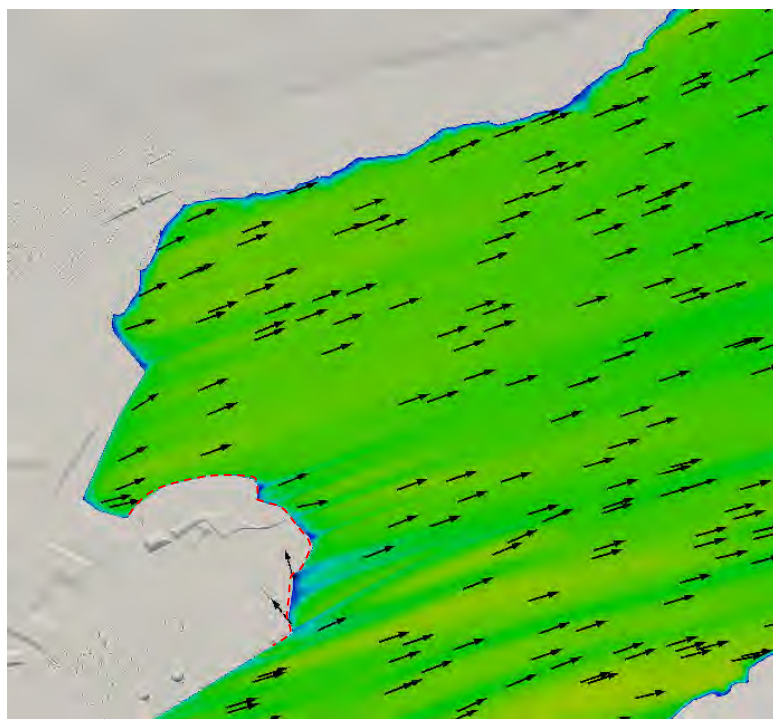


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

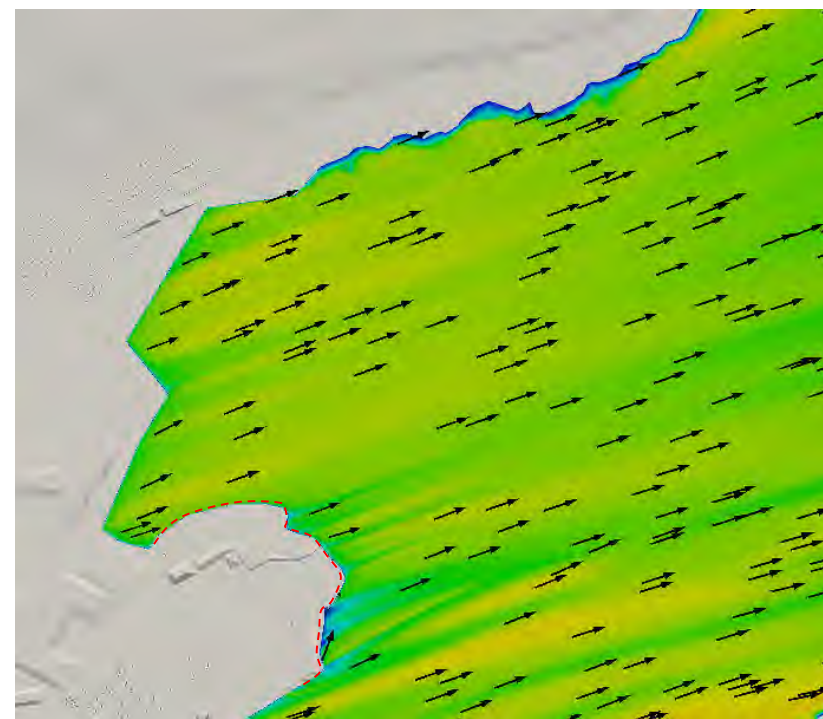
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Écarts relatifs– niveau moyen- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

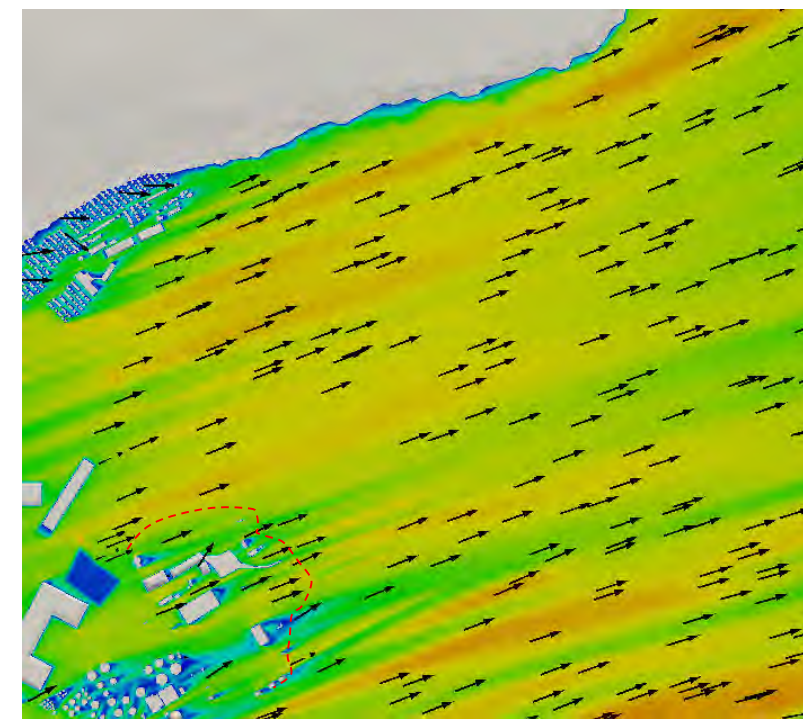
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 32
------------------------	-----------------------



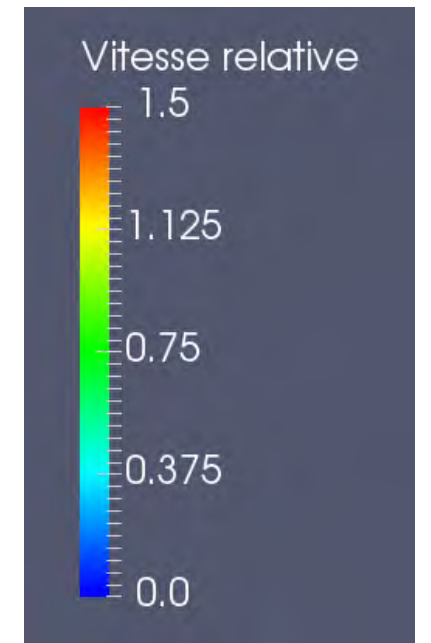
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

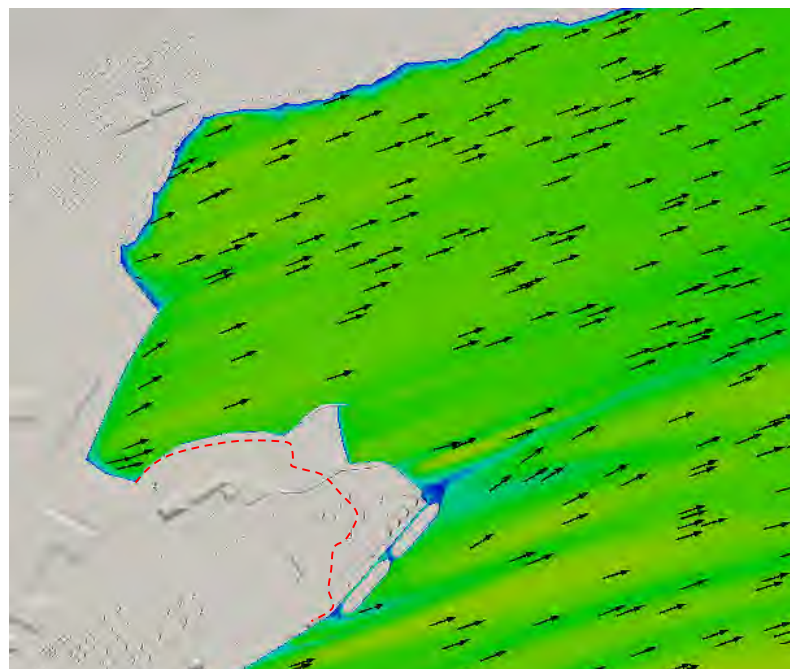


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

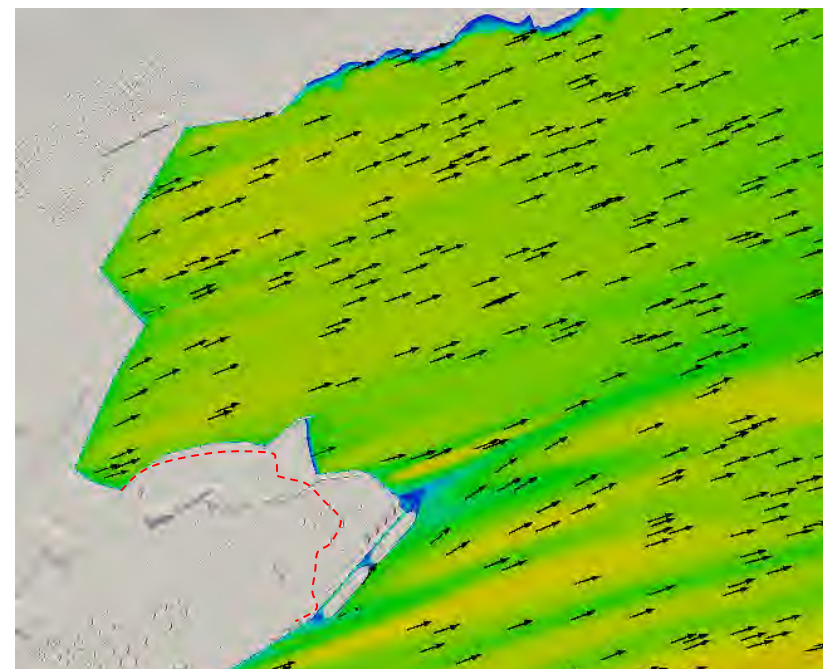


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

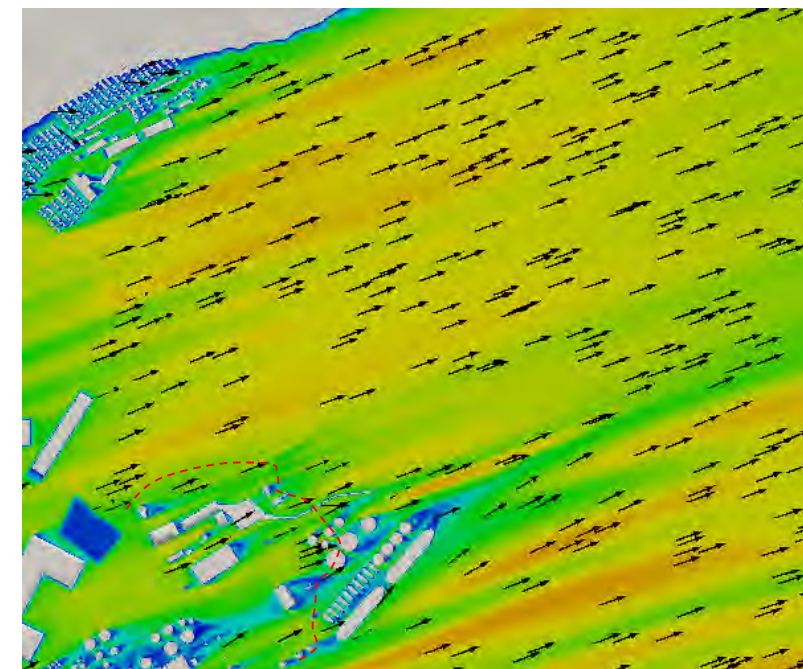
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

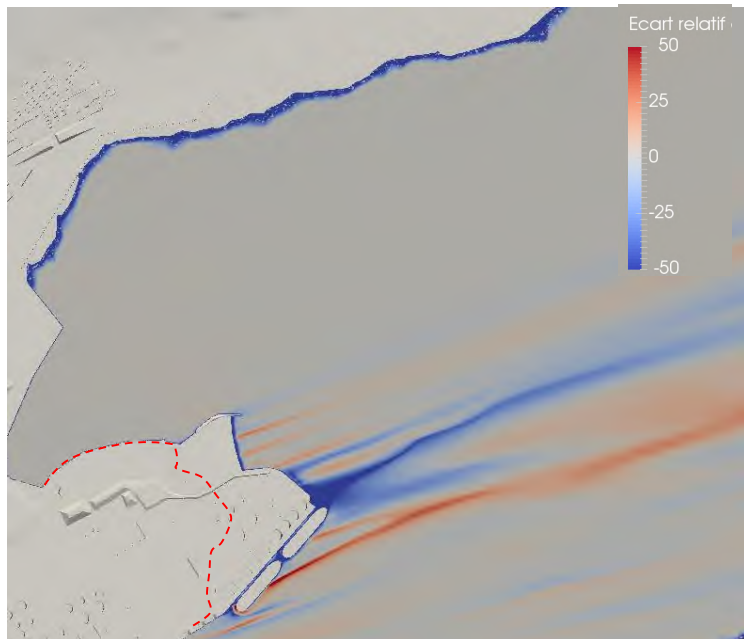


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

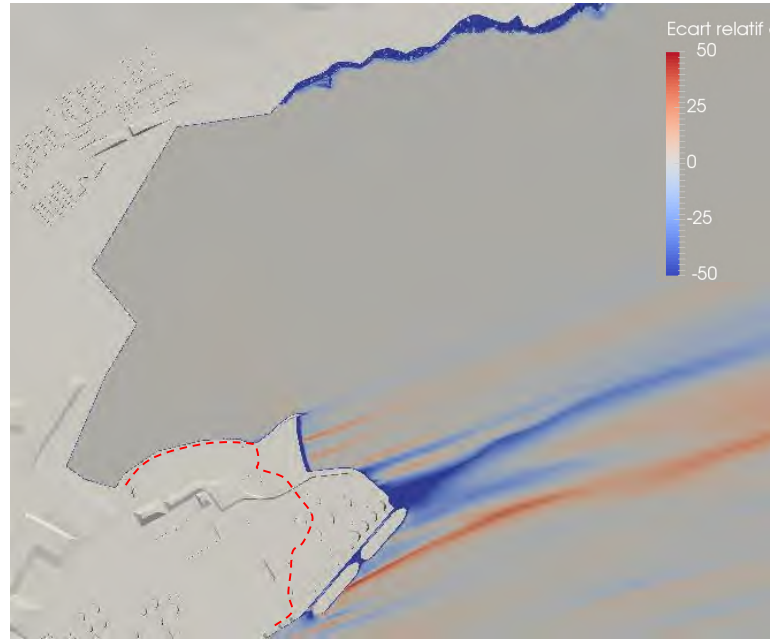
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Vitesses relatives – niveau moyen-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

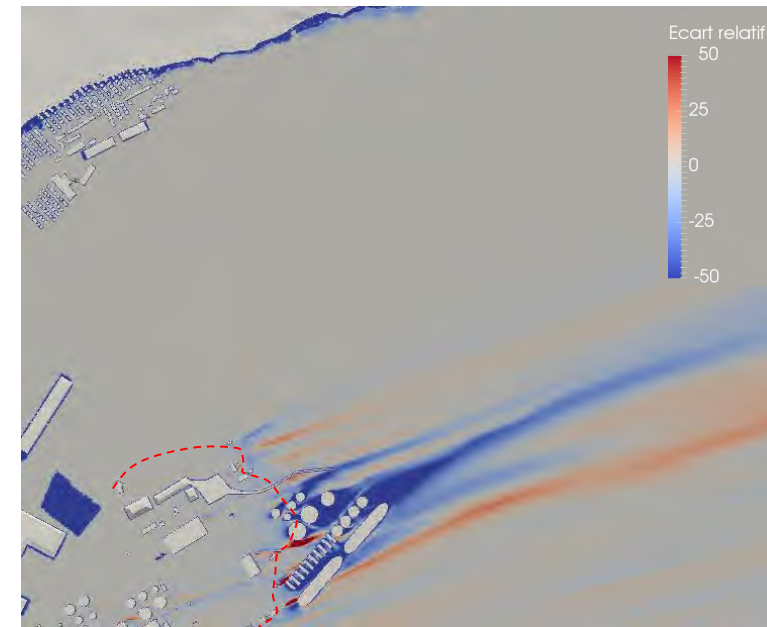
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 33
------------------------	-----------------------



a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



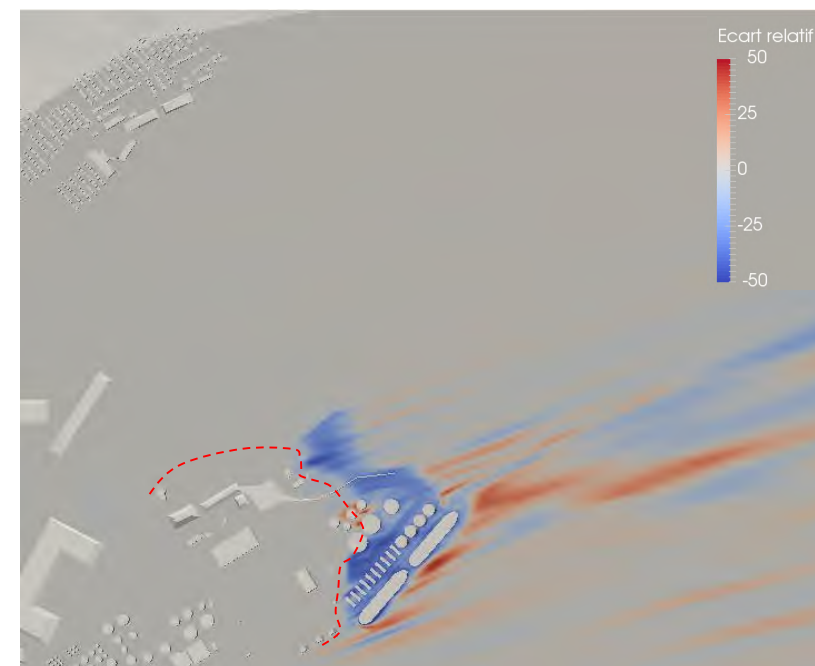
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

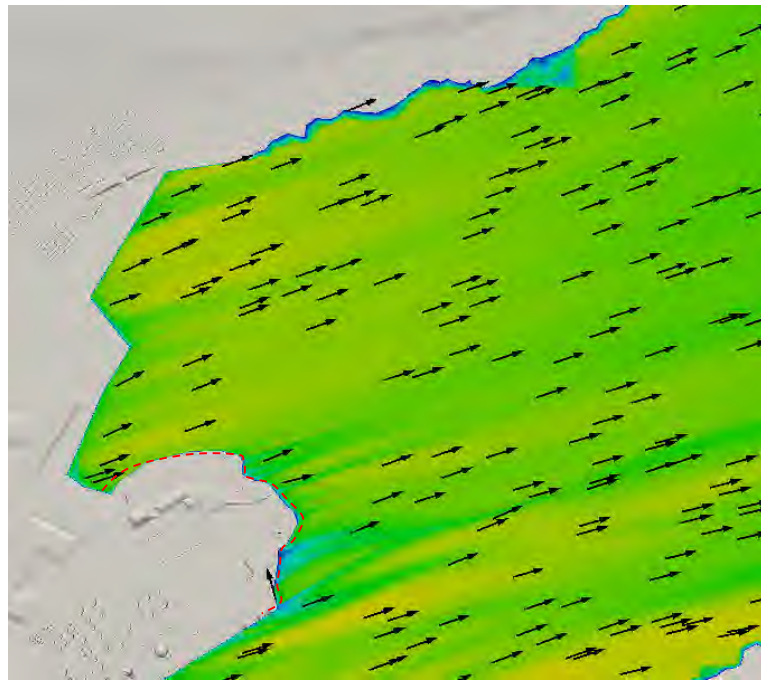


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

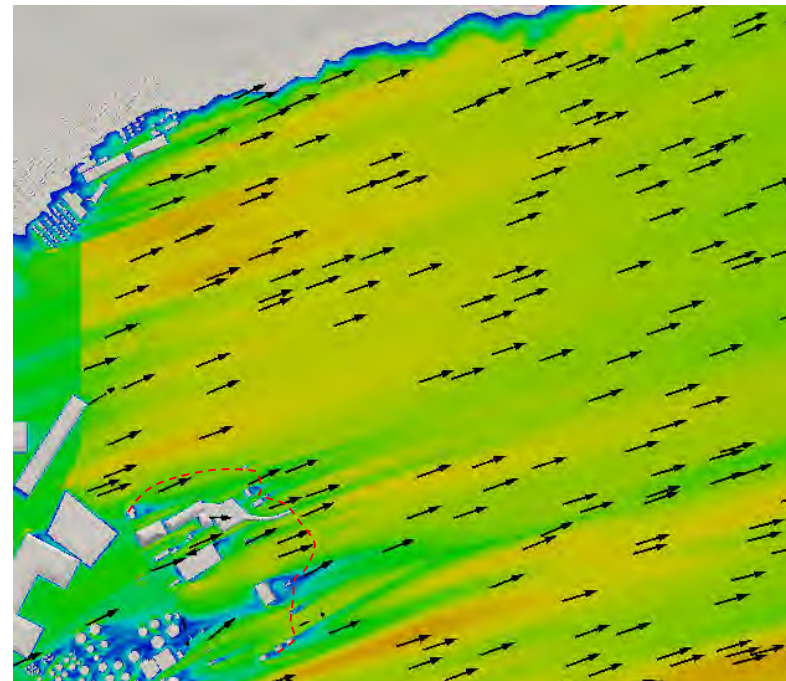
TITRE: Résultats par vent de secteur OSO –
Écarts relatifs– niveau moyen- brise-
lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

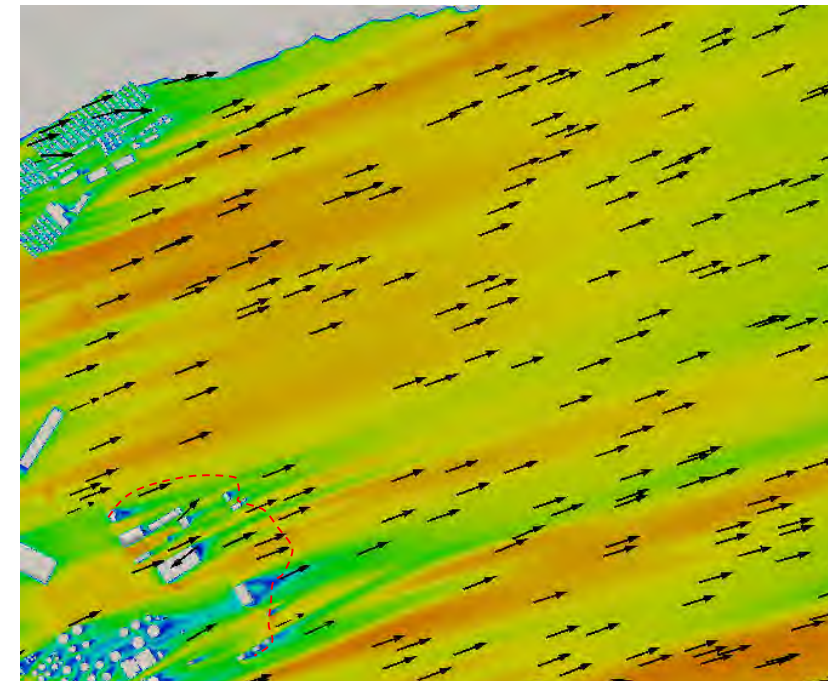
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 34
------------------------	-----------------------



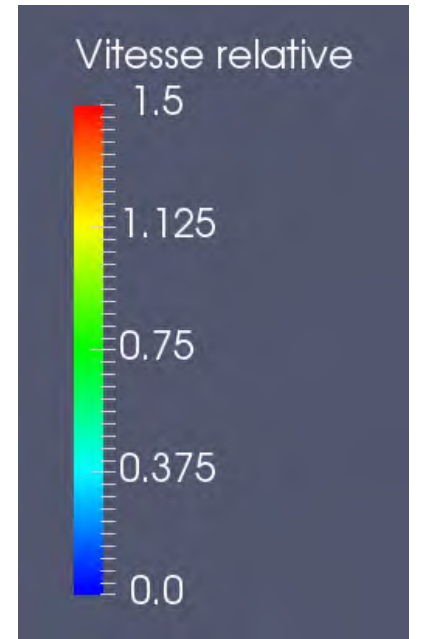
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

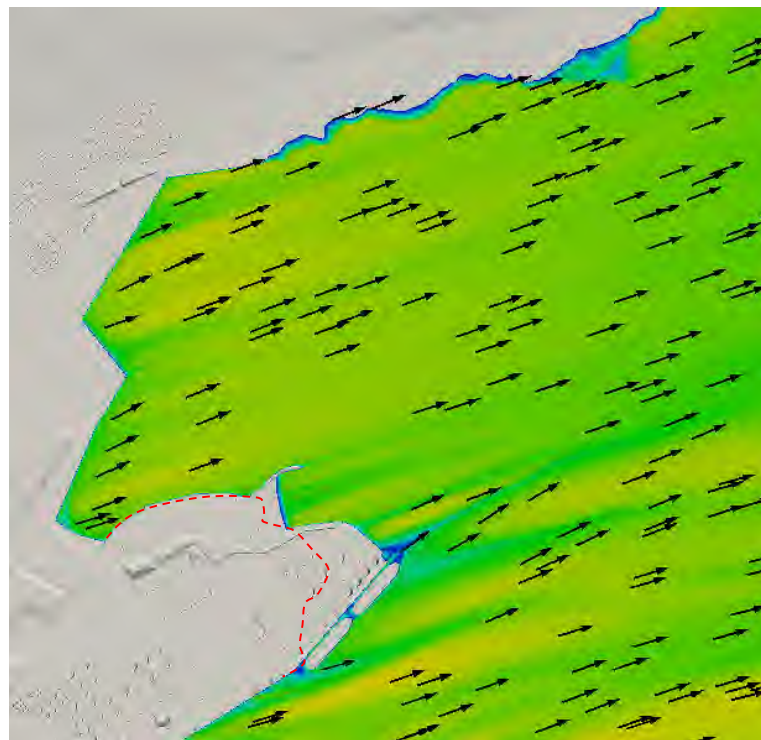


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

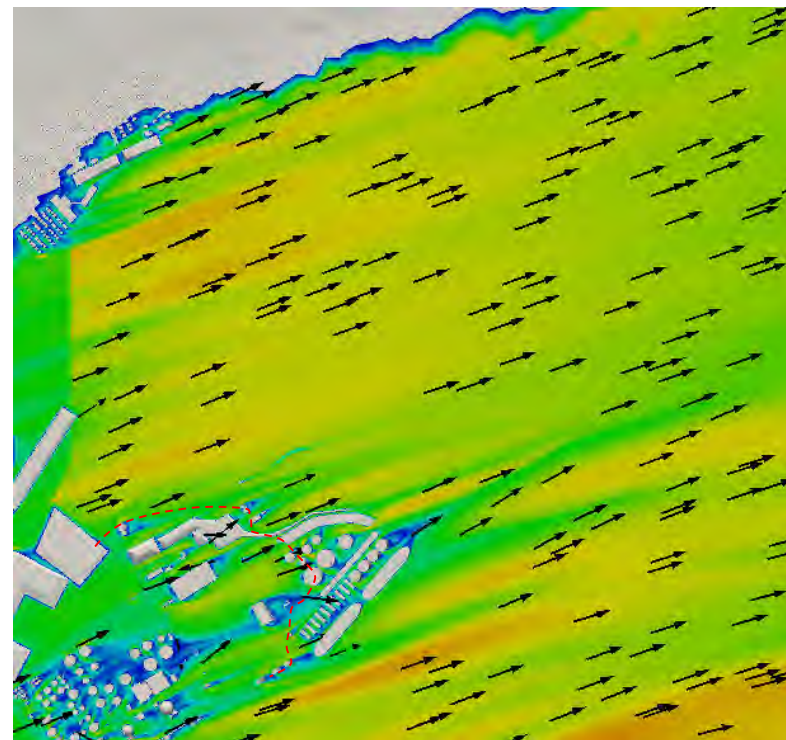


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

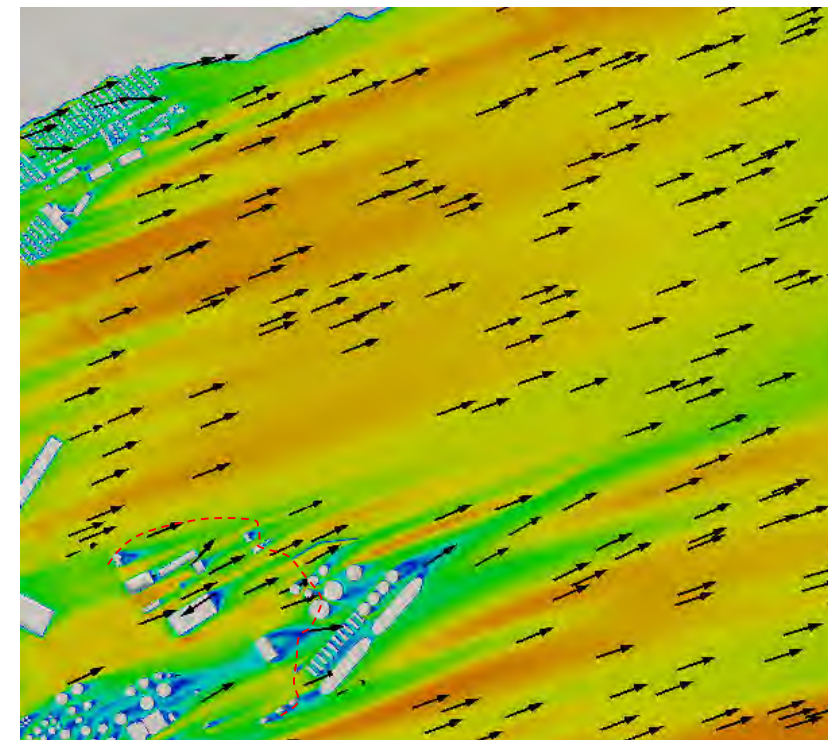
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

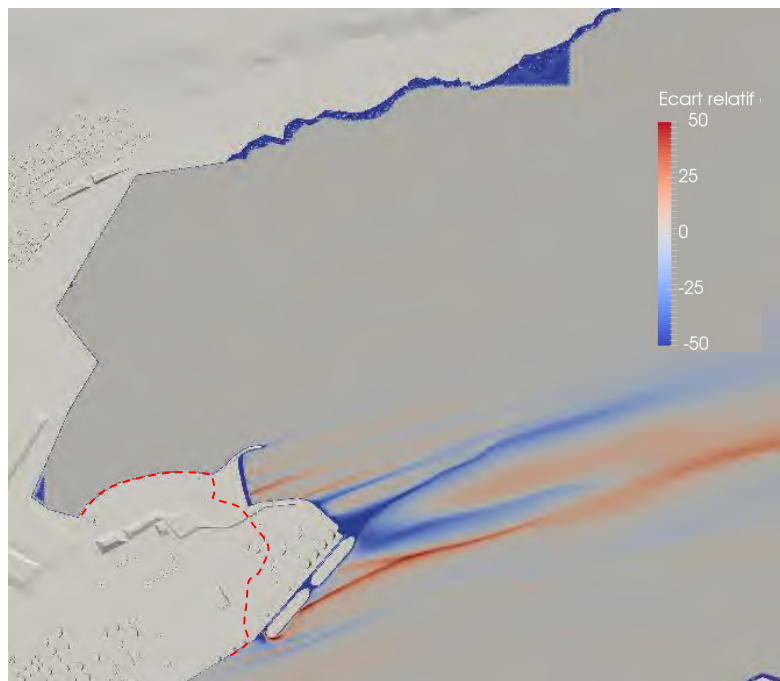
PORT
QUÉBEC

PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

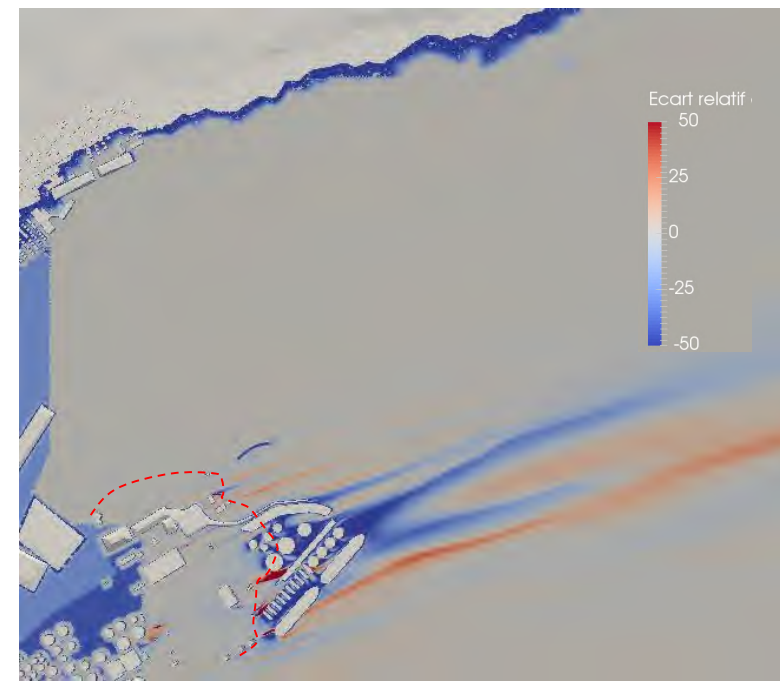
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Vitesses relatives – niveau PMSMM-
brise-lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

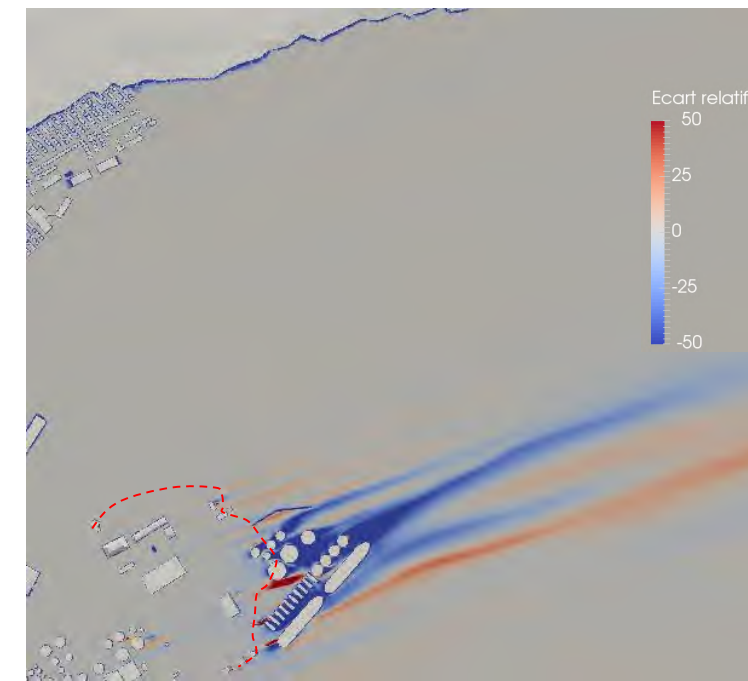
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 35
------------------------	----------------



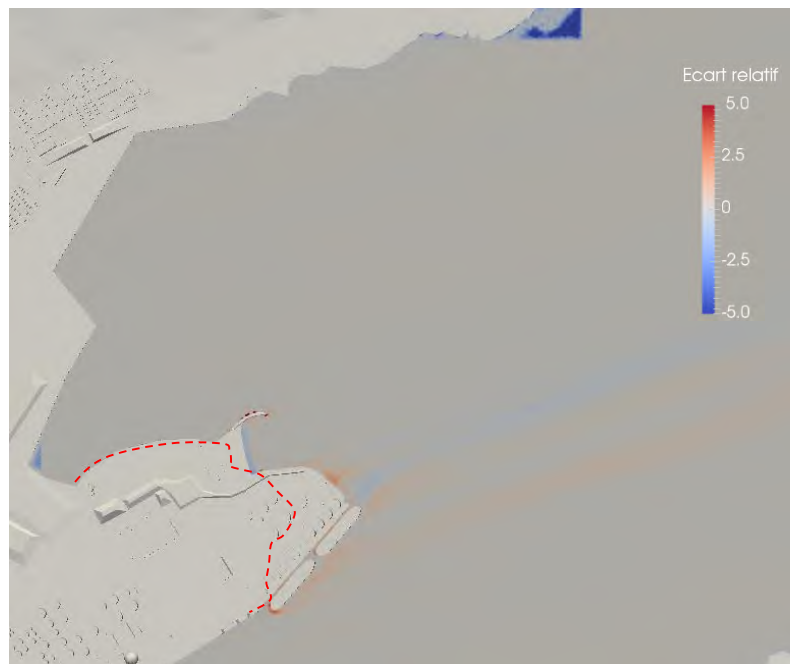
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



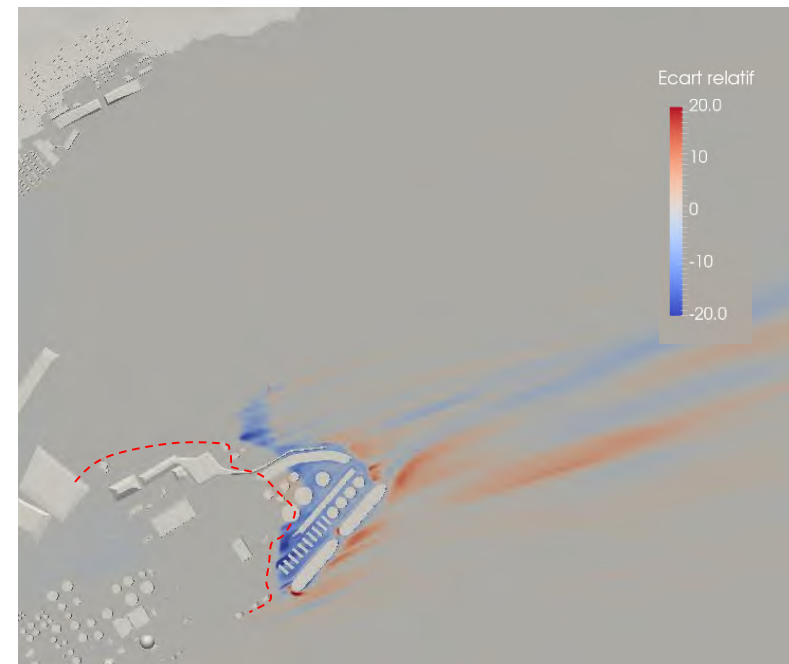
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



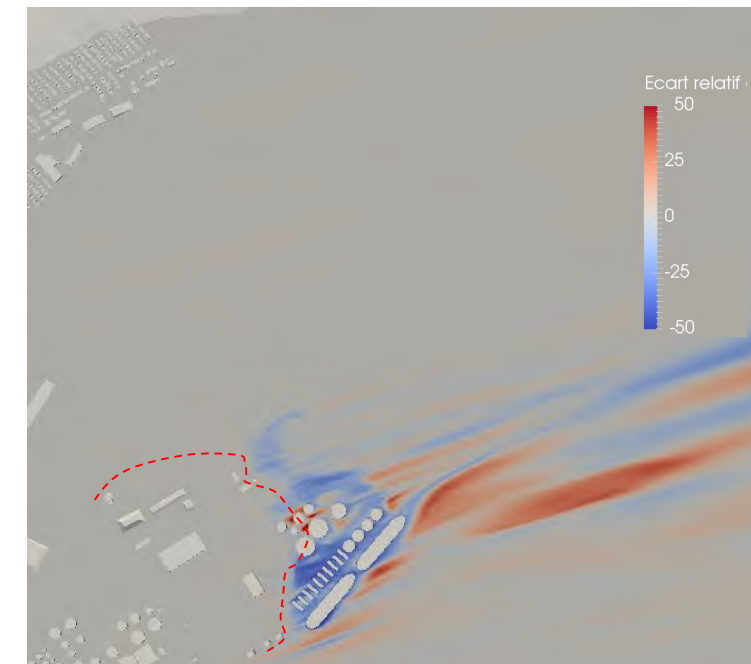
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

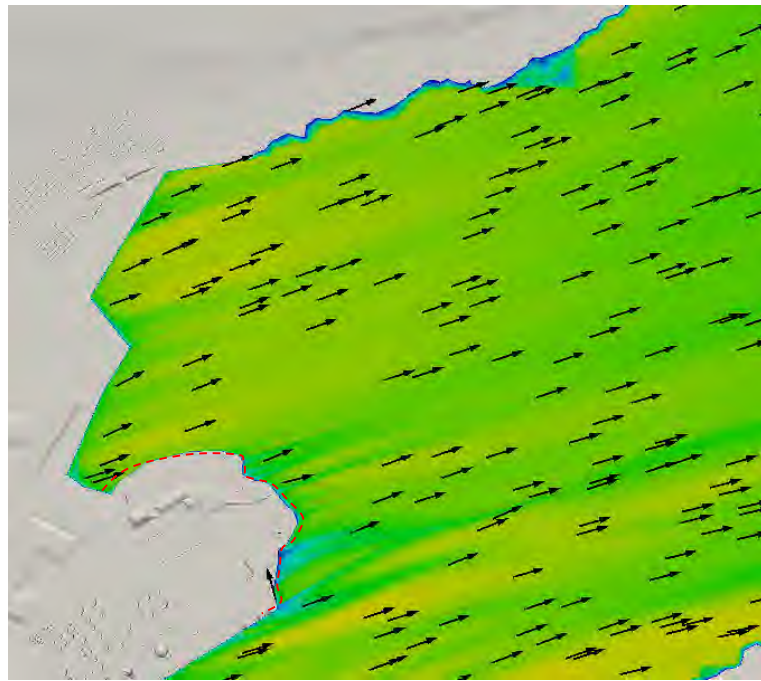


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

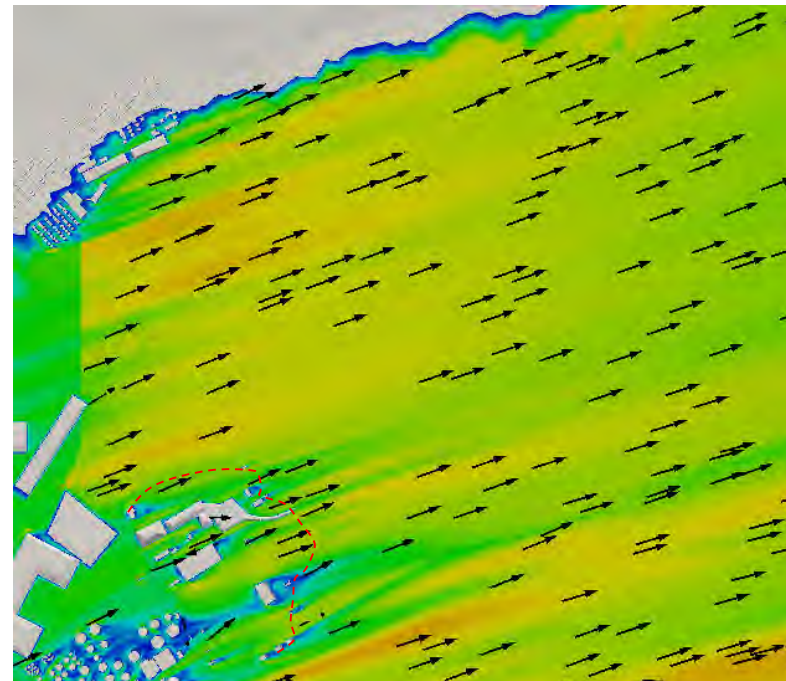
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Écarts relatifs– niveau PMSMM- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

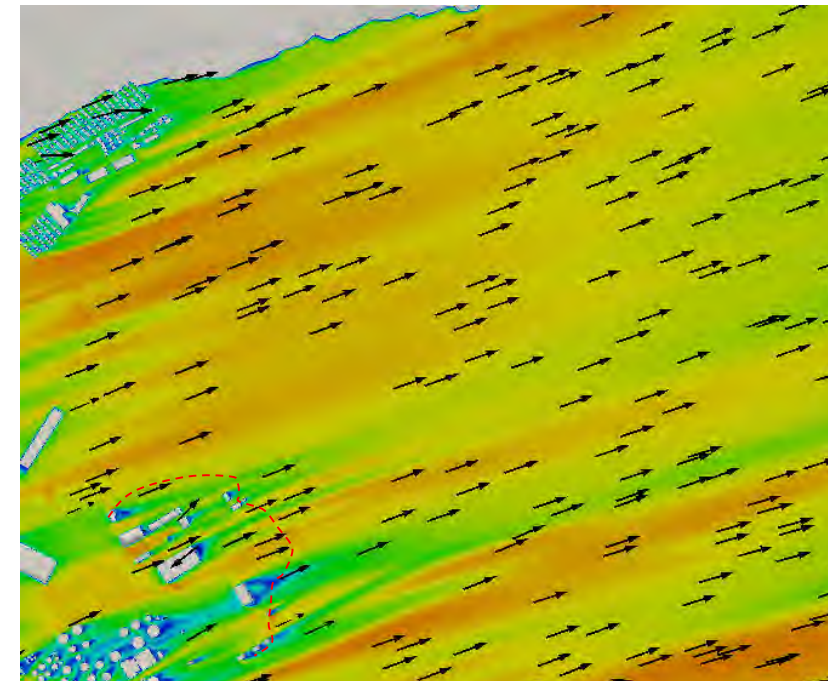
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 36
------------------------	-----------------------



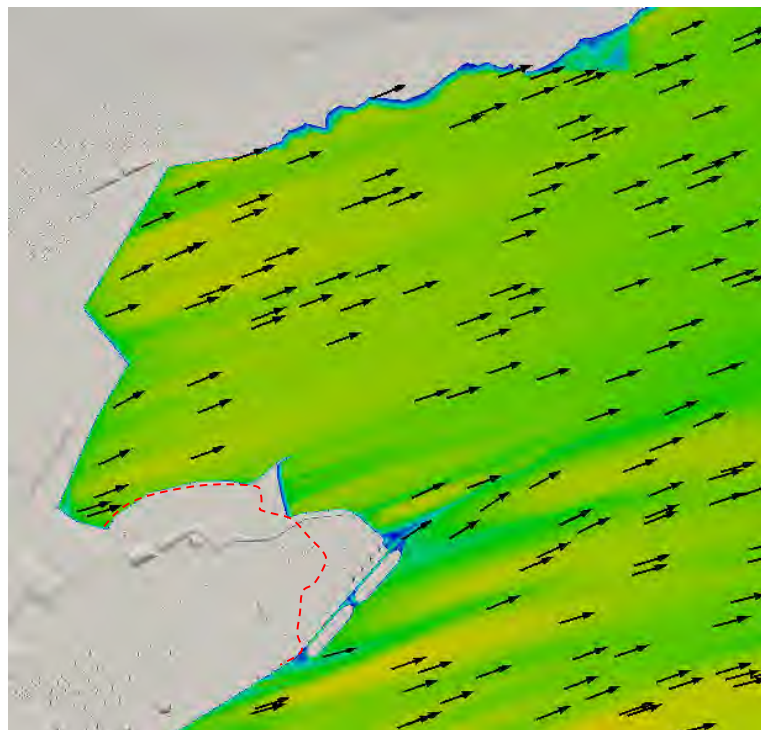
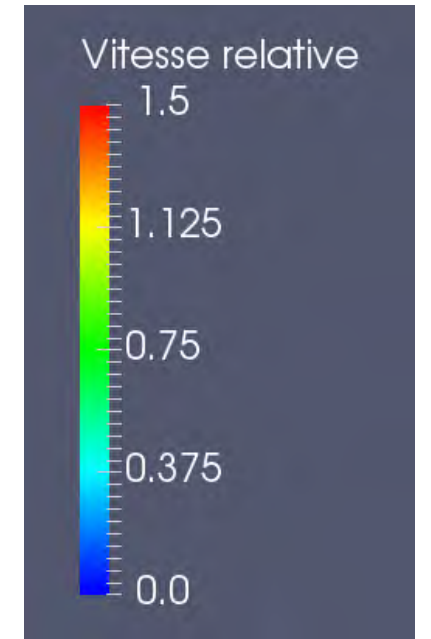
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



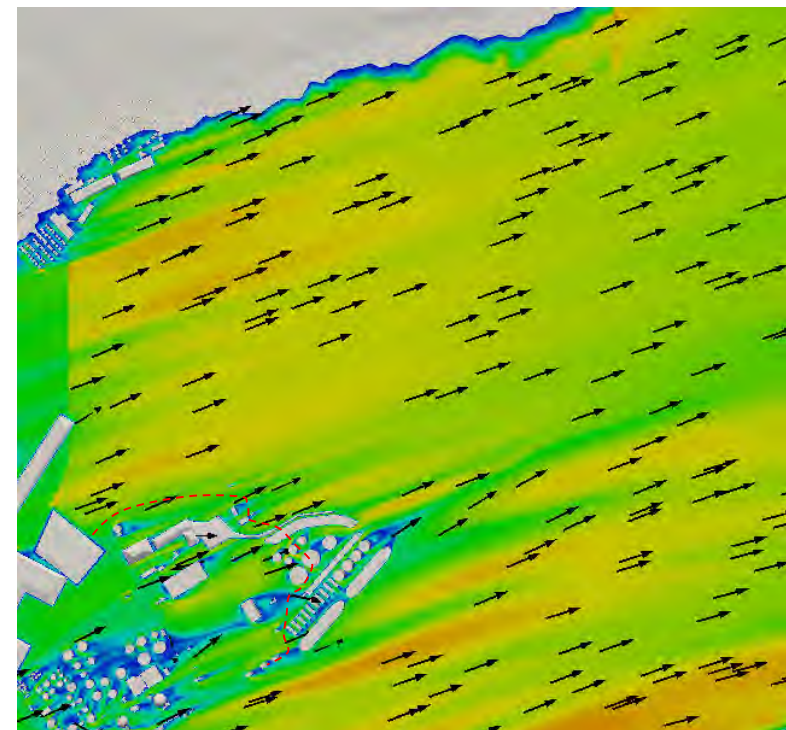
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



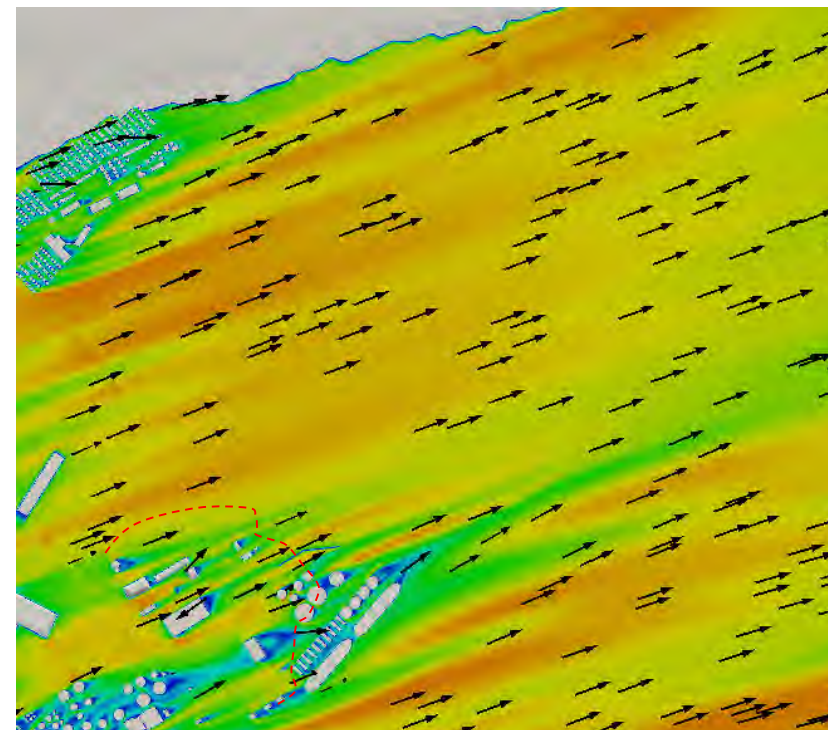
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

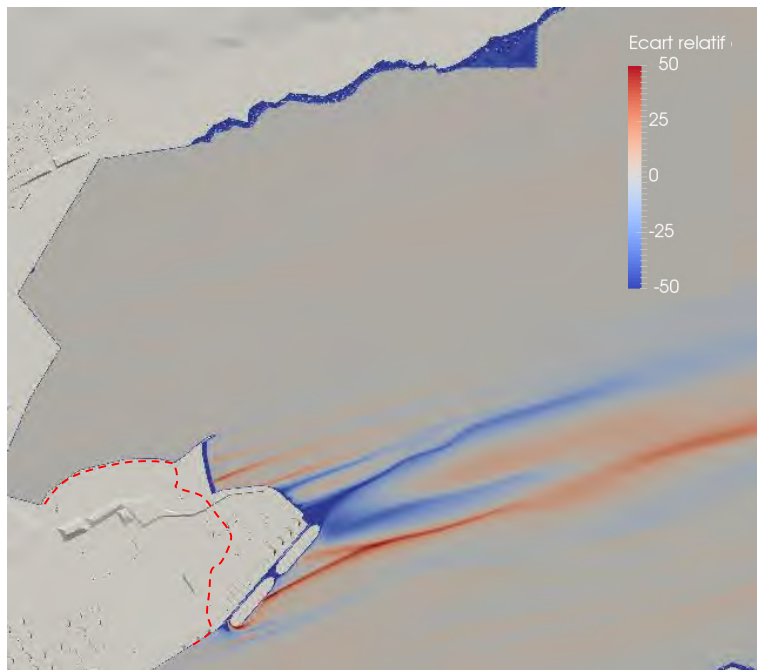
PORT
QUÉBEC

PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

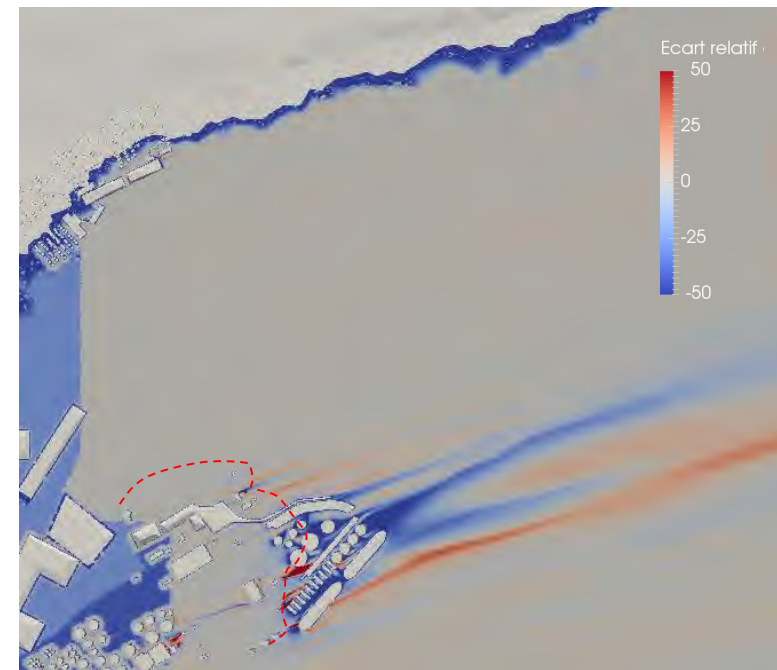
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Vitesses relatives – niveau PMSMM-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

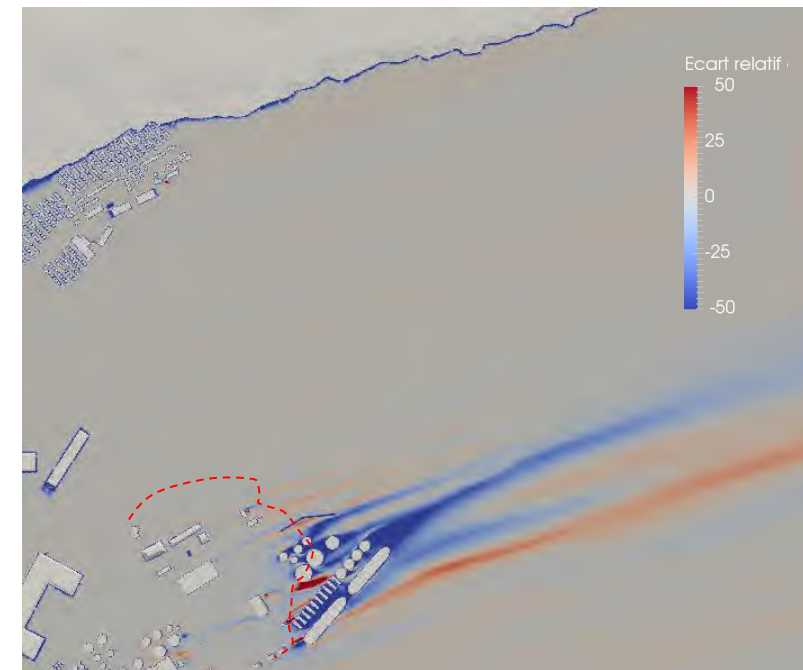
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 37
------------------------	----------------



a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



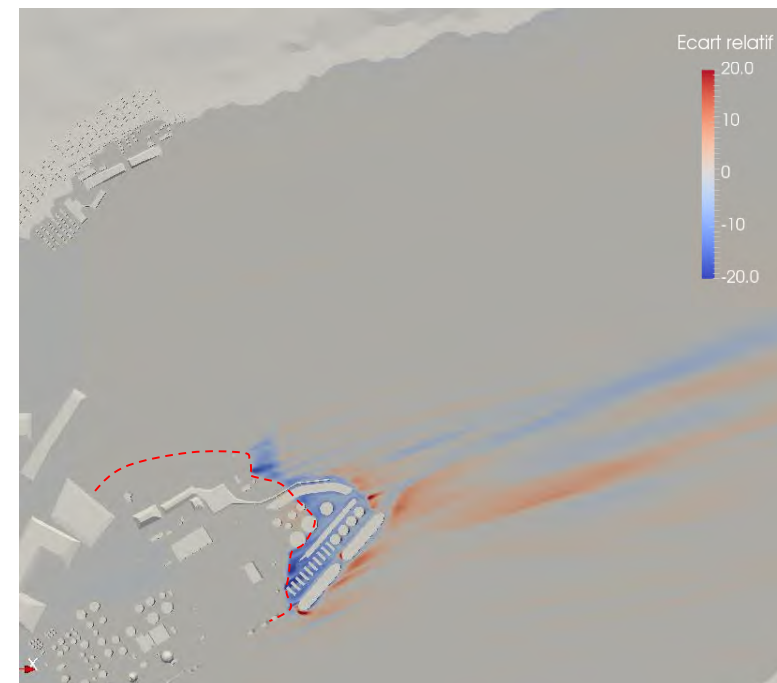
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



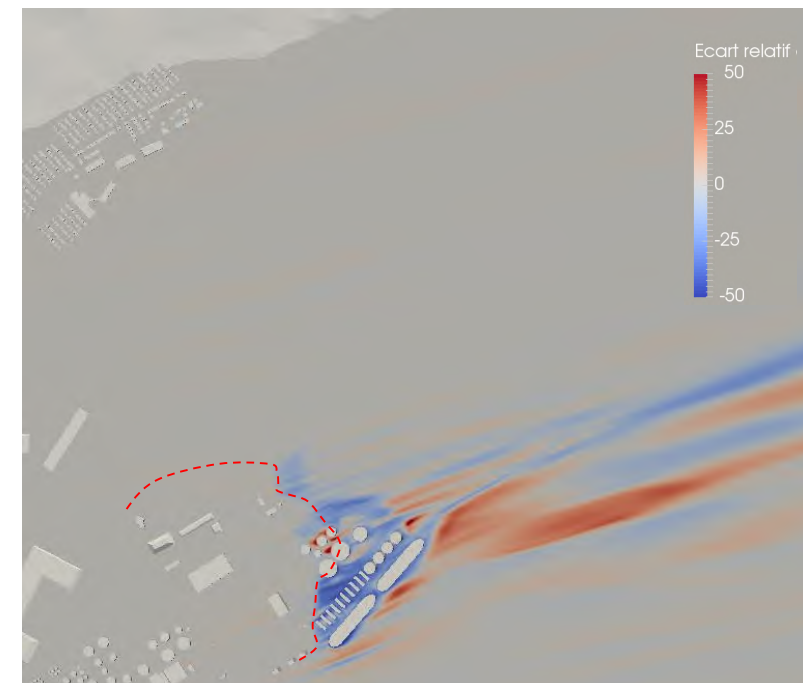
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de la pleine mer supérieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

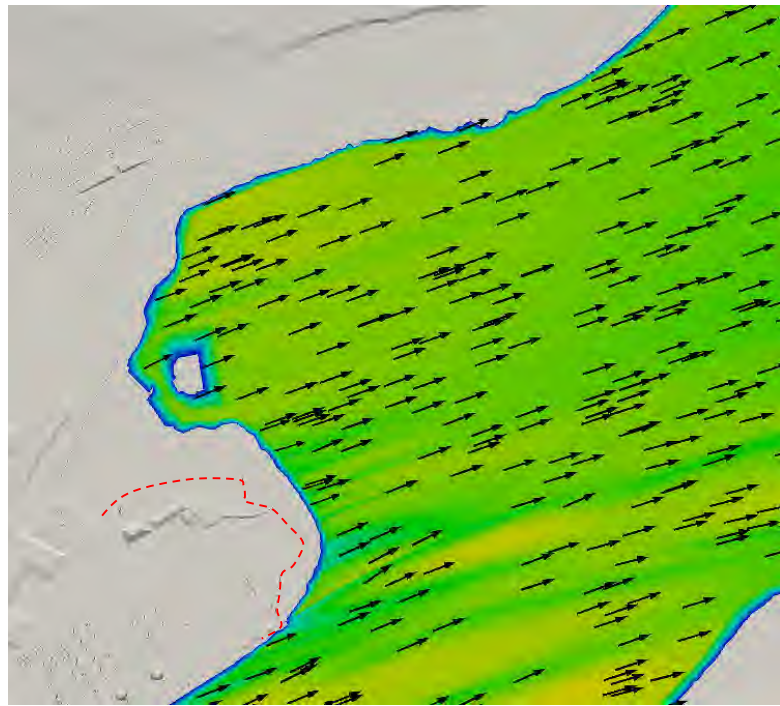


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

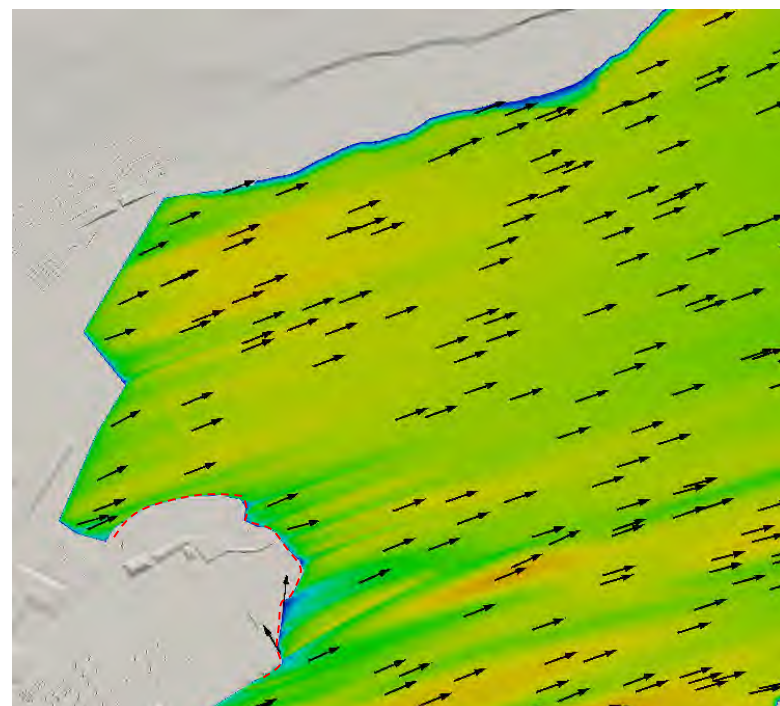
TITRE: Résultats par vent de secteur OSO –
Écarts relatifs– niveau PMSMM- brise-
lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

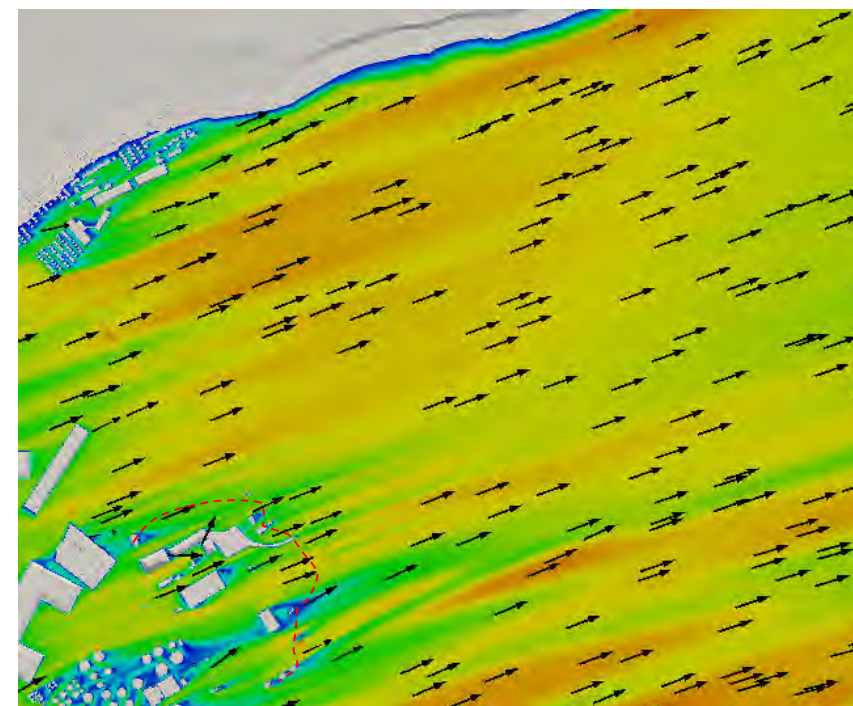
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 38
------------------------	-----------------------



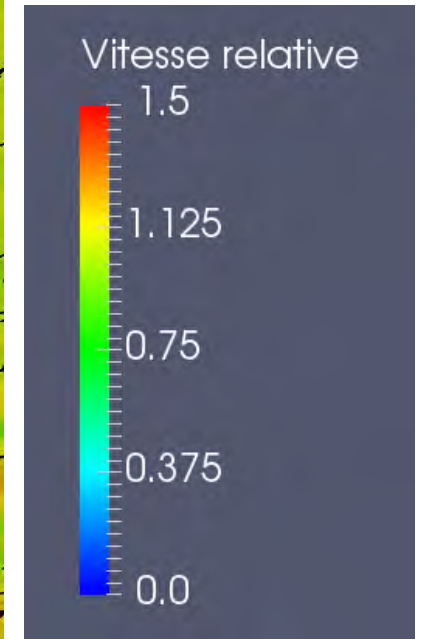
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

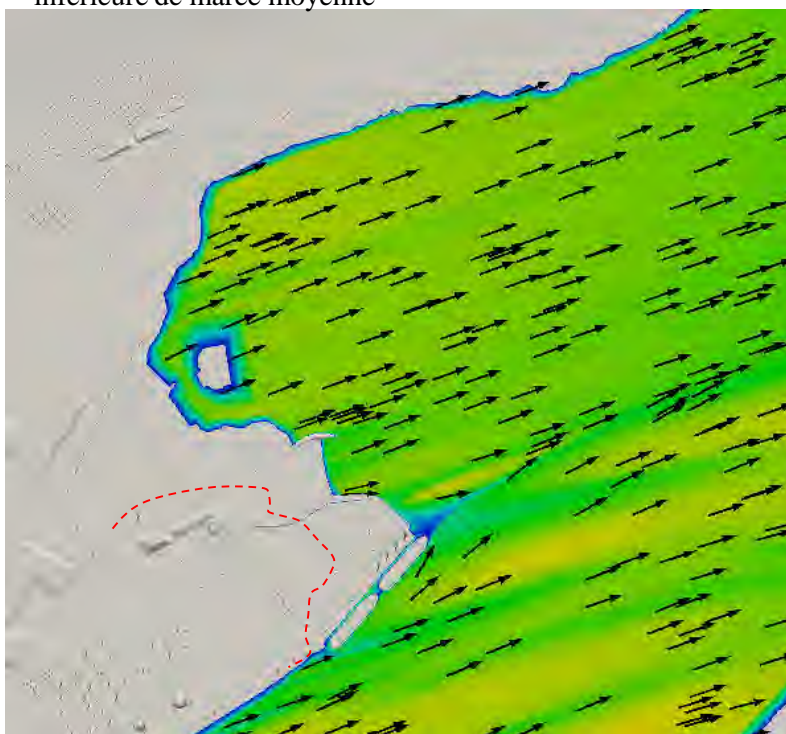


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

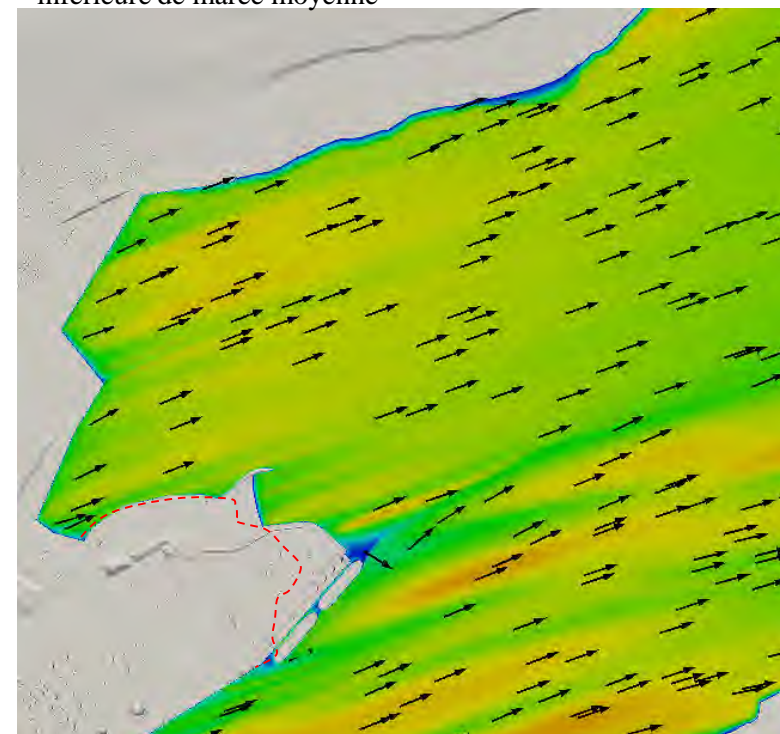


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

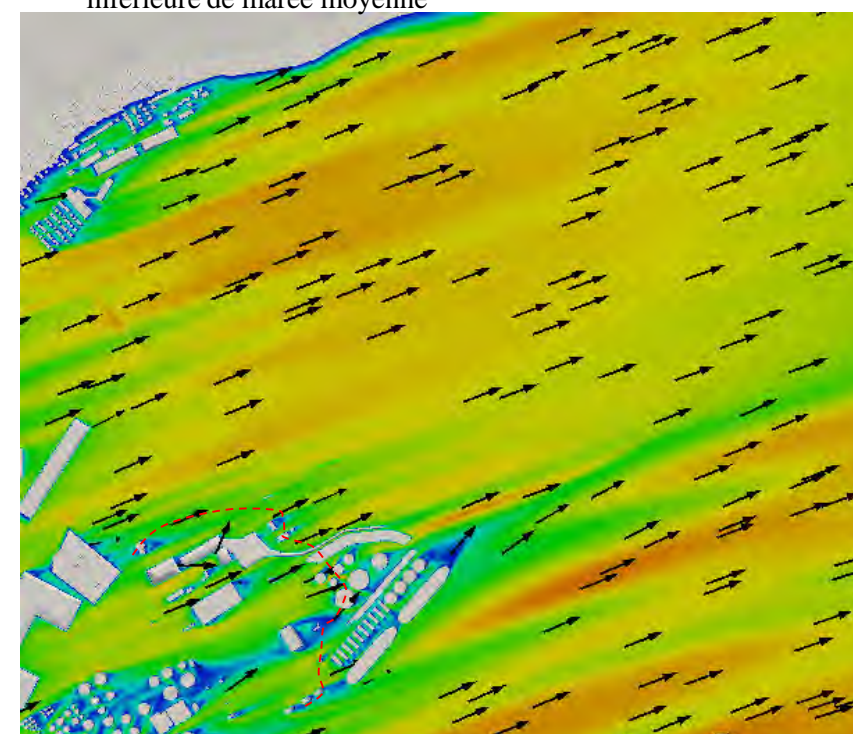
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :

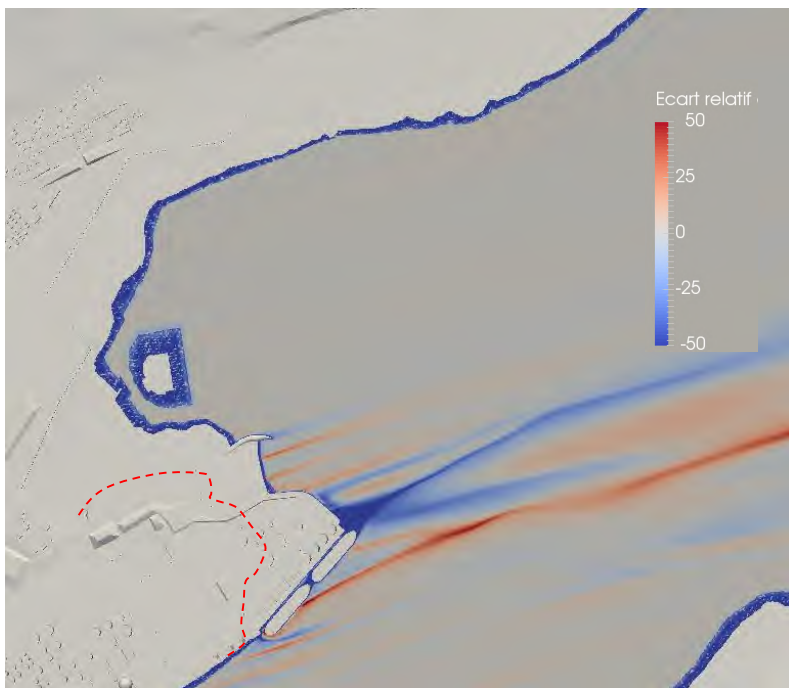
PORT QUÉBEC

PROJET: **PORT DE QUÉBEC**
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

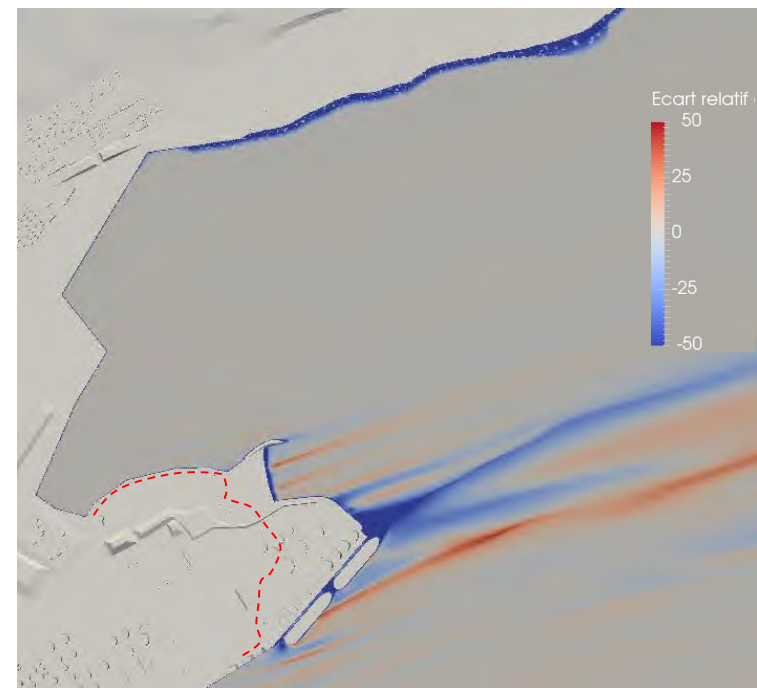
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Vitesses relatives – niveau BMIMM-
brise-lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

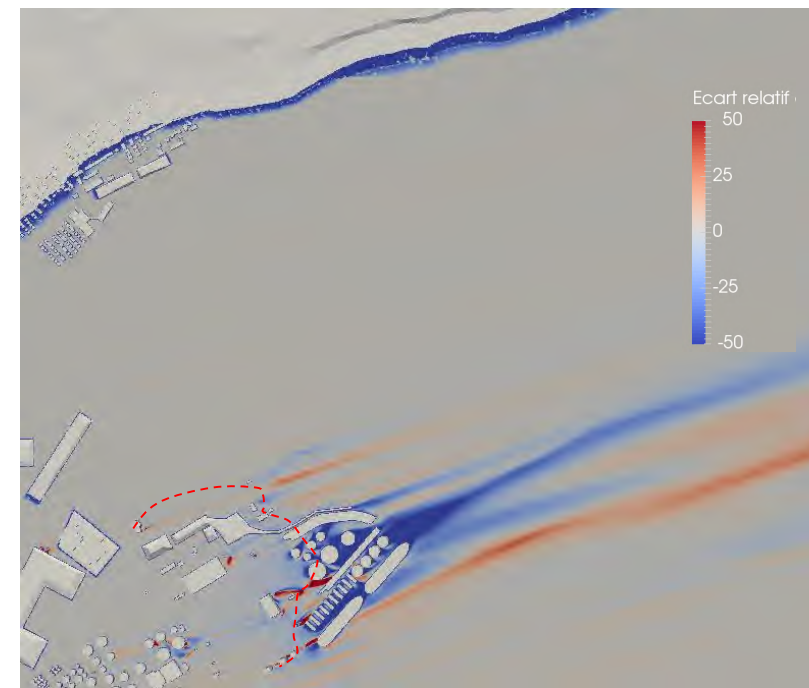
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 39
------------------------	-----------------------



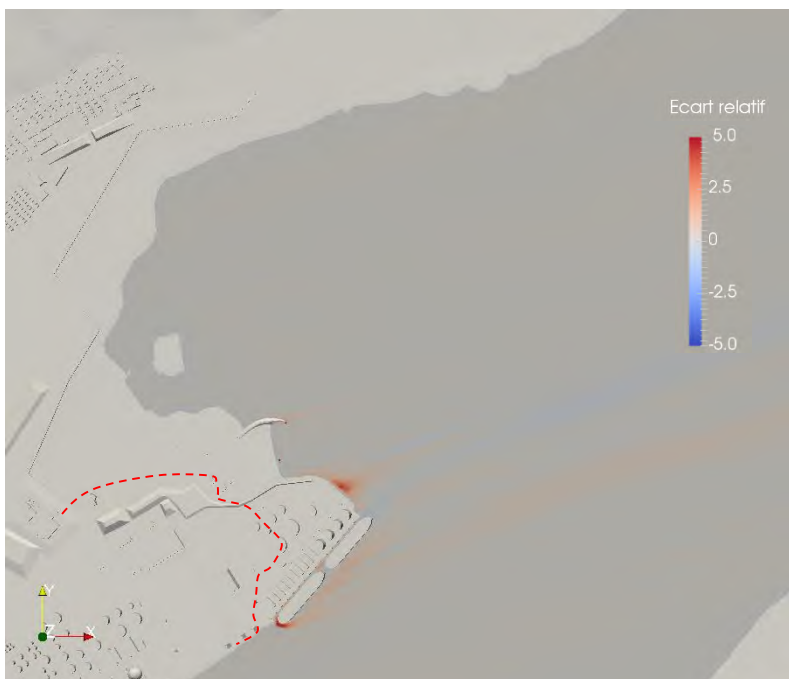
a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



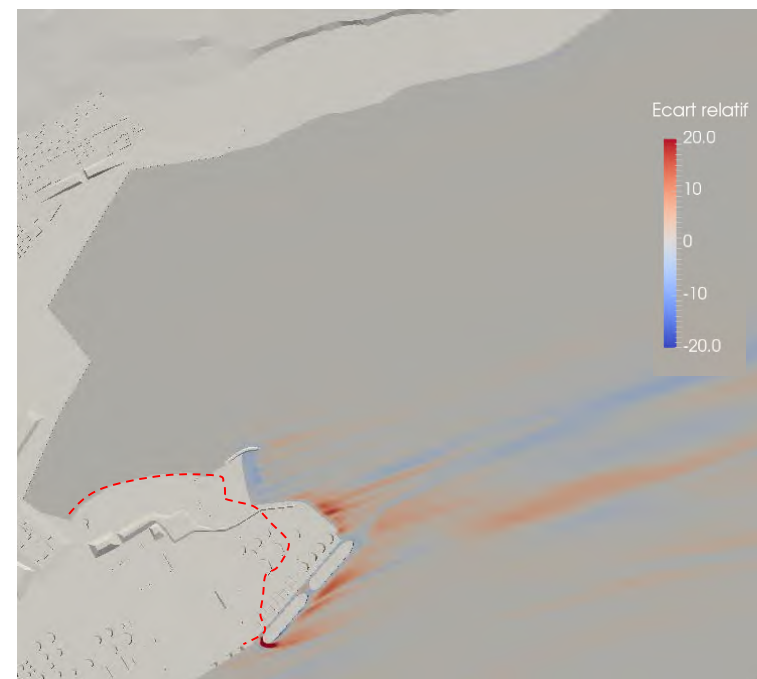
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



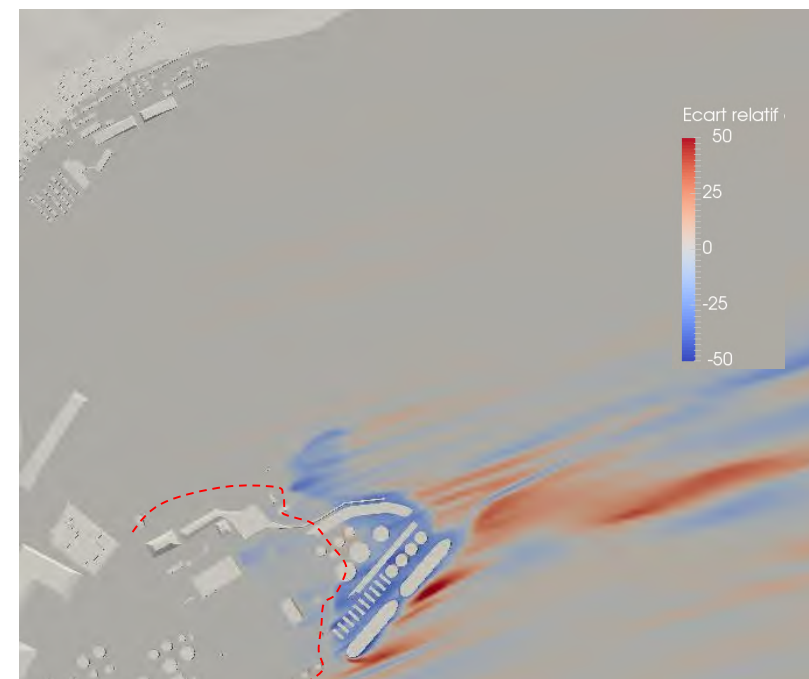
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

lasalle nhc

CLIENT :

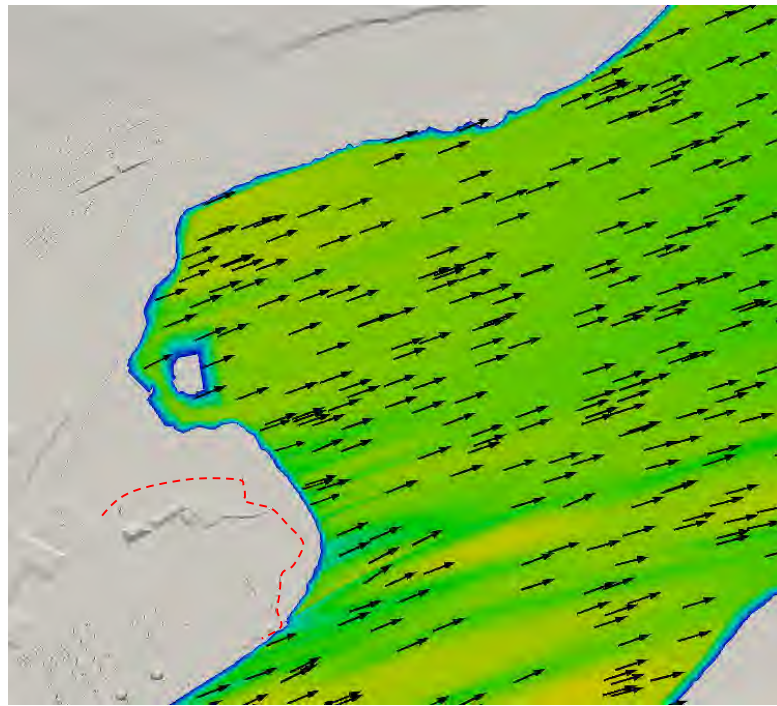


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

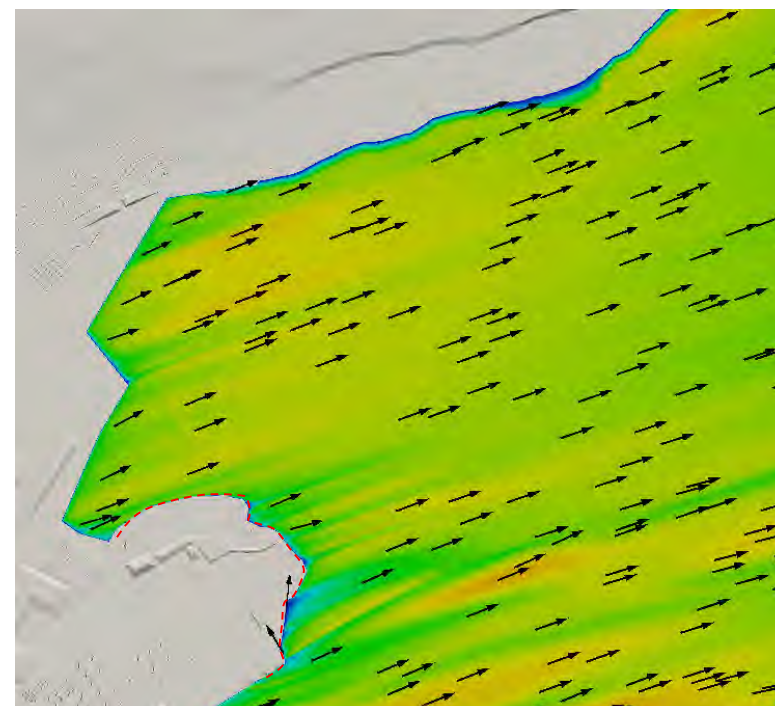
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Écarts relatifs– niveau BMIMM- brise-
lame conventionnel

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

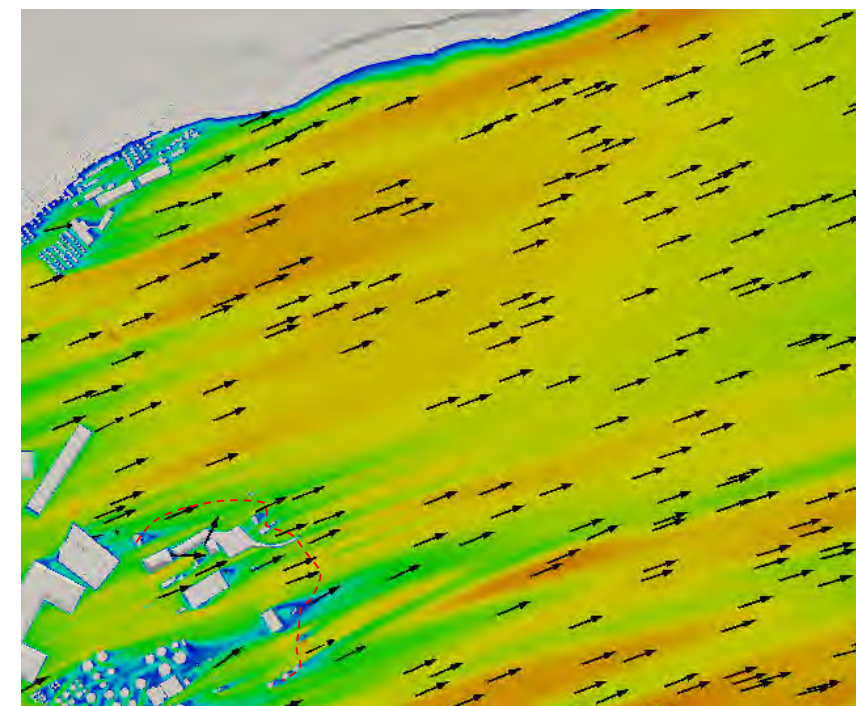
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 40
------------------------	-----------------------



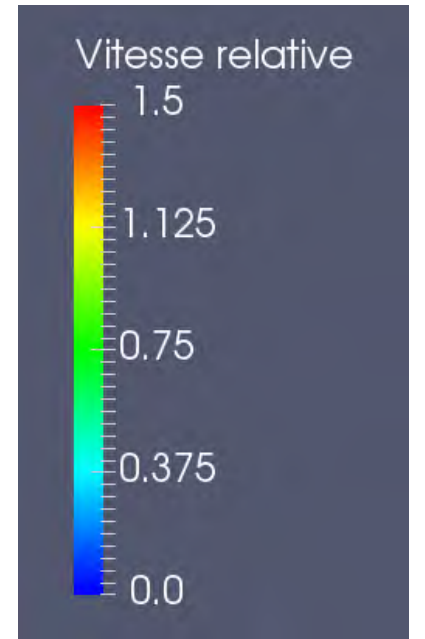
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

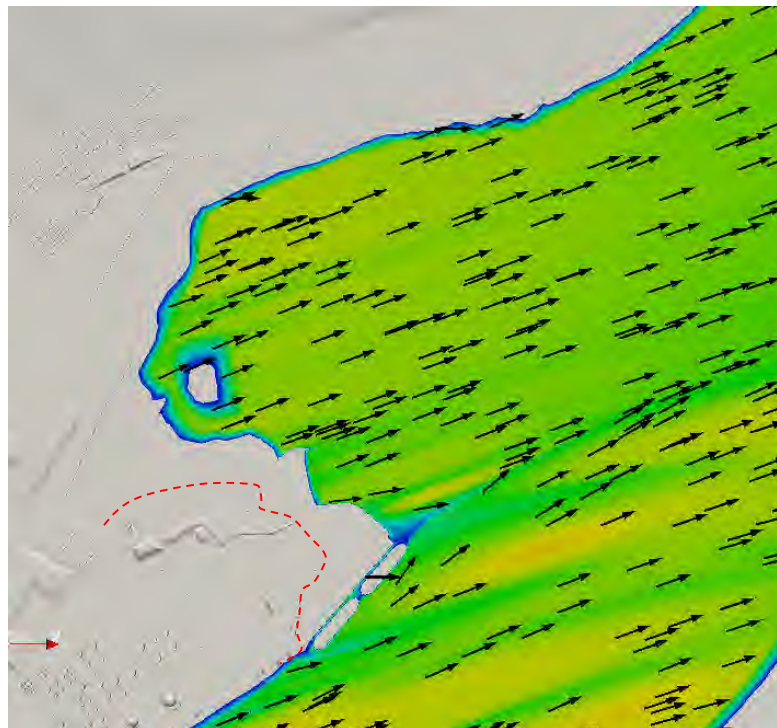


a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

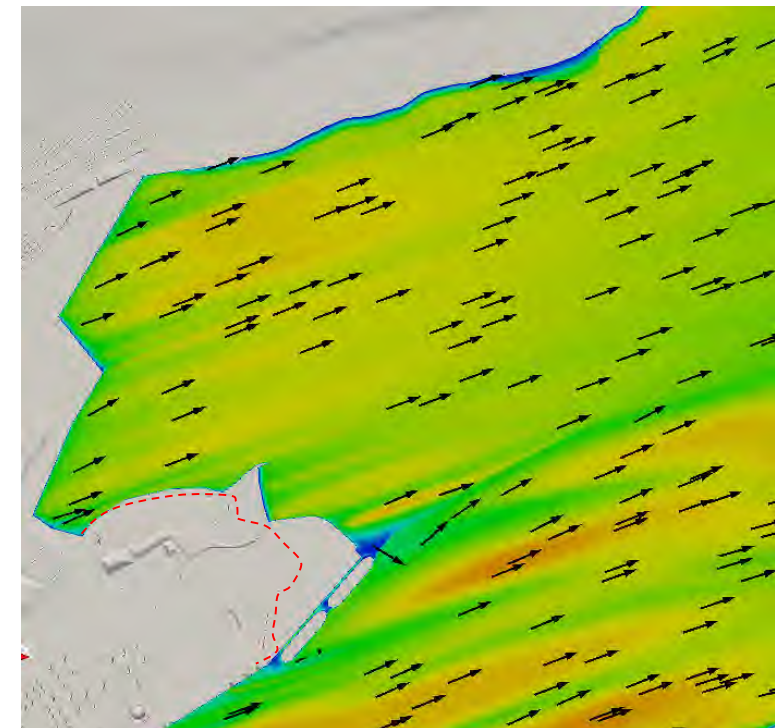


Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

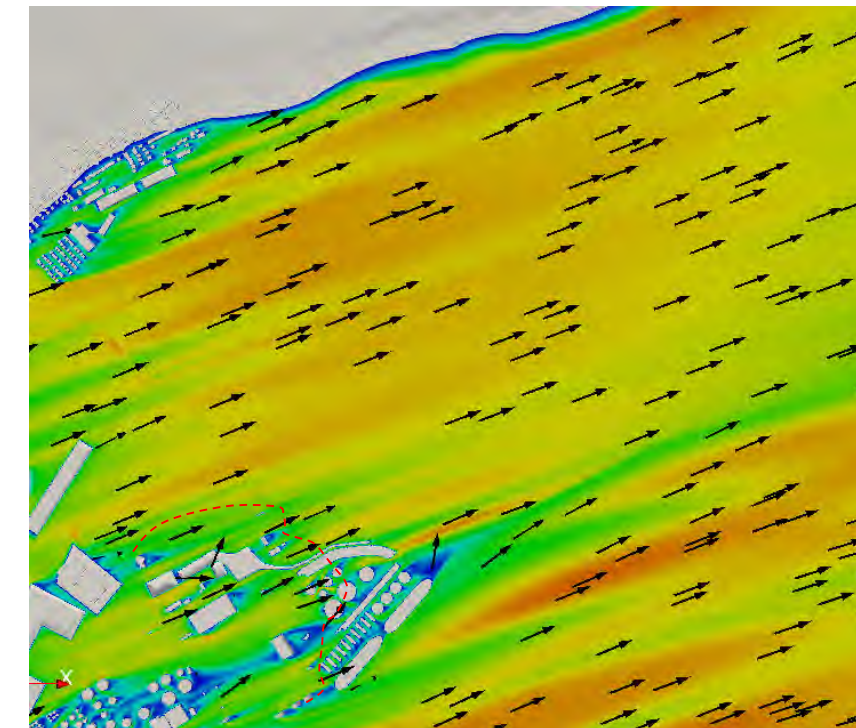
$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

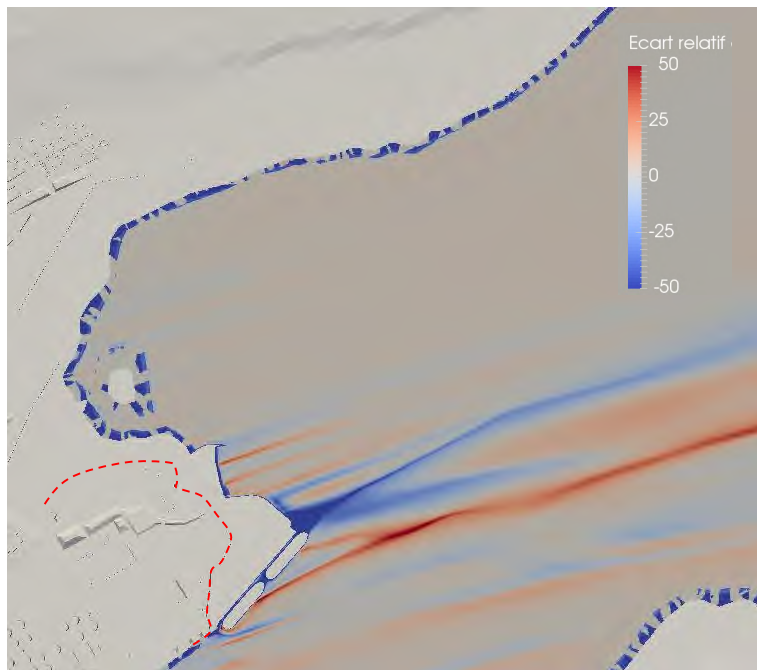
PORT
QUÉBEC

PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

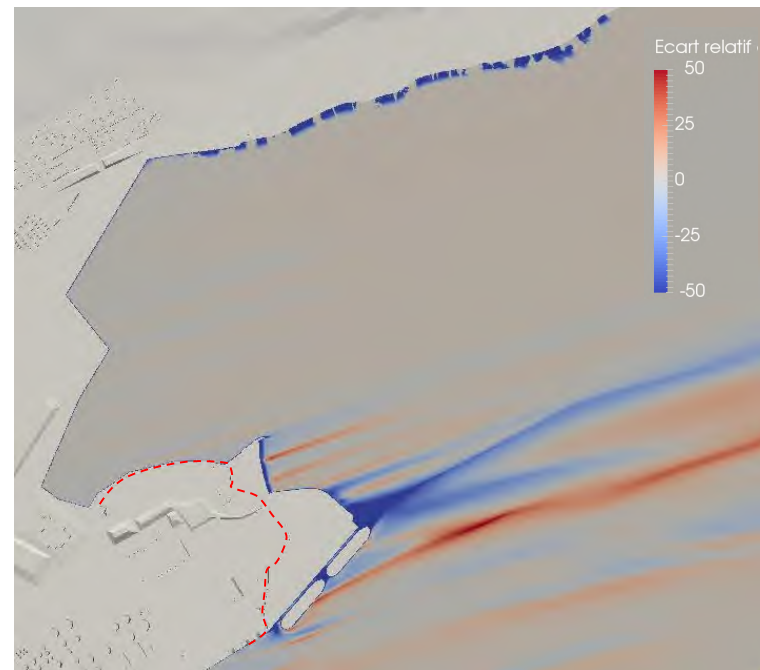
TITRE : Résultats par vent de secteur OSO –
Vitesses relatives – niveau BMIMM-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

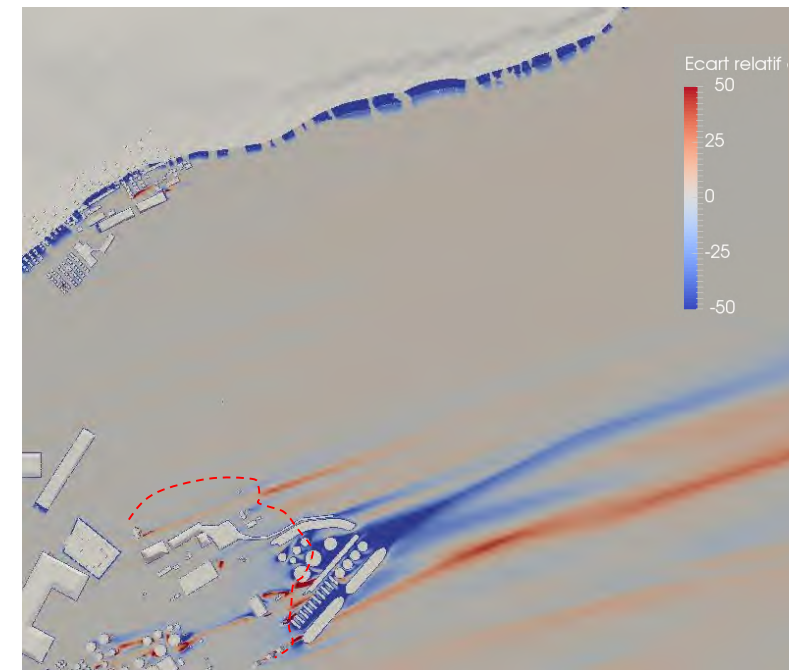
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 41
------------------------	-----------------------



a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



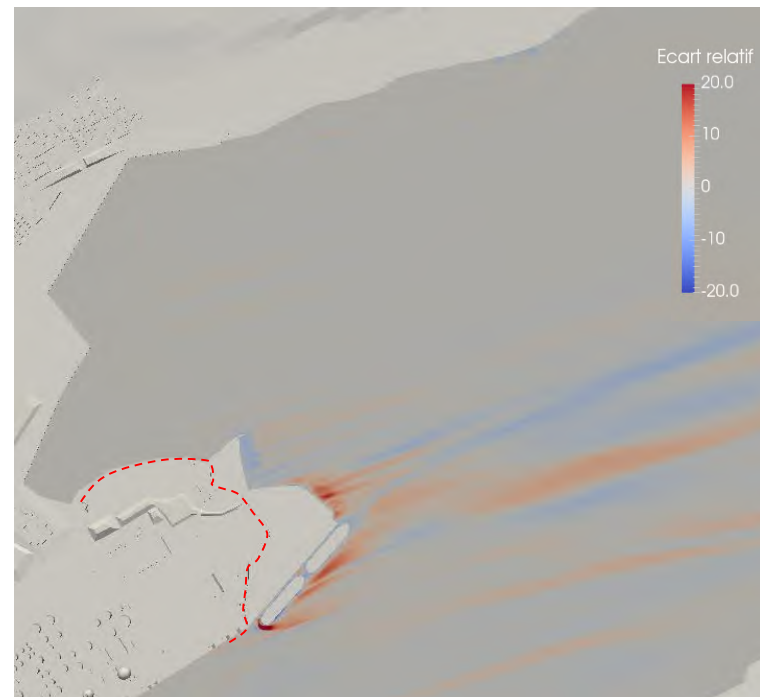
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



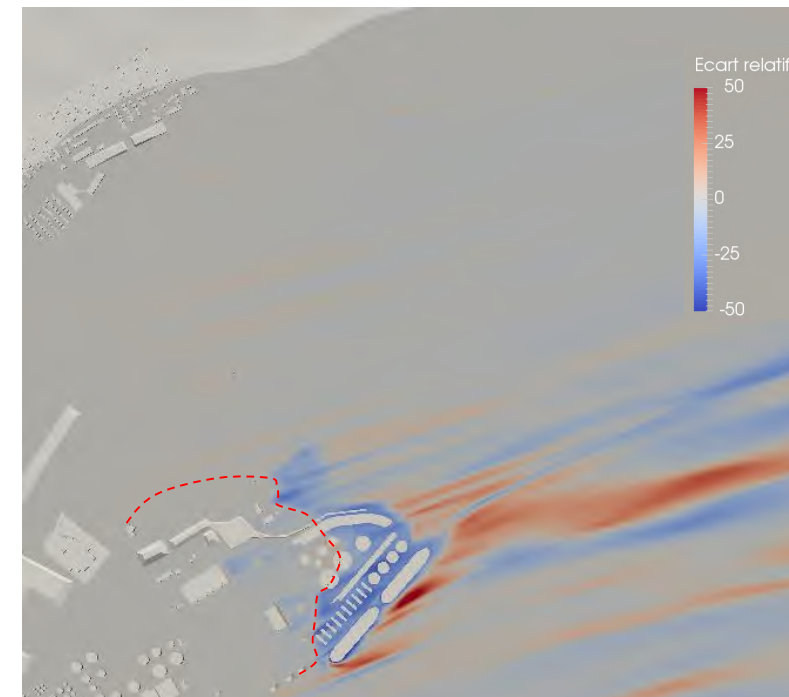
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau de basse mer inférieure de marée moyenne

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :

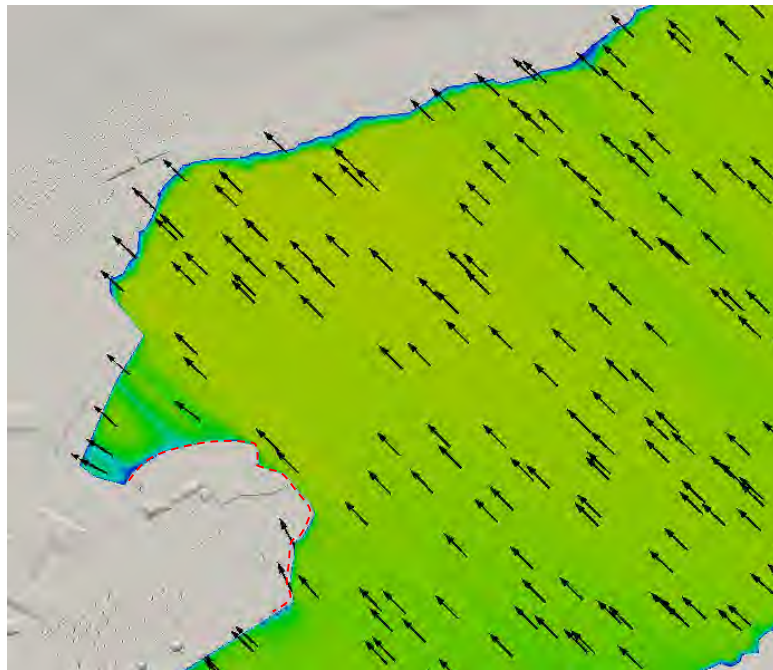


PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

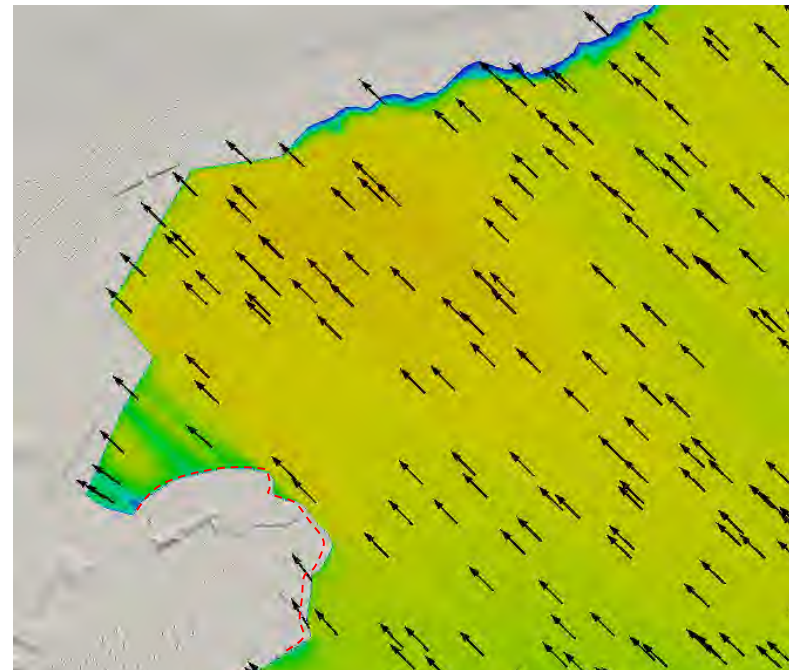
TITRE: Résultats par vent de secteur OSO –
Écarts relatifs– niveau BMIMM- brise-
lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

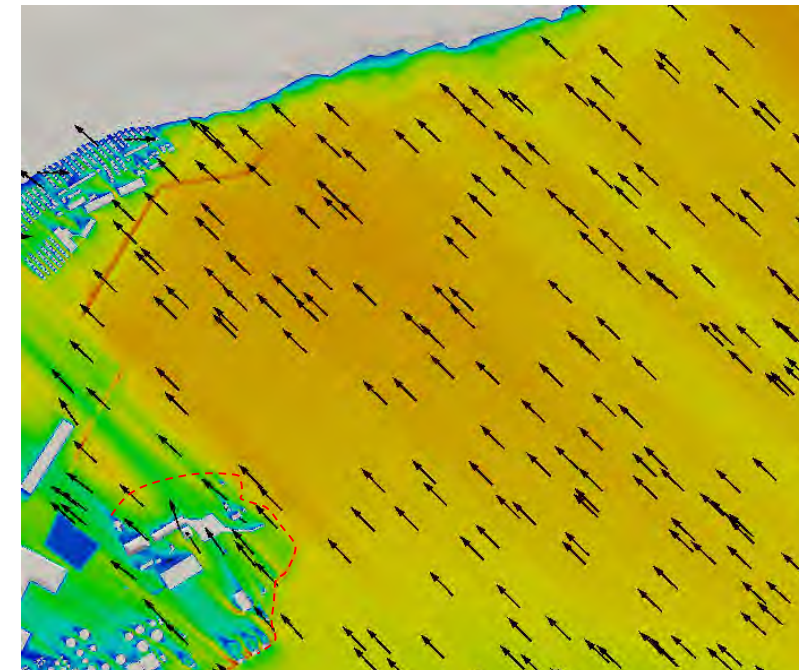
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 42
------------------------	-----------------------



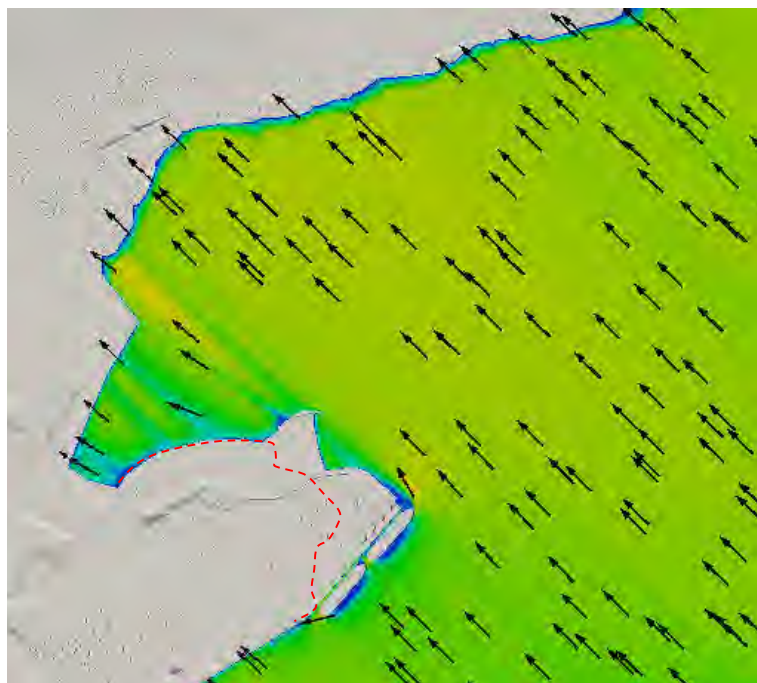
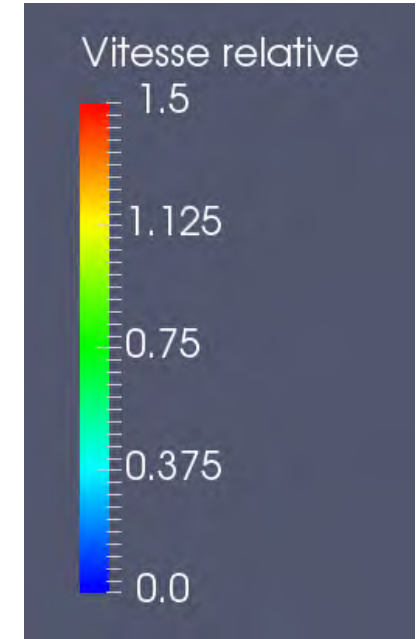
a1) État actuel – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



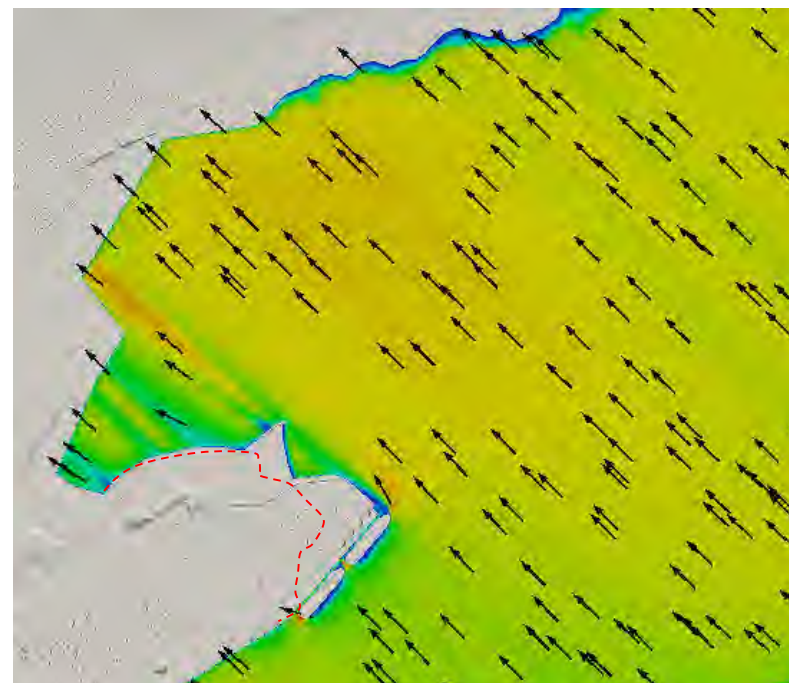
a2) État actuel – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



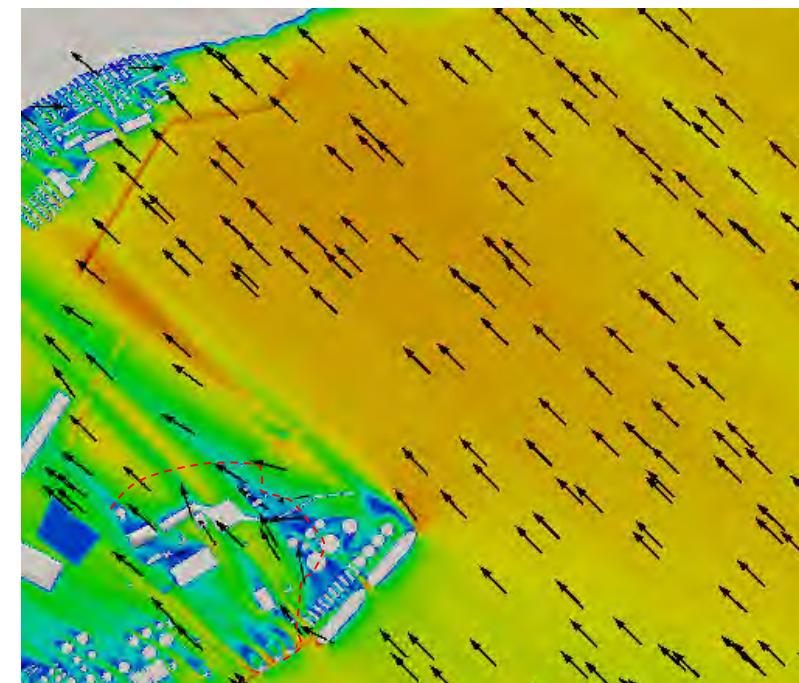
a3) État actuel – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b1) État futur – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) État futur – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) État futur – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

Vitesse relative (U_{rel}):
Rapport entre la vitesse en un point du domaine et la vitesse à la station référence à 10 m sol. Paramètre sans dimension.

$$U_{rel} = \frac{U}{U_{10}}$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle **nhc**

CLIENT :



PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

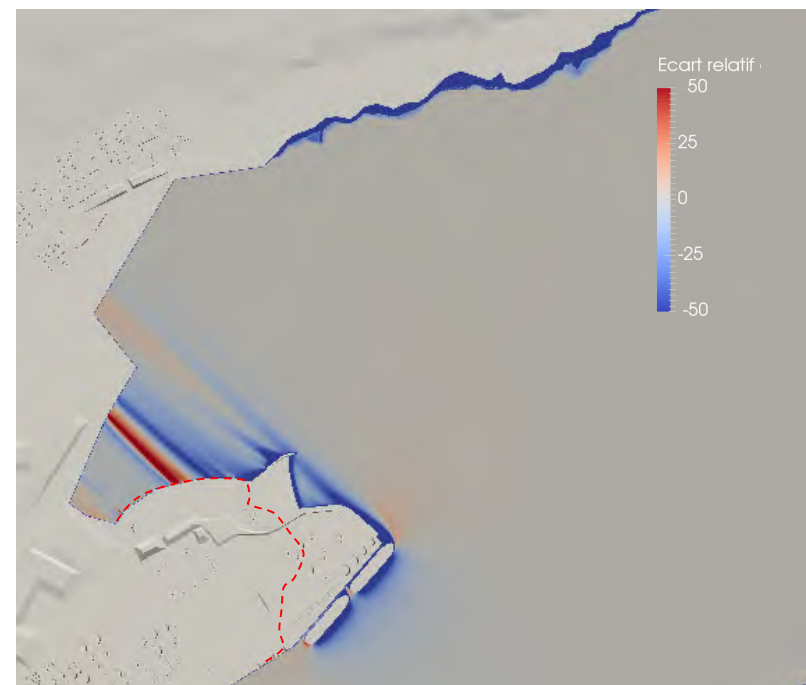
TITRE : Résultats par vent de secteur SE –
Vitesses relatives – niveau moyen-
brise-lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

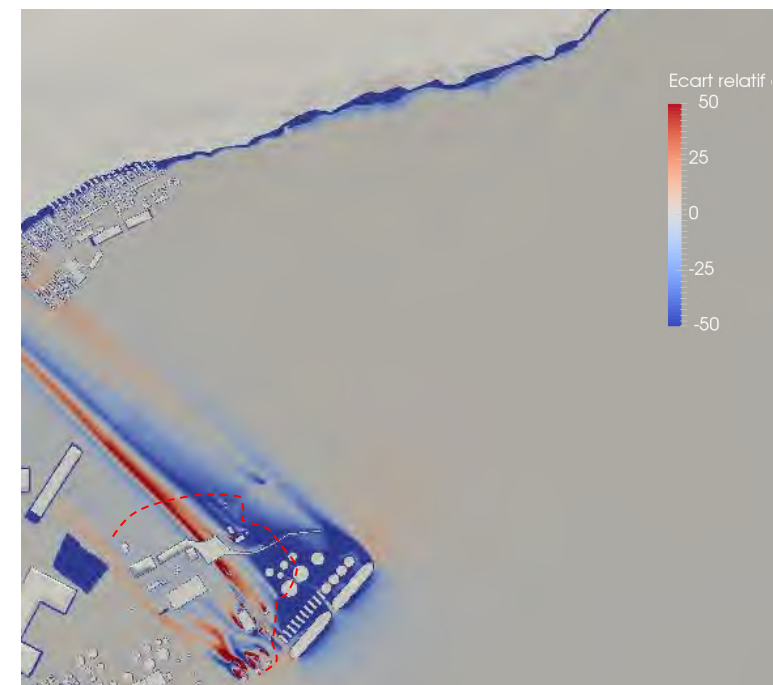
DATE: Décembre 2016	FIGURE : 43
------------------------	-----------------------



a1) Écart relatif de la vitesse – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



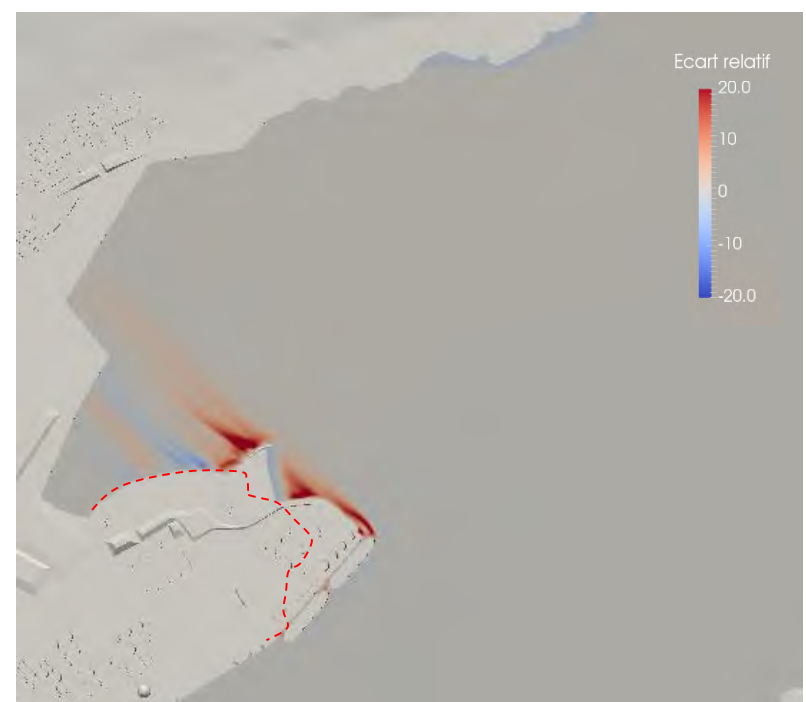
a2) Écart relatif de la vitesse – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



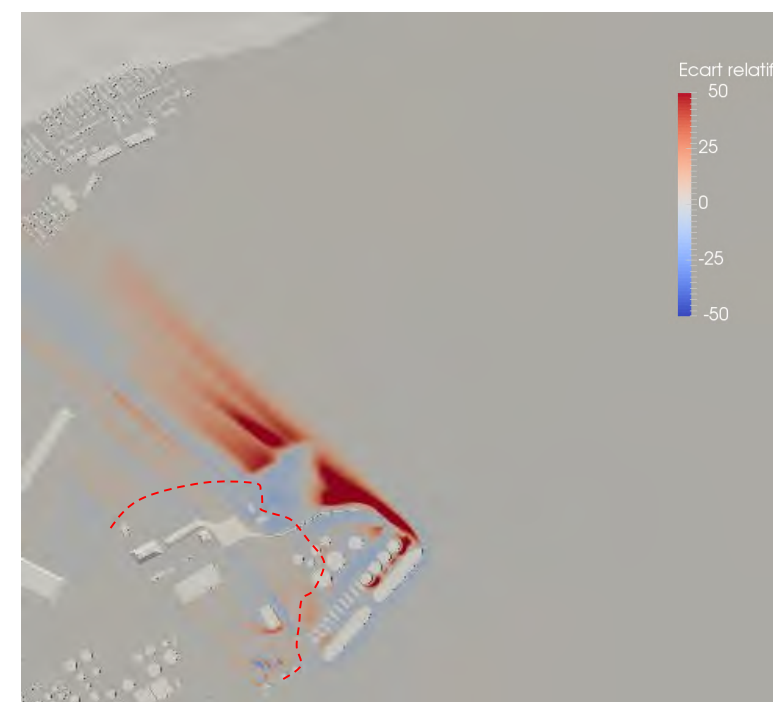
a3) Écart relatif de la vitesse – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b1) Écart relatif de l'intensité turbulente – 1,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b2) Écart relatif de l'intensité turbulente – 4,4 m au-dessus du niveau moyen de marée



b3) Écart relatif de l'intensité turbulente – 9,4 m au-dessus du niveau moyen de marée

Écart relatif de la vitesse (E_u):

Différence entre la vitesse dans l'état futur (U_{futur}) et la vitesse dans l'état actuel (U_{actuel}) rapportée à la vitesse dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_u = 100 \left(\frac{U_{futur} - U_{actuel}}{U_{actuel}} \right)$$

Écart relatif de l'intensité turbulente (E_i):

Différence entre l'intensité turbulente dans l'état futur (I_{futur}) et l'intensité turbulente dans l'état actuel (I_{actuel}) rapportée à l'intensité turbulente dans l'état actuel. Exprimé en pourcentage

$$E_i = 100 \left(\frac{I_{futur} - I_{actuel}}{I_{actuel}} \right)$$

----- Limite actuelle de la pointe de Beauport

lasalle nhc

CLIENT :



PROJET: PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Modélisation numérique des impacts éoliens

TITRE: Résultats par vent de secteur SE –
Écarts relatifs– niveau moyen- brise-
lame submersible

PRÉPARÉ PAR : G.L.	REF. CLIENT : -----	REF. LASALLE : 8002189
-----------------------	------------------------	---------------------------

DATE: Décembre 2016	FIGURE : 44
------------------------	-----------------------

Annexe B Rapport technique – Nouvelles variantes d'aménagement des plages (Lasalle | NHC, 2016b)



PORT DE QUÉBEC EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT NOUVELLES VARIANTES D'AMÉNAGEMENT DES PLAGES

RAPPORT TECHNIQUE

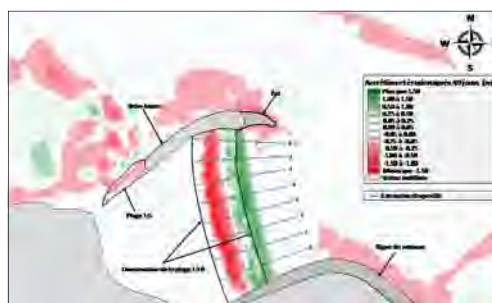
No 0057



Préparé pour:



Administration portuaire de Québec



10 février 2016

Réf. Lasalle | NHC no 08001443

**PORT DE QUÉBEC
EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
NOUVELLES VARIANTES D'AMÉNAGEMENT DES PLAGES**

RAPPORT TECHNIQUE

R.0057

Préparé pour:

Administration portuaire de Québec

Préparé par:

Lasalle | NHC & Consultants Ropars, Inc.

10 février 2016

No de référence Lasalle | NHC 008001443

Préparé par:

<original signed by>

Yann Ropars, ing., M. Sc. OIQ 34863
Consultants CRI

<original signed by>

Marc Villeneuve, ing., M. ing. OIQ 46139
Président, Lasalle | NHC

<original signed by>

Nicolas Gallant, ing. Jr., M. ing. OIQ 5047189
Ingénieur junior, Lasalle | NHC

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ.

Ce document a été préparé par Lasalle|NHC et Consultants Ropars Inc de façon conforme aux bonnes pratiques d'ingénierie et est destiné à l'usage exclusif de l'Administration portuaire de Québec. Le contenu de ce document ne peut être appliqué ou utilisé, en tout ou en partie, par ou à l'avantage d'autres parties sans l'autorisation écrite de Lasalle|NHC. Aucune autre garantie, expresse ou tacite, n'est accordée.

Lasalle|NHC et ses directeurs, associés, employés et mandataires n'assument aucune responsabilité à l'utilisation ou au recours du présent document ou de son contenu par des parties autres que **l'Administration portuaire de Québec.**

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION	1
1.1	Mise en contexte	1
1.2	Objectifs de la présente étude	2
2	DOCUMENTATION.....	3
2.1	Relevés bathymétriques	3
2.2	Plans des infrastructures	3
2.3	Données sur les tempêtes	4
2.4	Géométrie de plage et évolution temporelle des profils	4
2.5	Paramètres fournis par l'APQ.....	4
3	GÉOMÉTRIES DE PLAGE ÉVALUÉES	5
3.1	Option V15-01	5
3.2	Option V15-02	6
3.3	Option V15-03	7
3.4	Option V15-04	8
3.5	Option V15-05	9
3.6	Option V15-06	10
4	MODÉLISATION NUMÉRIQUE.....	11
4.1	Outils de modélisation.....	11
4.1.1	Module hydrodynamique - MIKE 21 FM	11
4.1.2	Module de vagues - MIKE 21 SW.....	11
4.1.3	Module de transport sédimentaire - MIKE 21 ST.....	11
4.2	Zone modélisée	12
4.3	Numérisation de la bathymétrie	12
4.4	Conditions aux limites	17
4.5	Paramètres de calculs.....	17
4.5.1	Paramètres hydrodynamiques	17
4.5.2	Paramètres de vagues	17
4.5.3	Paramètres de transport sédimentaire	18
5	ÉTUDE HYDROSÉDIMENTOLOGIQUE.....	19
5.1	Option V15-05	19
5.2	Option V15-06	19
6	RENRANT SUD-OUEST	24
6.1	Situation actuelle	24
6.2	Zone protégée par le brise-lames.....	24
6.3	Effet du brise-lames sur le rentrant sud-ouest.....	26
6.3.1	Sédiments	26
6.3.2	Végétation de marais	26

TABLE DES MATIÈRES (suite)

7	COURANTS DANS LA BAIE	27
7.1	Courants de marée	27
7.2	Courants dus aux vagues	27
7.3	Sécurité des usagers de la plage de baignade	28
7.4	Qualité de l'eau.....	28
8	CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS.....	33
8.1	Conclusion	33
8.2	Recommandations.....	33

Annexe A – Géométrie de la plage recommandée

Annexe B - Prévion de hausse des niveaux d'eau en fonction des changements climatiques

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Extension portuaire – Zone récréotouristique – Volume 400 000 m ³	2
Figure 2.1 : Zone couverte par les relevés bathymétriques de 2013	3
Figure 3.1 : Option V15-01	5
Figure 3.2 : Option V15-02	6
Figure 3.3 : Option V15-03	7
Figure 3.4 : Option V15-04	8
Figure 3.5 : Option V15-05	9
Figure 3.6 : Option V15-06	10
Figure 4.1: Données utilisées dans le montage de la bathymétrie numérique	14
Figure 4.2: Bathymétrie numérique.....	15
Figure 4.3: Maillage de la bathymétrie numérique	16
Figure 5.1 : Résultats de l'évaluation hydrosédimentologique de l'option V15-05	20
Figure 5.2 : Évolution des profils de la plage de l'option V15-05	21
Figure 5.3: Résultats de l'évaluation hydrosédimentologique de l'option V15-06	22
Figure 5.4: Évolution des profils de la plage de l'option V15-06	23
Figure 6.1: Mouvements du sable sur la plage actuelle	24
Figure 6.2 : Rentrant sud-ouest et brise-lames proposé (V15-06) – Rose des vents.....	25
Figure 6.3 : Rentrant sud-ouest et brise-lames proposé (V15-06) – Rose des vagues	26
Figure 7.1 : Courants maximums de flot en marée de vive-eau (marnage 4,53 m)	29
Figure 7.2 : Courants maximums de jusant en marée de vive-eau (marnage 4,53 m).....	30
Figure 7.3: Courants littoraux induits par les vagues de tempêtes – Conditions actuelles.....	31
Figure 7.4: Courants littoraux induits par les vagues de tempêtes – Conditions futures (option V15-06)	32

1 INTRODUCTION

1.1 Mise en contexte

L'Administration portuaire de Québec (APQ) poursuit actuellement son projet d'extension du secteur Beauport, avec la mise en place de deux nouveaux quais (54 et 55). Au-delà des enjeux touchant directement les besoins et objectifs du port de Québec, ce projet comprend un volet récréotouristique avec la consolidation de la plage.

Au cours des dernières années, Lasalle | NHC a été étroitement lié aux études d'optimisation de la nouvelle extension, pour tout ce qui touche les conditions hydrauliques et sédimentologiques qui seront observées aux abords de l'aménagement projeté.

En décembre 2014, Lasalle | NHC a remis à l'APQ un rapport d'étude comportant l'analyse d'une variante correspondant à un volume de remblai maximal de 400 000 m³ pour la zone récréotouristique¹.

La figure 1 illustre l'aménagement initialement proposé par l'APQ pour respecter ce volume, de même que les variantes examinées lors de notre étude en vue de minimiser les risques d'érosion de la plage.

Ayant progressé dans le processus d'évaluation environnementale de l'extension portuaire, l'APQ désire aujourd'hui réduire le volume de remblai et, par conséquent, l'empiétement dans le milieu hydrique correspondant au secteur récréotouristique.

La présente étude porte sur la mise au point d'un nouvel aménagement limitant si possible à 100 000 m³ le volume de remblai de la zone récréotouristique.

Comme pour les dernières études de l'extension du secteur Beauport réalisées par Lasalle | NHC, la présente étude a été effectuée en étroite collaboration avec M. Yann Ropars, de la firme Consultants Ropars Inc. (CRI).

Le rapport comporte huit sections. La section 2 présente les données et paramètres ayant servi de base à la présente étude. Les nouvelles variantes d'aménagement considérées sont décrites à la section 3. La section 4 présente les outils et paramètres de modélisation utilisés pour la présente étude et la section 5 traite des résultats obtenus pour les deux variantes d'aménagement les plus prometteuses. Pour la variante retenue, les sections 6 et 7 décrivent respectivement les résultats obtenus dans le rentrant sud-ouest et la baie de Beauport en présence des aménagements projetés. Les conclusions et recommandations de l'étude sont présentées à la section 8.

1 DENAULT, C., M. VILLENEUVE ET N. GALLANT, « Port de Québec – Extension du secteur Beauport – Mise au point de la variante finale des plages - Modélisation des conditions hydrosédimentologiques », Rapport no 1873 (version préliminaire) réalisé pour le compte de l'Administration Portuaire de Québec, Décembre 2014

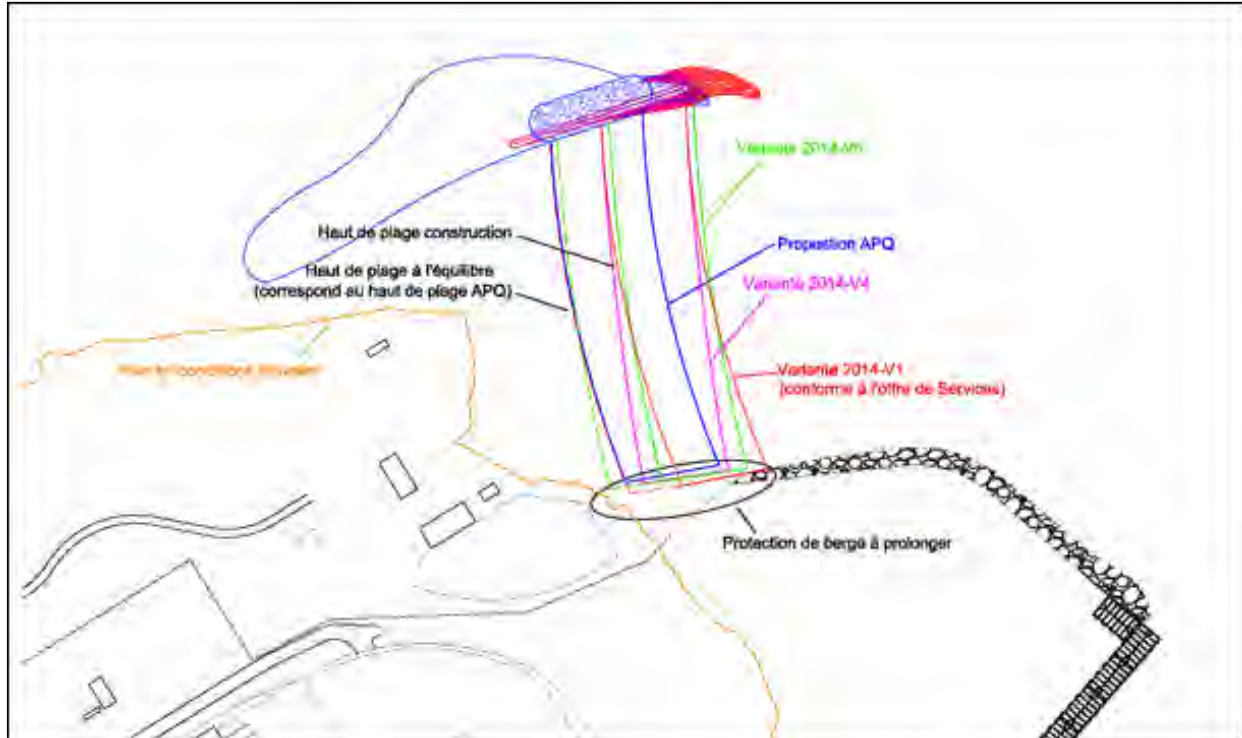


Figure 1.1 : Extension portuaire – Zone récréotouristique – Volume 400 000 m³
 (Source : Figure 32, Rapport Lasalle | NHC no 1873)

1.2 Objectifs de la présente étude

Les objectifs de l'étude confiée par l'APQ à Lasalle | NHC sont de :

- Développer un concept de plage de baignade stable;
- Réduire les besoins de recharges récurrentes;
- Répondre le plus possible aux besoins de la clientèle qui fréquente actuellement le site;
- Éviter l'érosion des berges actuelles.

2 DOCUMENTATION

2.1 Relevés bathymétriques

Des relevés bathymétriques ont été effectués en septembre 2013 pour l'APQ. Ces relevés détaillés ont servi à préciser la topographie et les profondeurs d'eau près des infrastructures. L'étendue de ces relevés est reproduite sur la figure 2.1.

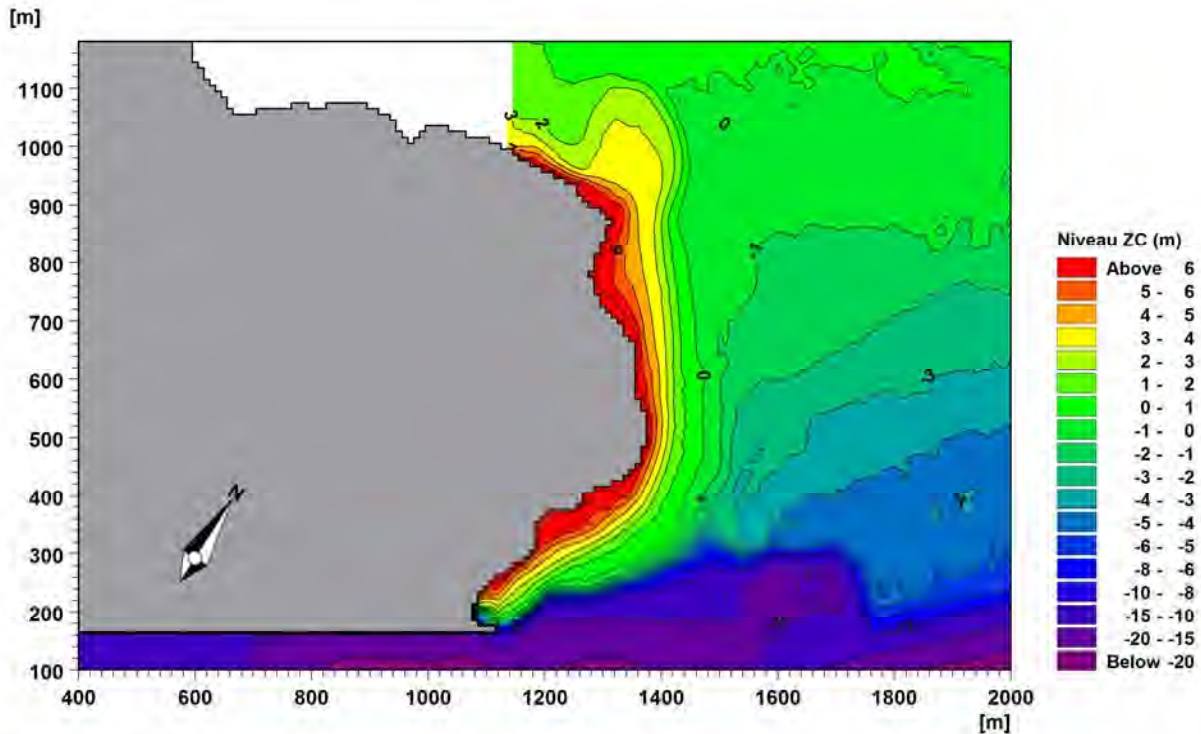


Figure 2.1 : Zone couverte par les relevés bathymétriques de 2013

2.2 Plans des infrastructures

Le plan des infrastructures projetées a été fourni par l'APQ. Il s'agit d'un plan produit par SNC-Lavalin² dans le cadre de leur mandat (extension portuaire).

² SNC-Lavalin, « *Nouvelles infrastructures portuaires – Port de Québec, Secteur de Beauport – Projet No: J-4177* », No de dessin de SNC-Lavalin : 615534-6000-41D2-0001_02

2.3 Données sur les tempêtes

Les informations concernant les tempêtes sont décrites dans le dernier rapport de Lasalle|NHC³.

Deux séries synthétiques de tempêtes ont été développées sur la base des informations provenant d'une étude de vagues⁴ dans le secteur de la baie de Beauport.

Une série « courte » (vent uniforme en intensité et direction, niveau d'eau variable) a servi à tester les premières variantes de plage pour optimiser rapidement la géométrie de ces plages.

Une série « longue » (49 jours de tempêtes extraits de 12 années de données de vent), générée par la succession continue de tempêtes individuelles qui se sont produites dans la baie de Beauport et incluant la marée, a servi à valider les géométries développées dans la première phase des études.

2.4 Géométrie de plage et évolution temporelle des profils

L'étude de 2014 a permis de fixer les grandes lignes d'une plage de baignade stable dans le contexte hydrosédimentologique de la partie ouest de la baie de Beauport. Les deux éléments importants de ces grandes lignes sont l'orientation de la plage et le recul anticipé de la crête par rapport au profil de construction.

C'est sur la base de ces résultats que les premières ébauches de nouvelles configurations de plage ont été développées, avant de passer à l'étape de modélisation hydrosédimentologique.

2.5 Paramètres fournis par l'APQ

Les concepts de plage développés dans les étapes précédentes visaient à utiliser entre 400 000 et 650 000 m³ de sédiments dragués dans le cadre de la construction des nouveaux quais.

En plus des éléments apparaissant dans la sous-section 1.2, dans le cadre de cette nouvelle série de configurations de plage, deux éléments ont également orienté les choix dans la géométrie des plages, soit :

- Une quantité de sédiment réduite (de 100 000 à 250 000 m³) par rapport à l'étude de 2014;
- Le souci de préserver les herbiers du rentrant sud-ouest en évitant que le sable de la plage de kitesurf ne vienne « enterrer » ces herbiers, suite au déplacement anticipé de ces sables vers l'ouest sous l'effet des tempêtes dominantes du secteur est (protection du rentrant sud-ouest).

³ DENAULT, C., M. VILLENEUVE ET N. GALLANT, « *Port de Québec – Extension du secteur Beauport – Mise au point de la variante finale des plages - Modélisation des conditions hydrosédimentologiques* », Rapport no 1873 (version préliminaire) réalisé pour le compte de l'Administration Portuaire de Québec, Décembre 2014

⁴ ROPARS, Y., « *Port de Québec – Étude de configuration finale de la plage – Nouvelles infrastructures portuaires – Secteur de Beauport* », Rapport technique final, pour l'Administration portuaire de Québec, Février 2015

3 GÉOMÉTRIES DE PLAGE ÉVALUÉES

3.1 Option V15-01

Les premières options étudiées visaient à vérifier quelle géométrie de plage permettrait de n'utiliser qu'environ 100 000 m³ de sédiments dragués.

Dans l'option V15-01, le brise-lames droit a été aligné avec la pointe nord du site récréotouristique. Une plage de kitesurf a été prévue au nord de la plage de baignade. Le recul anticipé du haut de plage fait en sorte qu'aucune érosion de la rive actuelle n'est attendue si les recharges récurrentes de plage sont effectuées.

Cette option, présentée sur la figure 3.1, requiert environ 235 000 m³ de sédiments. Pour référence, l'option V6b du rapport de 2014 a été montrée (en gris hachuré) sur la figure 3.1.

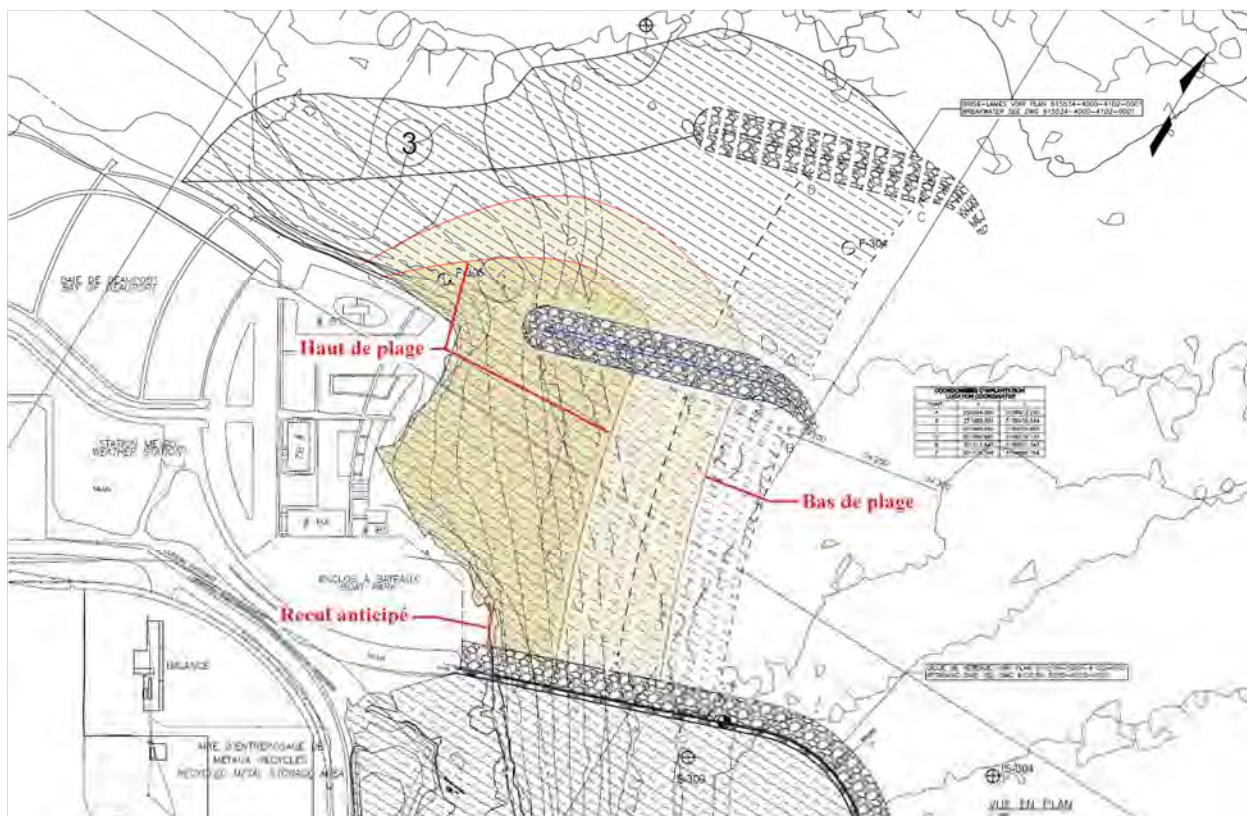


Figure 3.1 : Option V15-01

3.2 Option V15-02

L'option V15-02 (figure 3.2) diffère de l'option V15-01 par la courbure du brise-lames délimitant la partie nord de la plage de baignade. Cette courbure est destinée à améliorer la protection de la plage de kitesurf.

Une autre différence résultant du calcul des quantités de l'option précédente est que l'ensemble de la plage a été déplacée vers l'ouest pour limiter la quantité de sédiments requise dans la construction de la plage.

L'impact de ce recul est que la berge actuelle dans la partie sud de la zone récréotouristique devrait s'éroder, dans le cadre du processus de reprofilage de la plage de baignade, sous l'effet des vagues de tempête.

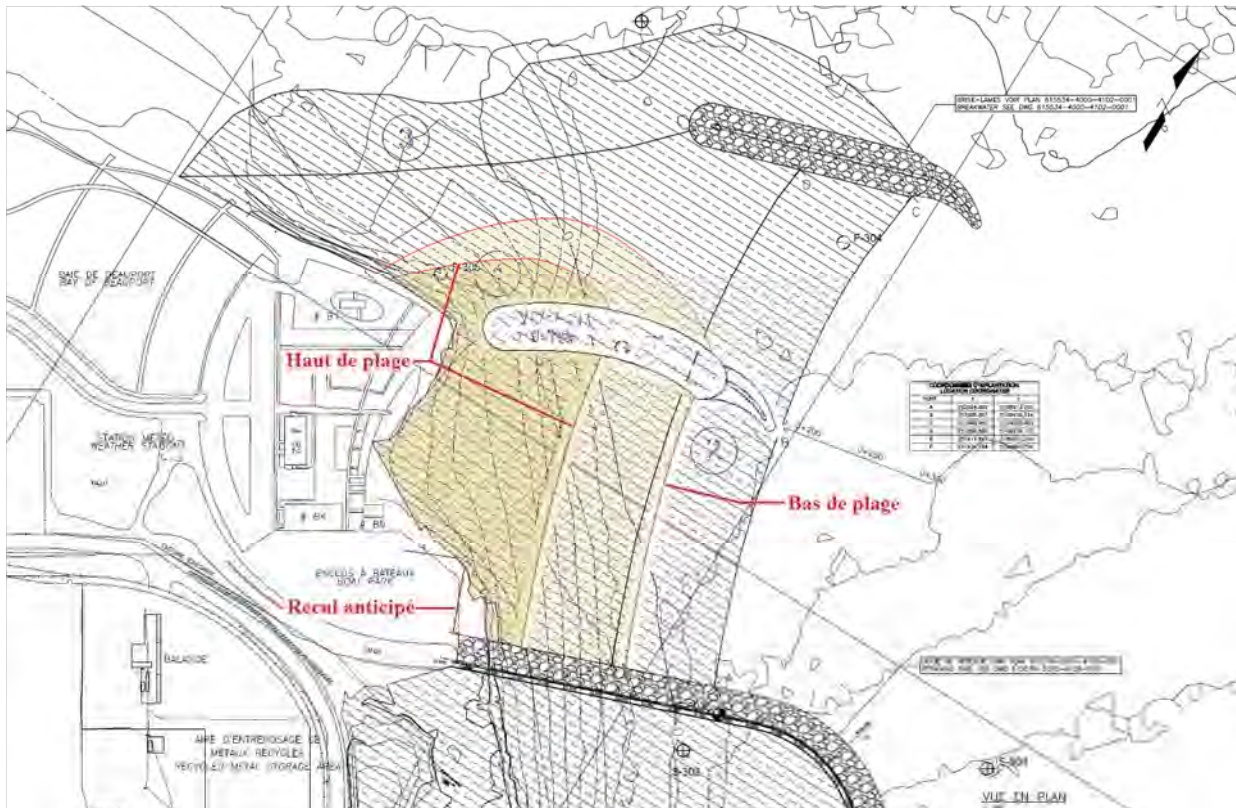


Figure 3.2 : Option V15-02

3.3 Option V15-03

L'option V15-03 a été définie dans le but de s'approcher du nouvel objectif de 100 000 m³ visé pour le projet de plage. Cette option, présentée sur la figure 3.3, requiert environ 120 000 m³ de sédiments.

Les deux impacts importants de ce choix sont :

- d'une part la diminution significative de la largeur de la zone récréotouristique par rapport à sa dimension actuelle et
- d'autre part l'érosion de la partie sud du rivage actuel, près de la digue de retenue des infrastructures portuaires.

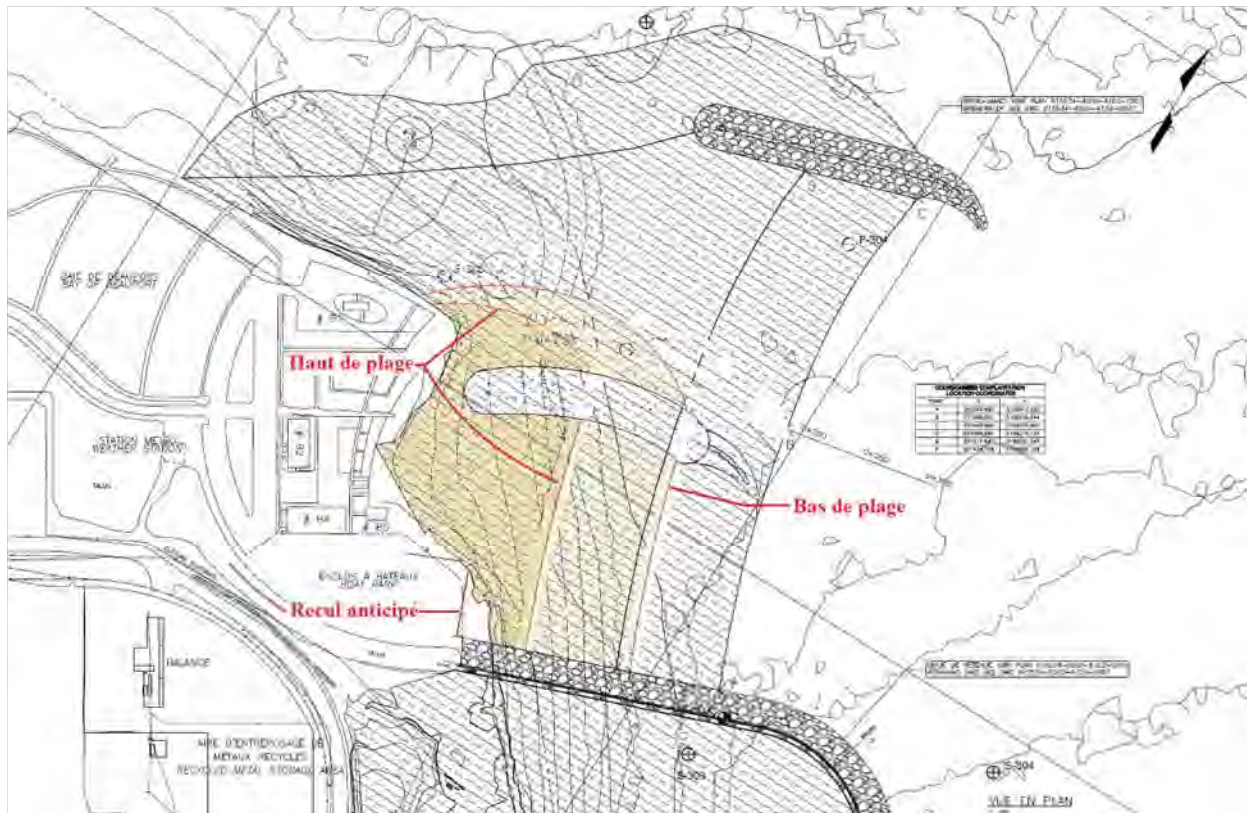


Figure 3.3 : Option V15-03

À la suite de la présentation de ces trois premières options, une discussion a eu lieu avec l'APQ pour définir l'orientation à donner aux prochaines configurations de plage, à la lumière des commentaires faits sur ces premières options.

Une nouvelle préoccupation a été soulevée par l'APQ. La construction de la plage de kitesurf des trois options précédentes devrait provoquer une migration des sables constituant cette plage vers les herbiers du rentrant sud-ouest, ce qui n'est pas recommandé pour la survie de ces herbiers. À la demande de l'APQ, la plage de kitesurf a donc été retirée du projet.

Il a également été décidé, dans un souci d'acceptabilité sociale, que la géométrie de la nouvelle plage ne devait pas donner l'impression d'une diminution de la largeur de la zone récréotouristique actuelle (voir option V15-03) et qu'il était préférable de ne pas provoquer l'érosion de la berge près de la zone d'entreposage des bateaux (options V15-02 et V15-03).

3.4 Option V15-04

L'option V15-04 a été développée pour répondre aux nouvelles orientations données au projet. Le brise-lames a été aligné avec la pointe nord de la zone récréotouristique actuelle. La position de la ligne de recul anticipé du haut de plage devrait provoquer un léger recul (érosion) de l'extrémité sud du rivage de la zone récréotouristique.

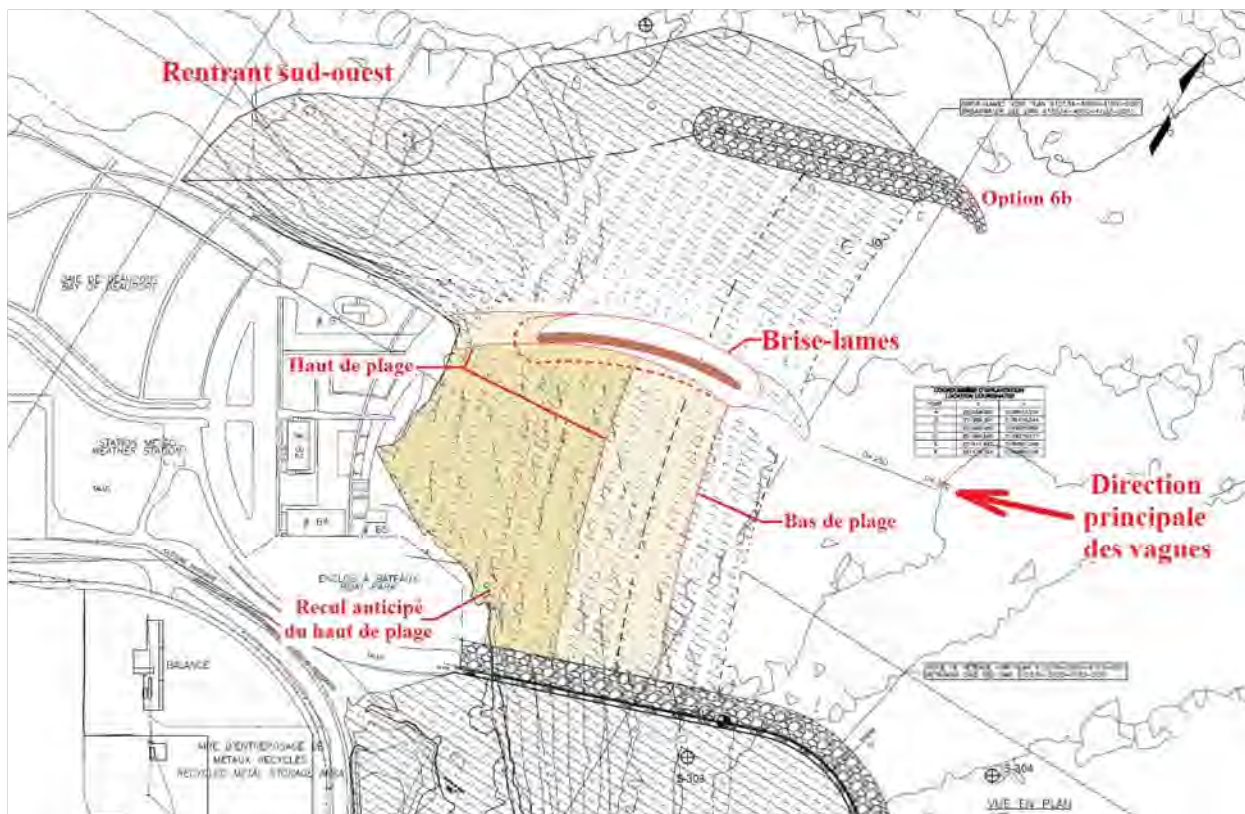


Figure 3.4 : Option V15-04

3.5 Option V15-05

L'option V15-05 présente, par rapport à l'option V15-04, un décalage d'une dizaine de mètres vers l'est de la racine du brise-lames et un pivotement de ce brise-lames dans le sens antihoraire. Cette option, présentée sur la figure 3.6, requiert environ 200 000 m³ de sédiments.

Le décalage vers l'est du brise-lames permet d'éviter l'érosion de la berge actuelle, dans la portion sud de la nouvelle plage.

Le pivotement du brise-lames par rapport à l'option précédente est destiné à éviter de donner l'impression de restreindre la largeur de la zone récréotouristique (effet de couloir entre les deux enrochements).

Cette option a fait l'objet d'une évaluation hydrosédimentologique (voir chapitre 4).



Figure 3.5 : Option V15-05

3.6 Option V15-06

L'option V15-06 a été développée à partir de l'évaluation des résultats de l'étude hydrosédimentologique de l'option V15-05. Le brise-lames a été décalé d'une quinzaine de mètres vers le nord-est par rapport à sa position dans l'option V15-05. Ce décalage entraîne une rotation dans le sens horaire de l'ensemble de la plage de baignade.

Cette option, présentée sur la figure 3.6, requiert environ 220 000 m³ de sédiments.



Figure 3.6 : Option V15-06

4 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

4.1 Outils de modélisation

Tous les travaux de modélisation numérique de la présente étude ont été effectués à l'aide des divers modules du logiciel MIKE 21, conçu et commercialisé par la firme danoise DHI Water & Environment.

4.1.1 Module hydrodynamique - MIKE 21 FM

La modélisation des courants induits par la marée et les vagues (courants littoraux) repose sur le module FM (Flexible Mesh) de MIKE 21. Ce module utilise un maillage flexible aux volumes finis qui permet d'augmenter la résolution de la bathymétrie dans les zones d'intérêt. Celles-ci sont modélisées à l'aide d'un maillage relativement fin tandis que les champs éloignés sont modélisés avec un maillage plus grossier, permettant ainsi d'optimiser les temps de calculs.

Dans le cas présent, d'après les niveaux de marée imposés aux limites de la zone modélisée, le module fournit les valeurs de niveaux et de vitesses d'écoulement intégrées sur la verticale en chacun des points de maillage de la bathymétrie. Le module permet également d'inclure les contraintes de radiation dues aux vagues (calculées à l'aide du module SW - voir section suivante), qui superposent aux courants de marée les courants littoraux le long des plages.

4.1.2 Module de vagues - MIKE 21 SW

La transformation des vagues du large à l'approche du littoral sous l'effet de la réfraction et du déferlement est simulée à l'aide du module SW (Spectral Waves) de MIKE 21. Le module SW intègre les développements les plus récents pour la simulation de la génération et de la transformation des vagues en eaux profondes et côtières. Les simulations permettent de reproduire les phénomènes de réfraction, de dissipation par déferlement et/ou frottement sur le fond, de génération des vagues par le vent, d'interaction non linéaire entre les vagues et d'interaction vagues-courants.

Le module permet d'utiliser des données de vagues au large pré-établies, qui doivent alors être connues grâce à des mesures ou autres données externes, ou de générer des vagues par le vent. La deuxième option a ici été choisie.

4.1.3 Module de transport sédimentaire - MIKE 21 ST

La modélisation du transport sédimentaire associé aux courants et aux vagues est effectuée à l'aide du module ST (Sand Transport) de MIKE 21. En fonction de l'ensemble des forçages hydrodynamiques (courant de marée, agitation due aux vagues et courants littoraux), ce module permet le calcul du transport des sables et de l'évolution morphologique des plages.

Le module MIKE 21 ST repose sur le modèle sédimentaire Q3D développé par DHI Water & Environment pour simuler la dynamique sédimentaire littorale sous l'influence combinée des vagues et des courants. Le modèle Q3D calcule le transport sédimentaire et l'hydrodynamique en deux dimensions, en utilisant toutefois une approche quasi 3D permettant de prendre en compte l'évolution dans le temps et sur la

verticale du cisaillement, de la turbulence, des vitesses des courants et des concentrations de sédiments. L'évolution temporelle de la couche limite sous l'effet combiné des vagues et du courant est résolue selon la méthode d'intégration de la quantité de mouvement développé par Fredsoe⁵.

L'intégration du modèle sédimentaire dans MIKE 21 FM permet de mettre en œuvre un modèle morphologique offrant un feedback continu entre les conditions hydrodynamiques et sédimentologiques.

4.2 Zone modélisée

La figure 4.2 illustre l'étendue de la zone couverte par le modèle numérique. La limite amont se situe légèrement à l'aval du pont de Québec et ses limites aval sont fixées de part et d'autre de l'île d'Orléans, à la hauteur de l'Ange-Gardien.

La configuration adoptée permet d'assurer une distance suffisante des limites amont et aval du modèle par rapport au secteur à l'étude, de manière à éviter les imprécisions pouvant survenir à proximité de ces limites, où les conditions d'écoulement sont imposées plutôt que calculées par le modèle.

4.3 Numérisation de la bathymétrie

La majeure partie des données bathymétriques utilisées pour le montage du modèle numérique ont été obtenues auprès du SHC (figure 4.1) :

1. Dans la zone d'ensemble du modèle :
 - Cartes marines no 1316 et 1317 en format numérique AutoCAD;
2. Dans la zone du port et des battures de Beauport :
 - Levés hydrographiques no 3005094 : 9 882 points relevés en 1982;
3. Dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles et le secteur Beauport :
 - Levés hydrographiques no 3003712 : 835 points relevés en 1971;
 - Levés hydrographiques no 3005121 : 898 points relevés en 1982;
 - Levés hydrographiques no 3104341 : 8 121 points relevés en 2005;
 - Levés hydrographiques no 3104342 : 926 points relevés en 2005;
 - Levés hydrographiques no 3104710 : 115 306 points relevés en 2006.
4. Dans les bras de l'île d'Orléans:
 - Levés hydrographiques no 3003870 : 6201points relevés en 1974;
 - Levés hydrographiques no 3003828 : 19 865 points relevés en 1975.

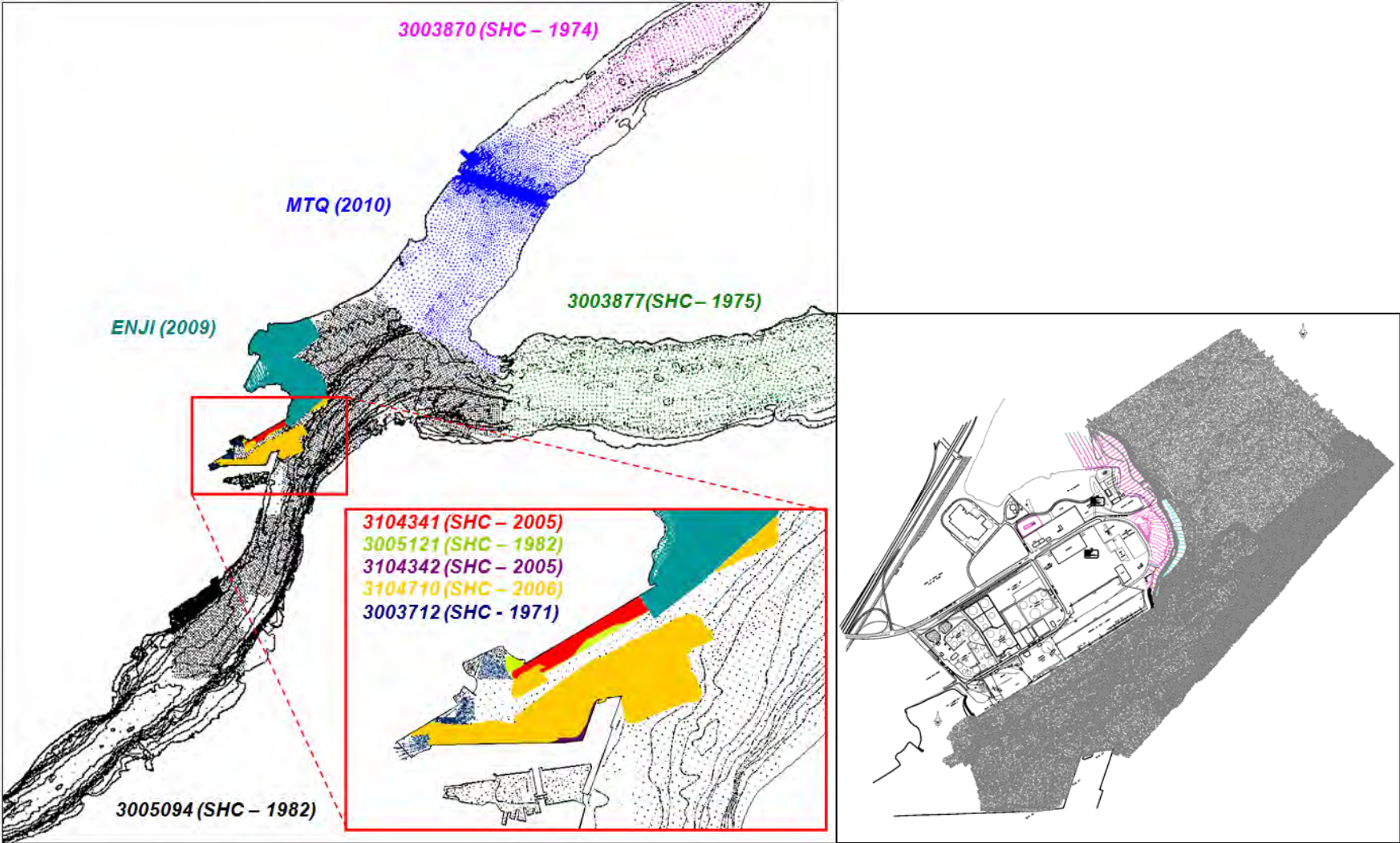
⁵ FREDSE, J (1984). *Turbulent boundary layers in wave current motion*. J. Hydr. Eng., ASCE, Vol. 110, no NY10, pp. 1103-1120.

Pour le bras nord de l'île d'Orléans, des données récentes (2010) transmises par le Ministère des Transport du Québec (MTQ) dans le cadre d'un autre mandat ont pu également être ajoutés au modèle bathymétrique.

Les relevés hydrographiques d'ensemble du SHC couvrant la pointe de Beauport sont relativement anciens (1982) et ne donnent aucune information dans la zone du rentrant sud-ouest et dans les portions de la pointe situées au-dessus du niveau marégraphique +1,5 m ZC. Dans le cadre de l'étude effectuée en 2010 par Lasalle|NHC⁶, des relevés additionnels avaient été effectués durant l'été 2009 par les Entreprises Normand Juneau (ENJI) afin de compléter la bathymétrie dans le rentrant sud-ouest et couvrir les élévations supérieures à celles du SHC. Les nouveaux relevés effectués en 2013 par le SHC et l'APQ couvraient une zone un peu moins étendue que celle documentée en 2009 (figure 4.1b).

Une fois les informations bathymétriques rassemblées dans le même système d'information géographique (MTM zone 7) et rapportées au zéro des cartes, les données bathymétriques ont été transformées en fichiers ASCII et intégrées à l'interface de pré-traitement MIKE Zero. La bathymétrie résultante en conditions actuelles est illustrée à la figure 4.2 pour l'ensemble du modèle et aux abords de la zone à l'étude. La figure 4.3 présente le maillage correspondant dans chacune de ces zones. La résolution du maillage est de l'ordre de 150 m dans les zones éloignées et diminue jusqu'à environ 10 m le long des plages de la pointe de Beauport.

⁶ DENAULT, C. ET VILLENEUVE, M. (2010) « Port de Québec – Extension du secteur Beauport, Étude des conditions hydrosédimentologiques », Rapport Groupe-Conseil LaSalle no 1744, avril 2010, préparé pour l'Administration portuaire de Québec.



a) Phase d'étude initiale

b) Intégration des relevés de 2013

Figure 4.1: Données utilisées dans le montage de la bathymétrie numérique

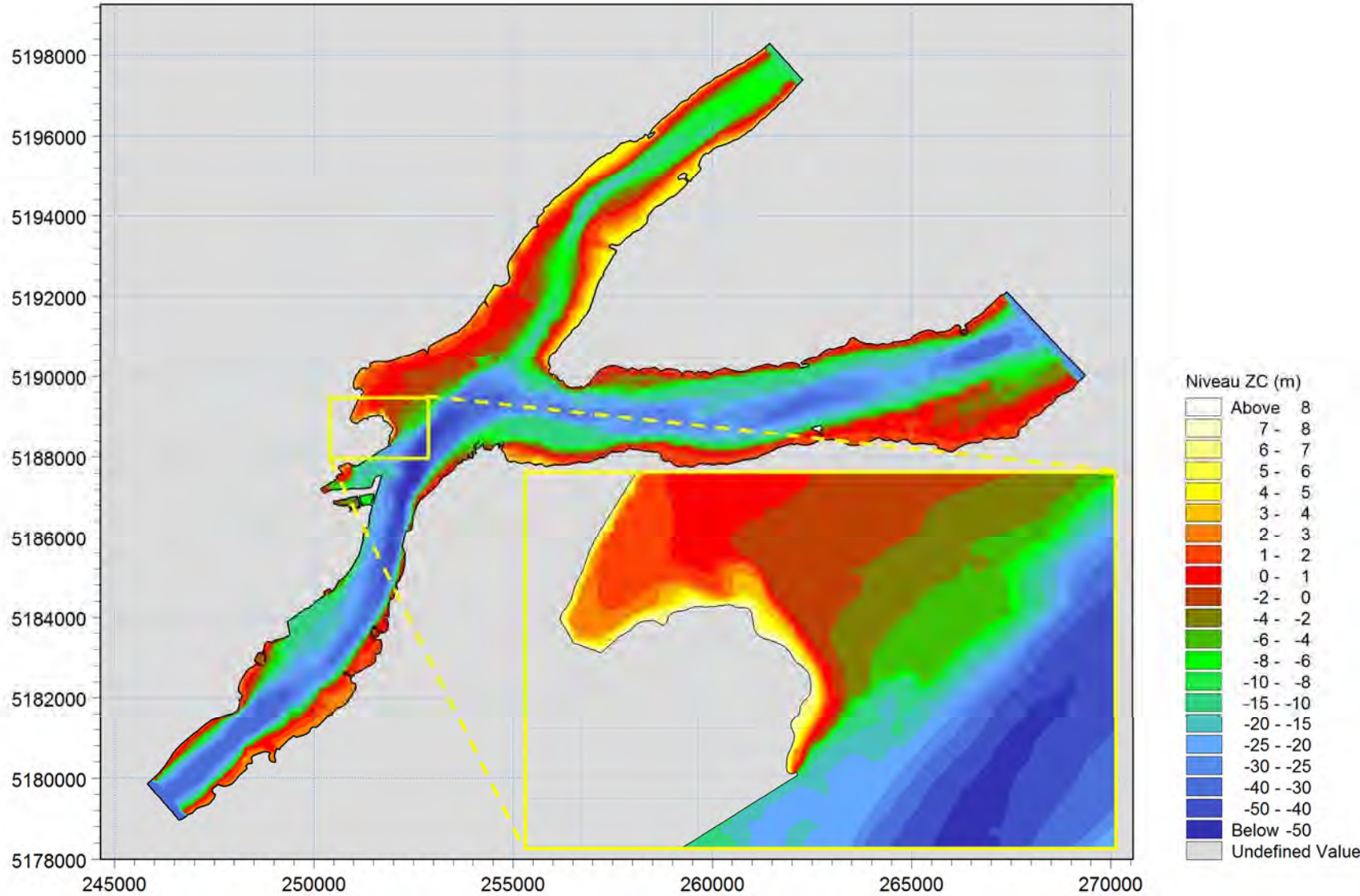


Figure 4.2: Bathymétrie numérique

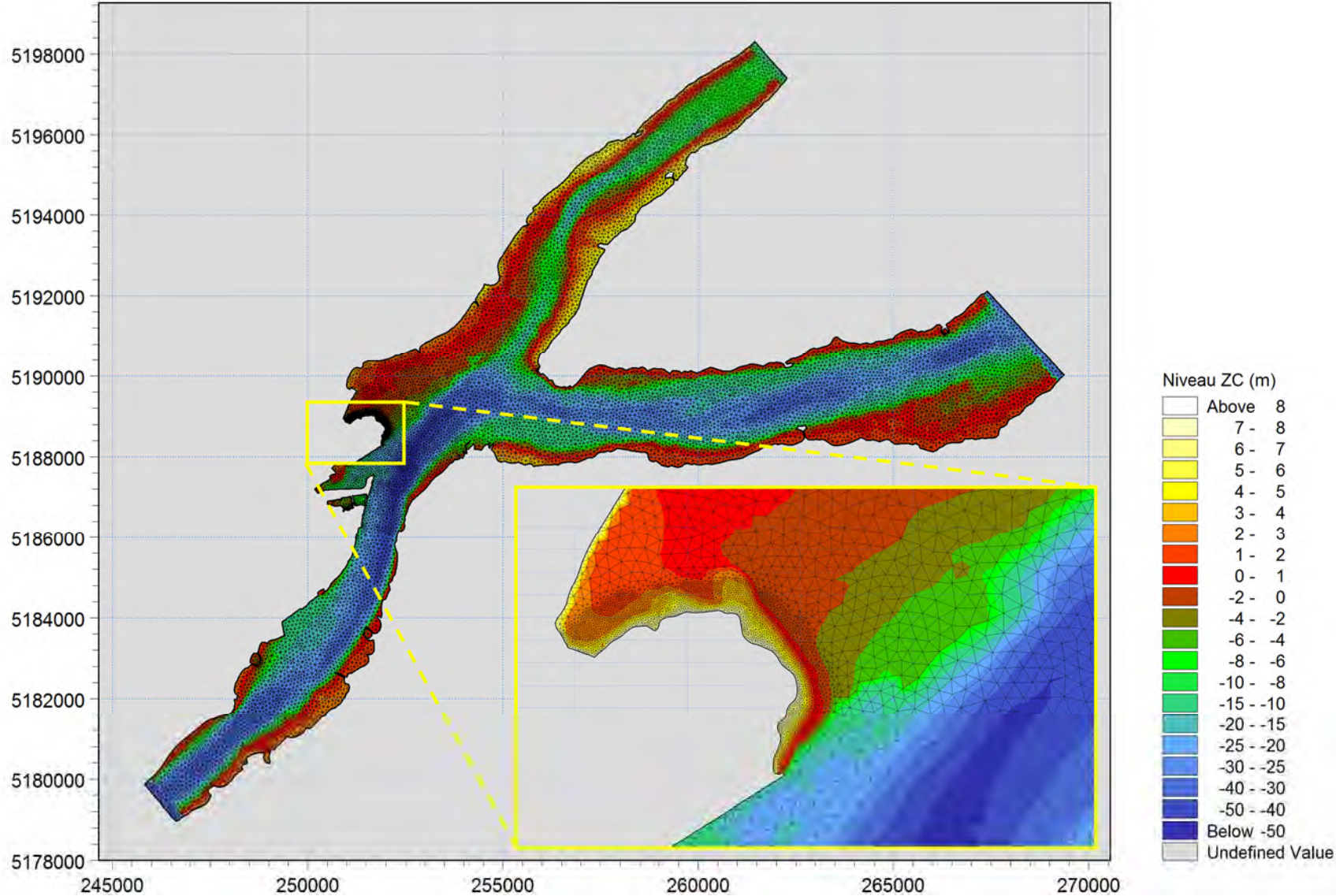


Figure 4.3: Maillage de la bathymétrie numérique

4.4 Conditions aux limites

Les conditions aux limites d'un modèle représentent les paramètres qui sont imposés par l'utilisateur aux diverses frontières de la zone modélisée. Un choix judicieux de ces conditions est essentiel pour obtenir un modèle donnant des résultats représentatifs de la réalité.

Pour le module hydrodynamique, les signaux de marée reconstitués aux stations du SHC ont été imposés aux limites du modèle, selon les dates des tempêtes modélisées. Pour la limite du bras nord de l'île d'Orléans, située entre les stations de Sainte-Anne-de-Beaupré et de Montmorency (voir figure 4.2), les niveaux de marée ont été interpolés en fonction des distances séparant la limite du modèle des deux stations marégraphiques.

Pour les vagues, un spectre nul a été imposé aux limites du modèle puisqu'il a été choisi de générer les vagues par le vent dans le modèle. Pour le module sédimentaire, aucune concentration de sédiments n'a été spécifiée aux limites du modèle.

4.5 Paramètres de calculs

4.5.1 Paramètres hydrodynamiques

a) Frottement sur les fonds

Toutes les simulations hydrodynamiques ont été réalisées avec un coefficient de Manning de $n = 0,03$, constant dans l'ensemble du secteur modélisé.

b) Viscosité turbulente

Les flux de quantité de mouvement dus à la turbulence, à l'intégration verticale des équations de base (modèle bidimensionnel) et aux fluctuations se produisant à des échelles inférieures aux cellules de maillage, ceux-ci sont pris en compte dans MIKE 21 par un paramètre de viscosité turbulente. En pratique, la variation de ce paramètre induit notamment dans les écoulements une plus ou moins grande tendance à former des zones de décollement et des courants de retour. Sur la base des résultats obtenus dans des études similaires, la formulation de Smagorinsky, avec une constante de 0,28, a été utilisée.

4.5.2 Paramètres de vagues

a) Déferlement

Tous les résultats de simulation ont été obtenus en tenant compte de l'influence du déferlement. MIKE 21 SW simule la dissipation d'énergie due au déferlement selon la formulation proposée par Battjes & Janssen. Le déferlement est alors contrôlé par trois paramètres pour lesquels les valeurs proposées dans les références de MIKE 21 SW ont été conservées:

$$\alpha = 1,0 \quad \gamma_1 = 1,0 \quad \gamma_2 = 0,8$$

Les valeurs de α et γ_2 sont conformes à Battjes & Janssen⁷ alors que celle de γ_1 est tirée de Holthuijsen et al.⁸. Les paramètres γ_1 et γ_2 influencent respectivement les limites de cambrure et de profondeur d'eau conduisant au déferlement.

b) Frottement

La zone modélisée présente une vaste gamme de profondeurs, allant de profondeurs importantes dans le chenal principal du fleuve Saint-Laurent, à de très faibles profondeurs près du rivage et dans le rentrant sud-ouest. Une analyse de sensibilité a donc été réalisée lors de nos études antérieures pour évaluer l'influence du paramètre de frottement sur les fonds sur la dissipation de l'énergie des vagues dans le secteur de la plage projetée. Les résultats obtenus en incluant et en excluant le paramètre de frottement sur les fonds, tout en maintenant l'influence du déferlement dans les deux cas, ont montré peu d'écart dans la hauteur des vagues simulée près des plages. Il a donc été décidé d'inclure l'influence du frottement sur les fonds dans les simulations. La valeur par défaut de MIKE 21 SW, soit un coefficient de Nikuradse de 0,04 m, a été conservée.

4.5.3 Paramètres de transport sédimentaire

Conformément à nos études précédentes, un D_{50} de 0,2 mm a été utilisé pour l'ensemble des sédiments constituant la plage.

⁷ BATTJES J.A. ET JANSSEN J.P.F.M. (1979). *Energy loss and set-up due to breaking of random waves*. Proceedings 16th Coastal Engineering Conference, 1978, Hamburg, ASCE, New York, N.Y., pp. 567-587

⁸ HOLTHUIJSEN L. H., BOOIJ, N. ET HERBERS, T.H.C. (1989). *A prediction model for stationary, short-crested waves in shallow water with ambient currents*. Coastal Engineering, 13, pp. 23-54.

5 ÉTUDE HYDROSÉDIMENTOLOGIQUE

5.1 Option V15-05

Les calculs de mouvements sédimentaires sous l'effet des tempêtes synthétiques (version longue, équivalent 49 jours) ont été reproduits (figure 5.1) sous forme d'une carte de différentiel d'élévation entre la géométrie de construction de la plage et la fin de la série de tempêtes accompagnées de changements de niveaux d'eau (marée). Les zones dans les teintes de rouge sont des zones qui ont été érodées (par exemple le haut de plage) et les zones dans les teintes de vert sont des zones qui ont été en sédimentation (par exemple le bas de plage). L'échelle de variation d'altitude dans la figure 5.1 est de l'ordre de 1,5 m (en érosion ou en accrétion).

Une légère dissymétrie du patron d'érosion/sédimentation a été détectée sur la plage de baignade de cette option, ce qui a entraîné le développement de l'option suivante.

Du côté nord-ouest du brise-lames, on constate le remaniement du banc de sable qui forme actuellement l'extrémité nord de la plage. On ne constate cependant pas de migration massive des sables vers la zone du rentrant sud-ouest.

5.2 Option V15-06

Les mêmes calculs de mouvements sédimentaires ont été faits pour l'option V15-06 que pour l'option V15-05. La figure 5.3, qui présente les résultats pour l'option V15-06, montre l'amélioration du bilan sédimentaire de cette option par rapport à la précédente (meilleur équilibre longitudinal des zones en érosion et accrétion). Il s'agit d'une version de la plage de baignade qui devrait être relativement optimale par rapport aux conditions hydrosédimentologiques de ce secteur de la baie de Beauport.

La nouvelle géométrie du brise-lames provoque également une légère diminution des mouvements sédimentaires au droit du banc de sable qui forme actuellement l'extrémité nord de la plage.

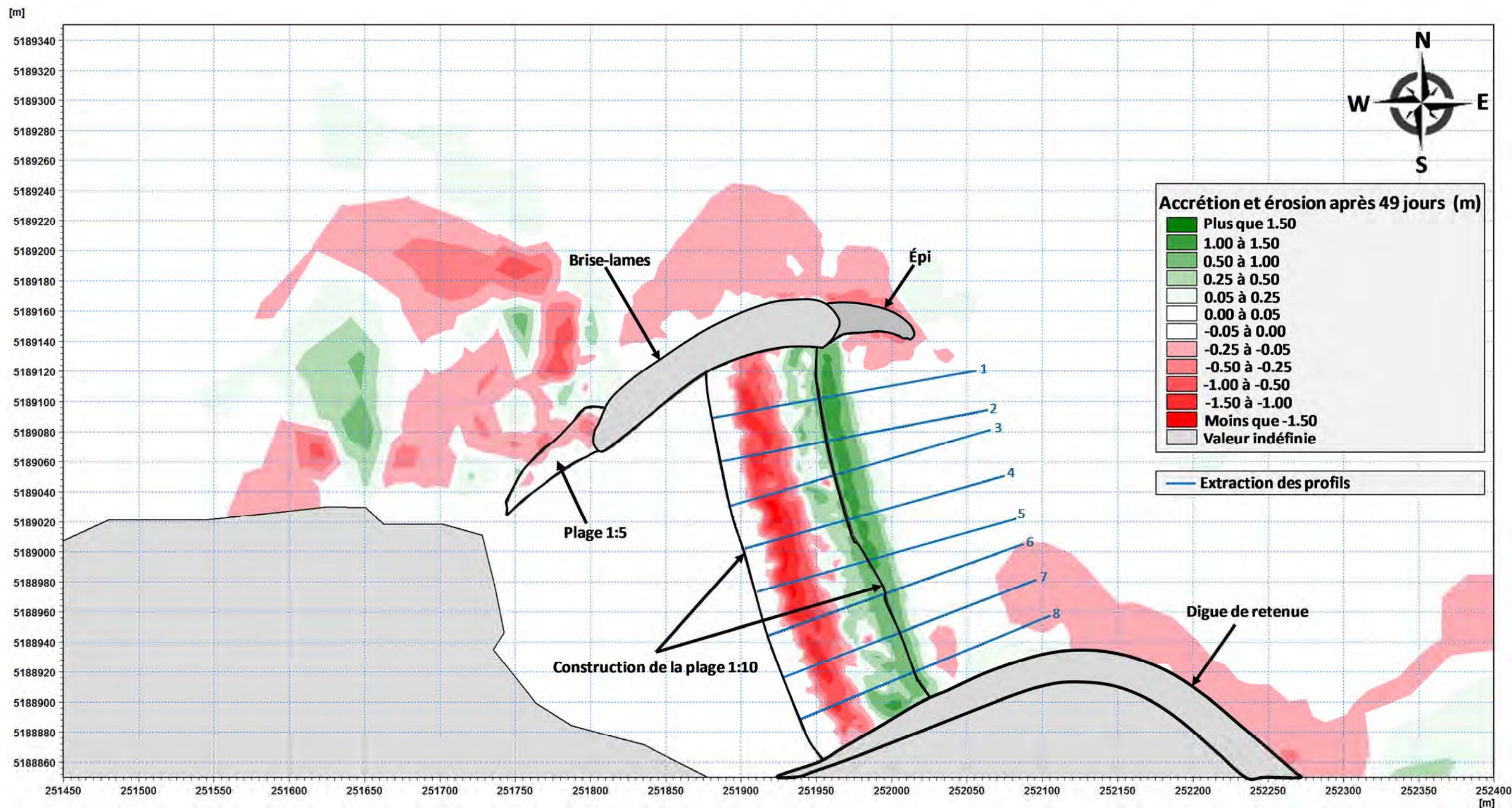


Figure 5.1 : Résultats de l'évaluation hydrosédimentologique de l'option V15-05

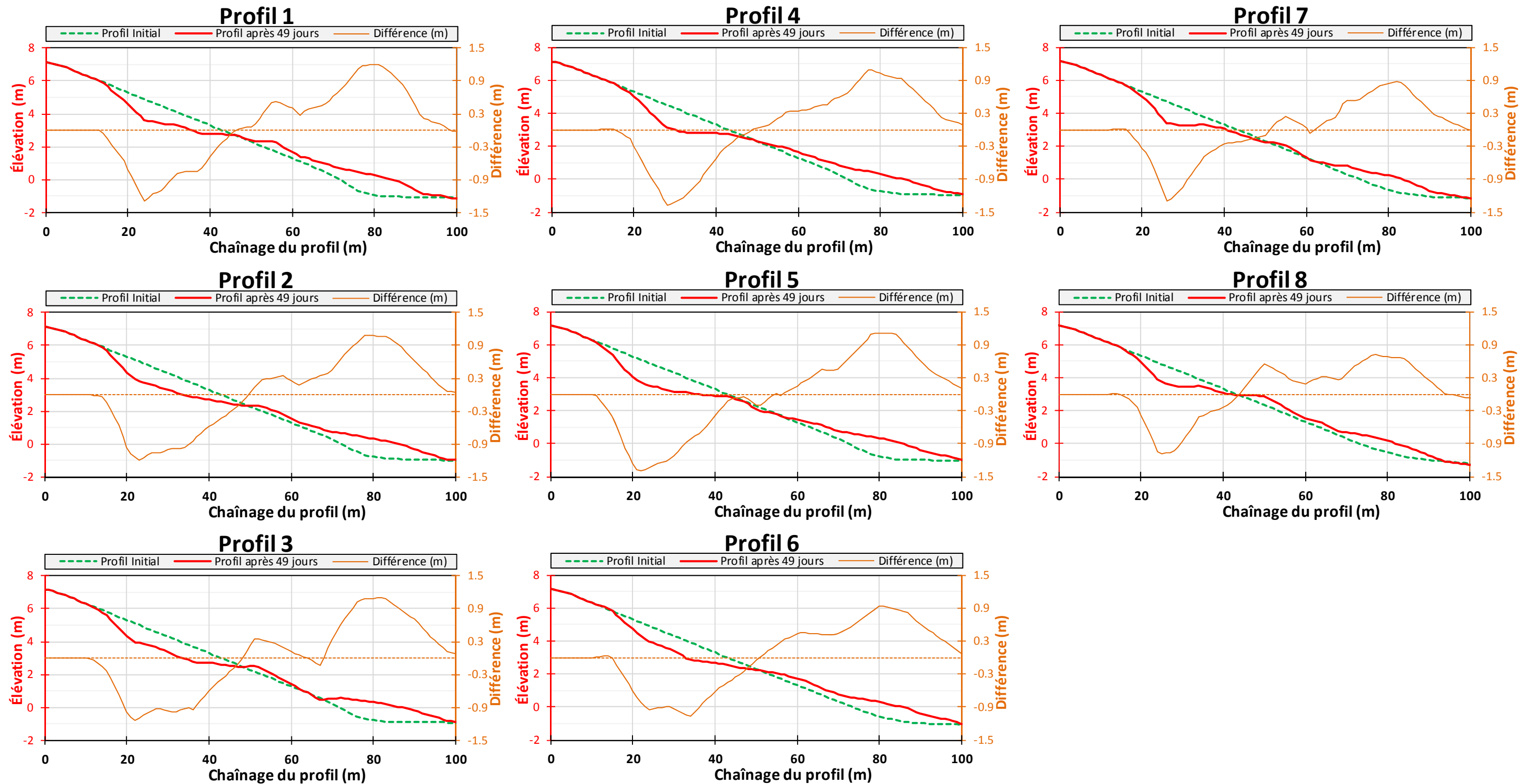


Figure 5.2 : Évolution des profils de la plage de l'option V15-05

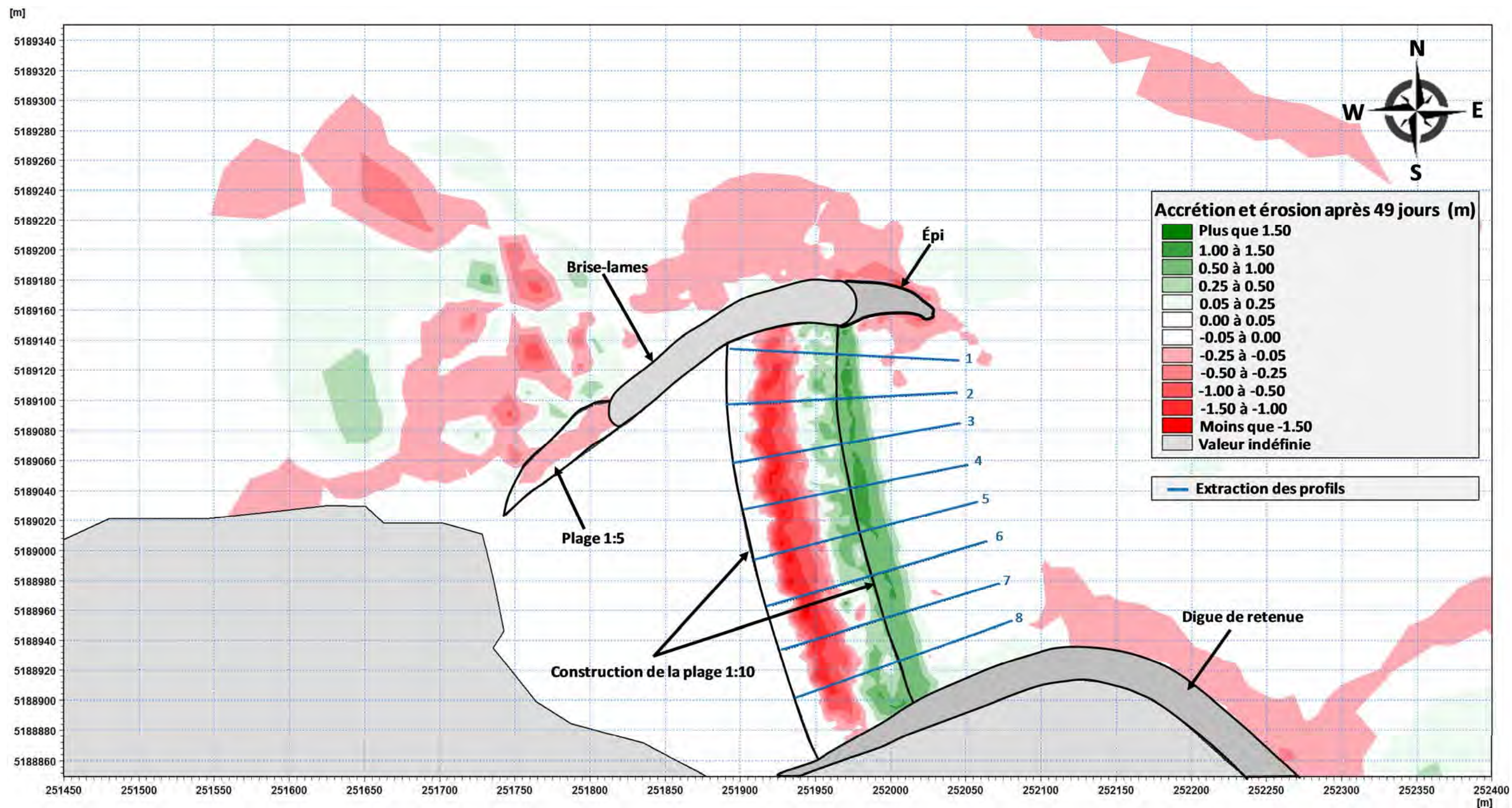


Figure 5.3: Résultats de l'évaluation hydrosédimentologique de l'option V15-06

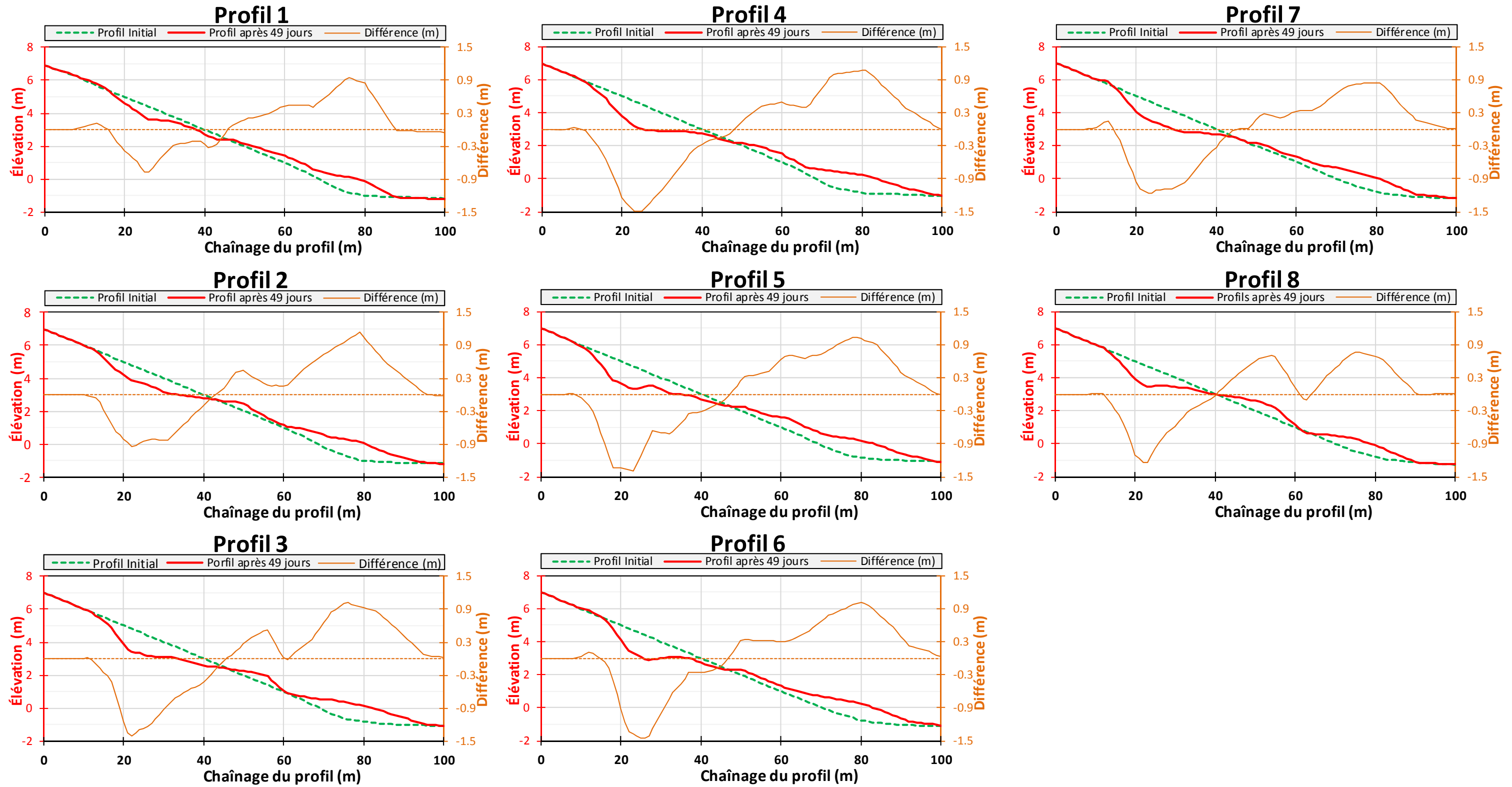


Figure 5.4: Évolution des profils de la plage de l'option V15-06

6 RENTRANT SUD-OUEST

6.1 Situation actuelle

Lors des fortes tempêtes du secteur est, le sable de la plage actuelle de Beauport est transporté du sud-est vers le nord-ouest pour alimenter le banc de sable qui se trouve à l'extrémité nord de la plage (figure 6.1). Lors de conditions d'agitation plus modérées, ce banc de sable est remodelé par les vagues avec un transport des sédiments principalement orienté vers la partie sud du rentrant sud-ouest.

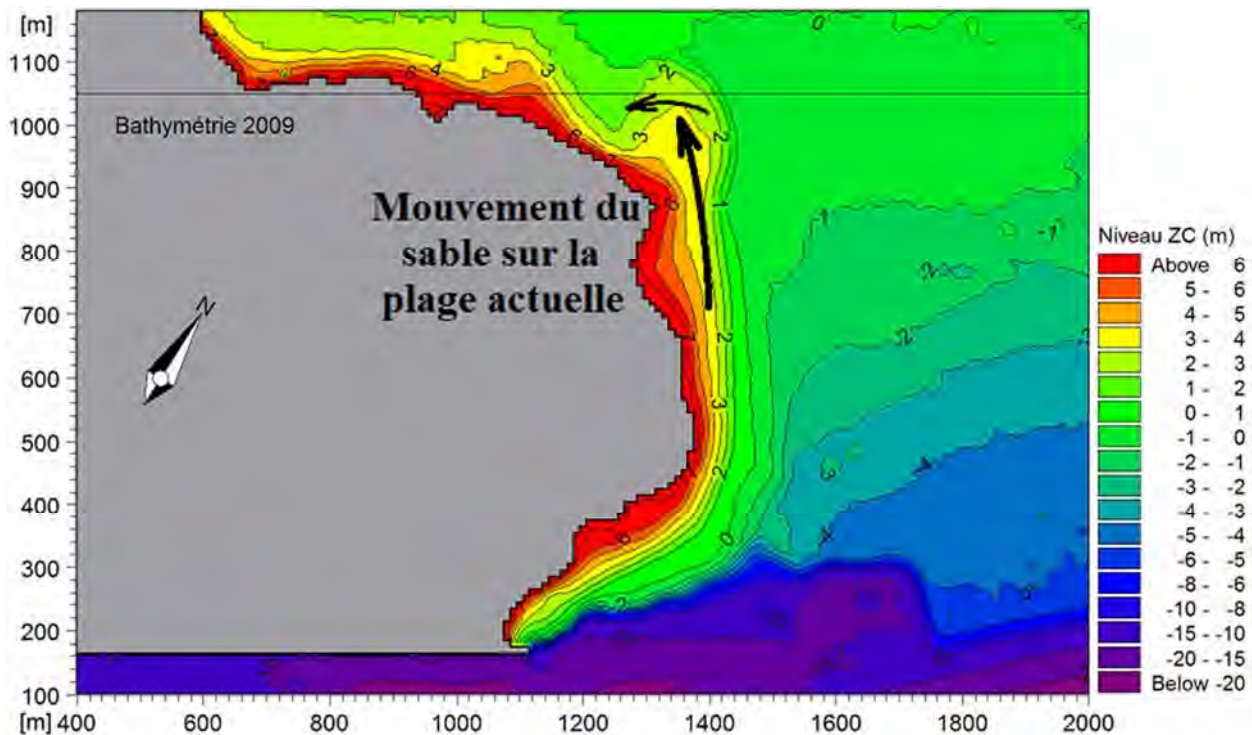


Figure 6.1: Mouvements du sable sur la plage actuelle

6.2 Zone protégée par le brise-lames

Le plan du rentrant sud-ouest, de la position du brise-lames et de la future plage dans l'option recommandée (V15-06) est reproduit à la figure 6.2 avec la rose des vents à la station de Beauport.

La figure 6.2 montre que le brise-lames est pratiquement orienté selon la direction principale des vents forts qui soufflent sur la baie de Beauport (ENE et NE).

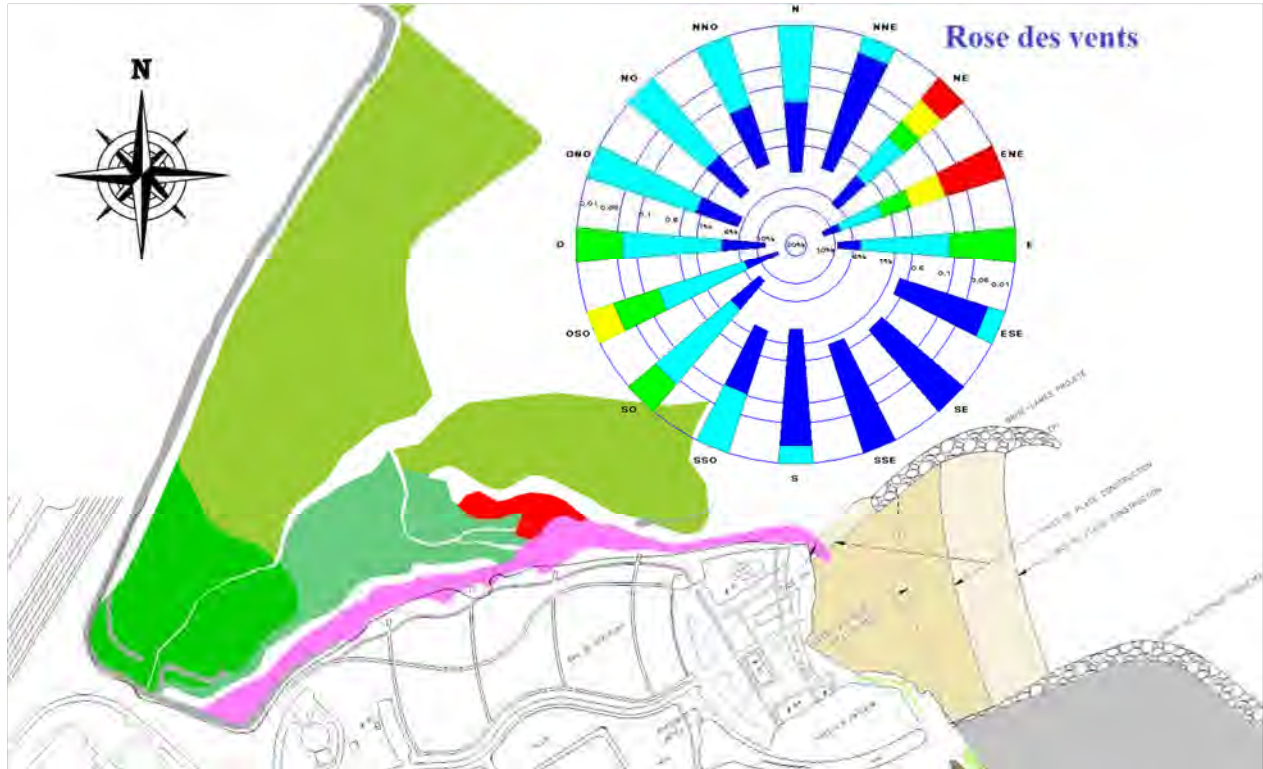


Figure 6.2 : Rentrant sud-ouest et brise-lames proposé (V15-06) – Rose des vents

Sur la figure 6.3, le même plan du rentrant sud-ouest a été reproduit avec la rose des vagues (dans la baie). On constate sur cette figure que les plus grandes vagues qui se produisent dans la baie de Beauport proviennent des secteurs est à nord-est, avec une dominance de l'est-nord-est. Lorsque ces vagues vont pénétrer dans le rentrant sud-ouest, la topographie des fonds va les faire réfracter. La présence du brise-lames va provoquer une légère amélioration de la protection des herbiers de la partie sud du rentrant sud-ouest contre les vagues de l'est. Par contre, le brise-lames de la plage n'aura aucun effet sur le rentrant sud-ouest pour ce qui est des vagues des secteurs est-nord-est et nord-est.

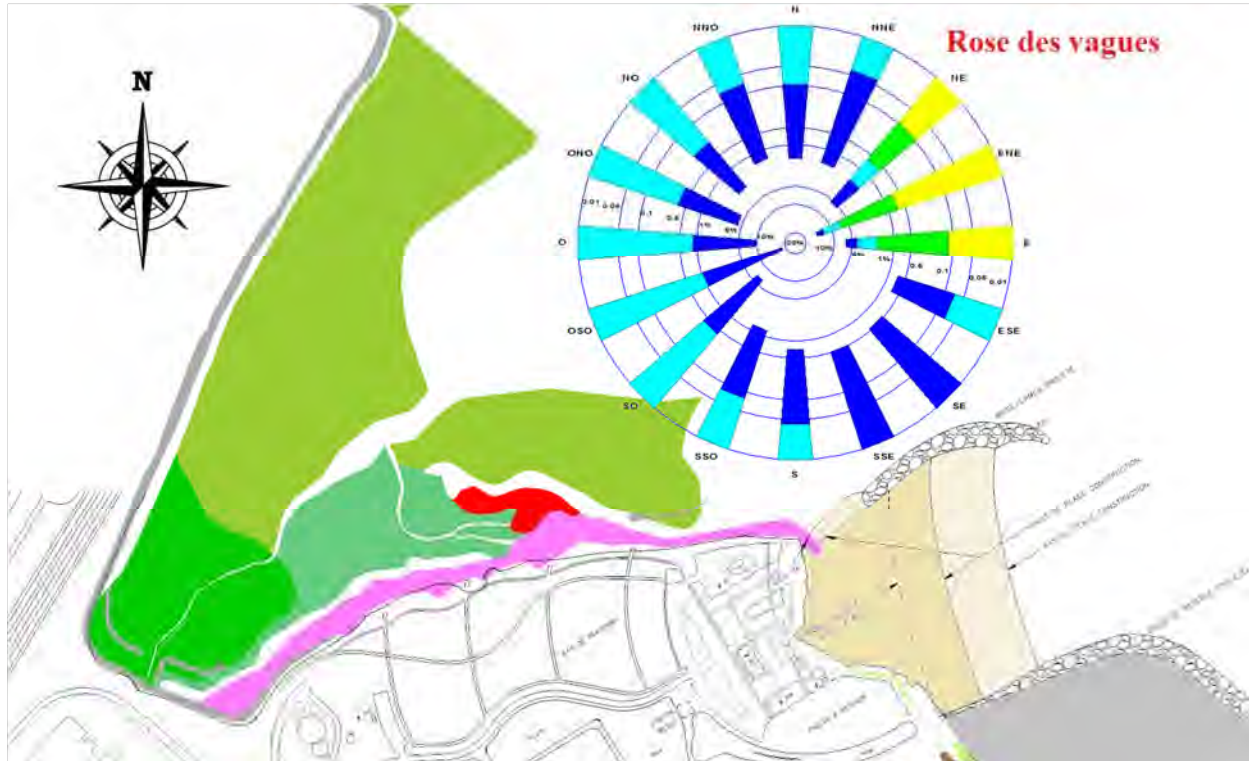


Figure 6.3 : Rentrant sud-ouest et brise-lames proposé (V15-06) – Rose des vagues

6.3 Effet du brise-lames sur le riant sud-ouest

6.3.1 Sédiments

Les figures 5.1 et 5.3 montrent que les vagues remettent en suspension les sédiments qui se trouvent du côté nord du brise-lames. Ce phénomène se produit déjà dans la configuration actuelle de la plage.

Avec la mise en place du brise-lames de la plage, la flèche de sable qui est la conséquence de la dérive littorale actuelle va progressivement s'étaler et une partie des sédiments qui constituent cette flèche littorale vont migrer vers le riant sud-ouest. Par contre, la présence du brise-lames va arrêter la dérive littorale qui alimentait cette flèche. Avec la construction de la nouvelle plage et de son brise-lames, les sédiments situés du côté nord du brise-lames vont donc essentiellement se stabiliser à moyen et long termes.

6.3.2 Végétation de marais

La construction du brise-lames de la plage devrait donc à moyen et long terme protéger la végétation du riant sud-ouest en stoppant la migration des sédiments qui proviennent de la plage actuelle.

7 COURANTS AUX ABORDS DE LA PLAGE

7.1 Courants de marée

Les figures 7.1 et 7.2 illustrent respectivement les courants de marée maximums de flot et de jusant prédits par le modèle numérique aux abords de la plage actuelle et de la future plage (variante V15-06). Les courants correspondent à une marée de vive-eau de 4,53 m de marnage.

Au flot, les vitesses maximales le long de la plage actuelle (figure 7.1(a)), qui correspond à la portion nord de la pointe de Beauport, sont liées à la veine principale des courants de marée. Les vitesses aux abords immédiats du rivage sont faibles, mais elles augmentent à des valeurs beaucoup plus importantes à seulement quelques dizaines de mètres de la plage.

En conditions futures, la présence de l'extension portuaire au sud de la plage et du brise-lames au nord protège la nouvelle plage de l'action directe des courants de flot. Les vitesses maximales ne dépassent pas 0,25 m/s dans l'ensemble de la zone délimitée par les nouveaux aménagements et ces dernières sont liées à la formation d'un courant de retour généré par les courants de marée plus forts observés plus au large (figure 7.1(b)).

Au jusant, tant la plage actuelle que la future plage se situent en retrait de la veine principale des courants de marée. En conditions actuelles, les vitesses le long de la plage (moitié nord de la pointe) ne dépassent pas 0,25 m/s (figure 7.2(a)). Les vitesses le long de la nouvelle plage (figure 7.2(b)) sont du même ordre et, comme au flot, résultent de la formation d'un courant de retour dans la zone définie par les nouveaux aménagements.

En conditions futures, il importe de souligner que les courants de marée peuvent conduire à des vitesses d'écoulement relativement importantes à l'extrémité du brise-lames. Les vitesses aux abords immédiats de la nouvelle plage sont donc faibles mais des courants plus importants, de l'ordre de 0,25 à 0,35 m/s, sont observés en vive-eau à l'extrémité du brise-lames (figures 7.1(b) et 7.2(b)).

7.2 Courants dus aux vagues

Les figures 7.3 et 7.4 illustrent les champs de courants résultant de la superposition des courants de marée et des courants littoraux liés aux vagues de tempêtes. Les courants littoraux obtenus le long de la plage actuelle (figure 7.3) et de la future plage (figure 7.4) correspondent à une tempête de l'ENE avec des vents maximums d'un peu plus de 60 km/h.

En conditions actuelles, les courants littoraux relativement intenses sont dirigés vers le nord dans la portion nord de la pointe (le long de la plage actuelle) et vers le sud dans la portion sud, ce qui contribue à un transport littoral et une fuite de sédiments vers les deux extrémités de la pointe.

Tel que discuté précédemment, la variante V15-06 de la plage permet une nette diminution de l'intensité des courants et du transport littoraux.

7.3 Sécurité des usagers de la plage de baignade

En dehors des épisodes de fortes tempête du secteur est, les vitesses de courant modélisées dans le secteur de la nouvelle plage restent très faibles. Les utilisateurs qui resteront dans la zone de la plage ne seront pas exposés à des courants pouvant les mettre en danger.

7.4 Qualité de l'eau

La configuration relativement ouverte de l'option recommandée (V15-06) devrait permettre une recirculation régulière de l'eau aussi bien le long de la plage de baignade que dans le rentrant sud-ouest. De plus, lors des épisodes de tempête, surtout du secteur nord-est, la circulation de l'eau est accélérée par l'effet des vagues.

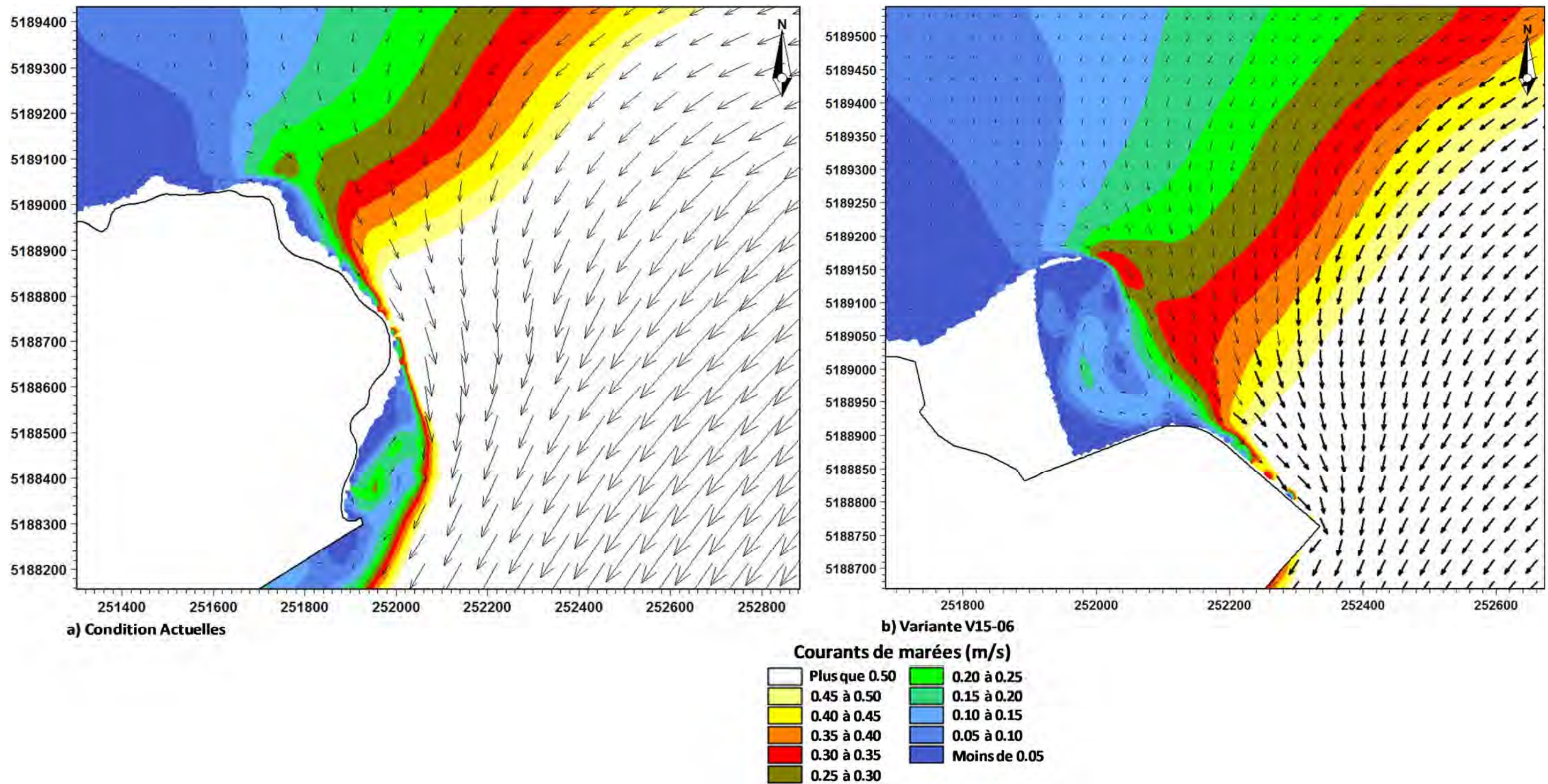


Figure 7.1 : Courants maximums de flot en marée de vive-eau (marnage 4,53 m)

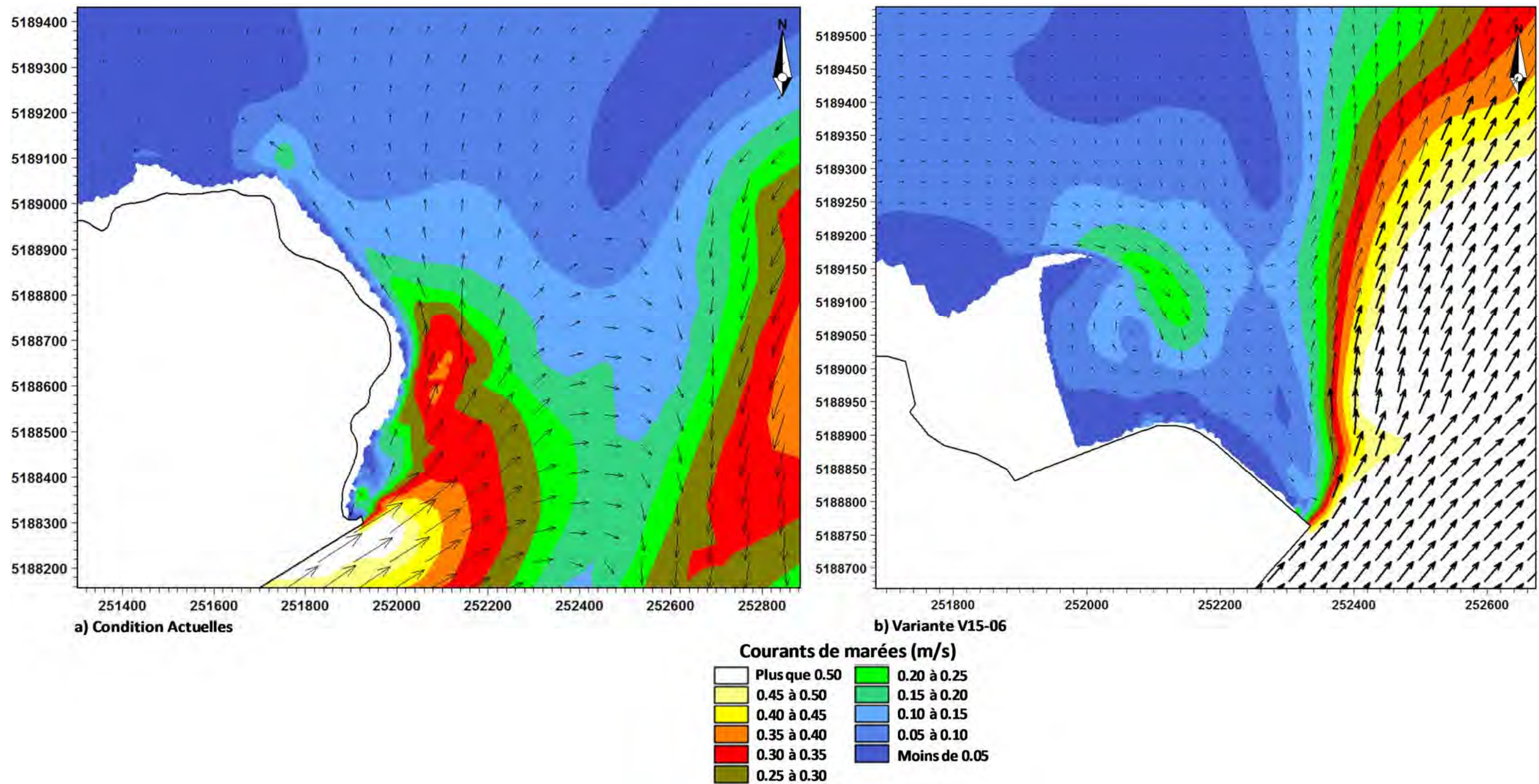


Figure 7.2 : Courants maximums de jusant en marée de vive-eau (marnage 4,53 m)

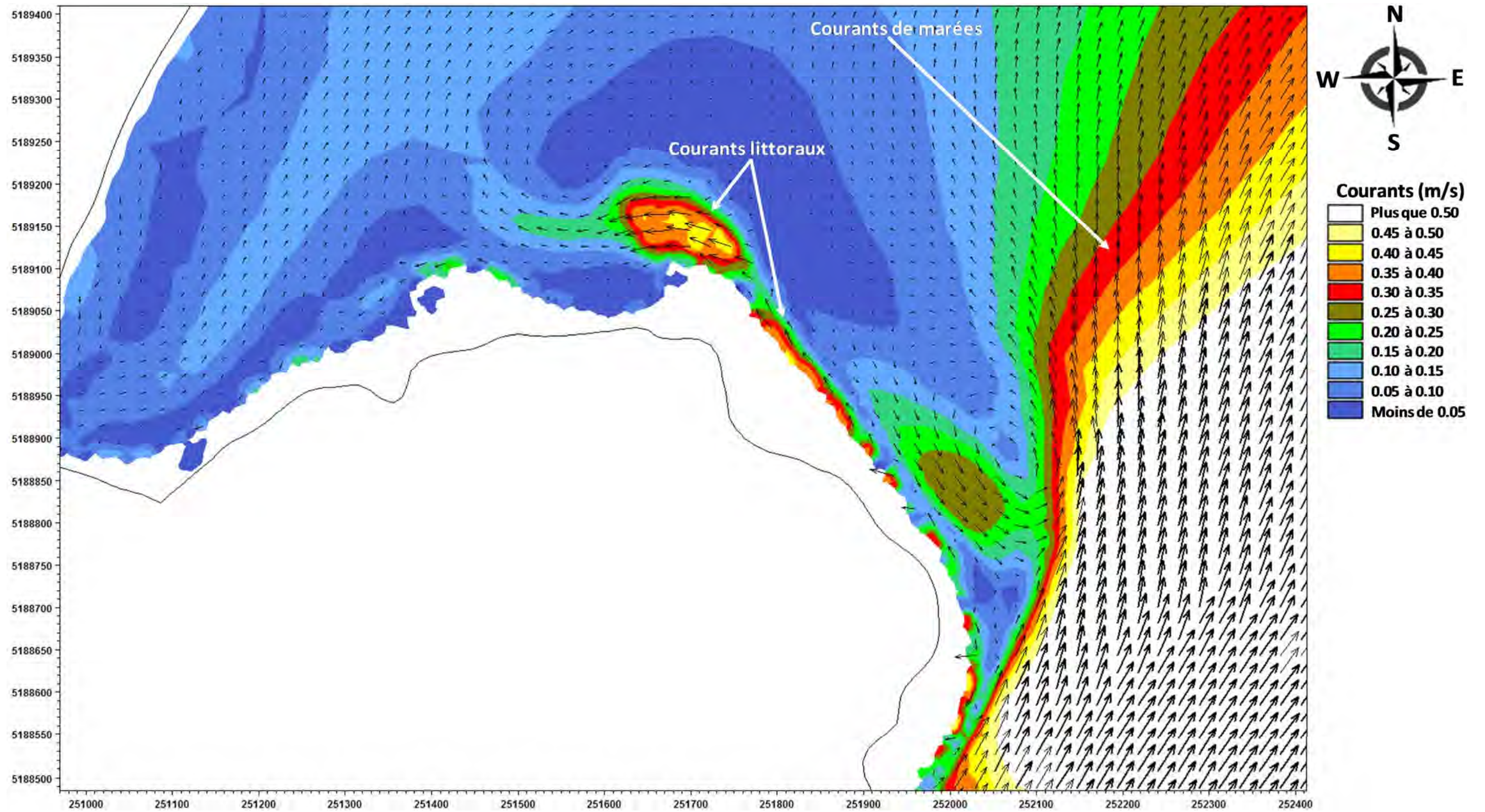


Figure 7.3: Courants littoraux induits par les vagues de tempêtes – Conditions actuelles

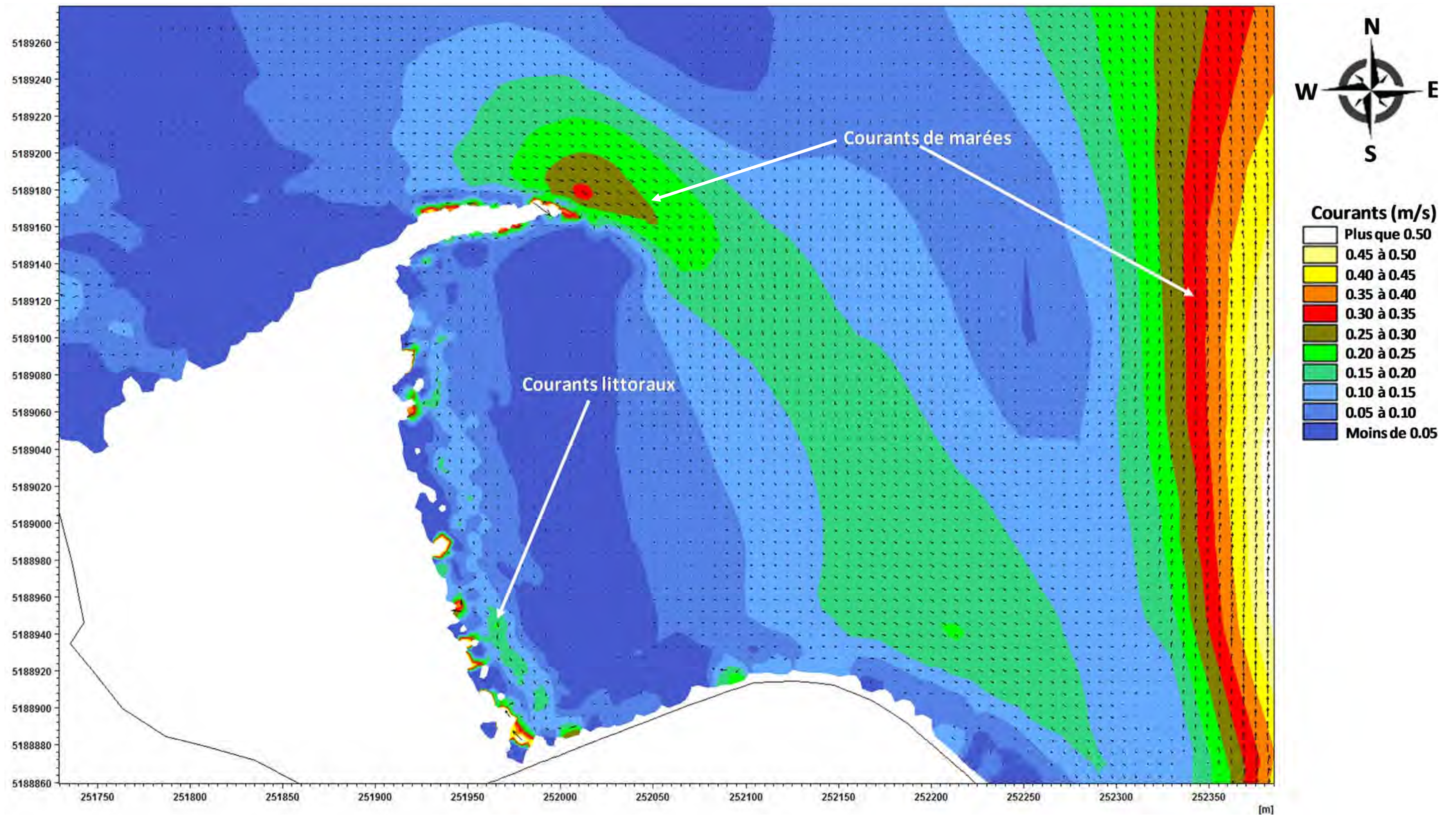


Figure 7.4: Courants littoraux induits par les vagues de tempêtes – Conditions futures (option V15-06)

8 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

8.1 Conclusion

Une série de géométries de plage a été développée pour répondre aux demandes de l'APQ dans le cadre du réaménagement de la zone récréotouristique de Beauport. Ces géométries ont fait l'objet de discussions avec l'APQ dans le but de répondre le plus efficacement et rapidement à leurs besoins.

Deux options ont fait l'objet d'une évaluation des processus hydrosédimentaires. Les calculs montrent que l'option V15-05 présente un léger déséquilibre des processus sédimentaires se produisant sur la plage de baignade et que l'option V15-06 corrige ce déséquilibre.

La quantité de sédiments impliquée dans la construction de l'option V15-06 est de l'ordre de 220 000 m³.

8.2 Recommandations

La géométrie de plage recommandée est celle apparaissant dans l'option V15-06 (Annexe A).

ANNEXE « A »

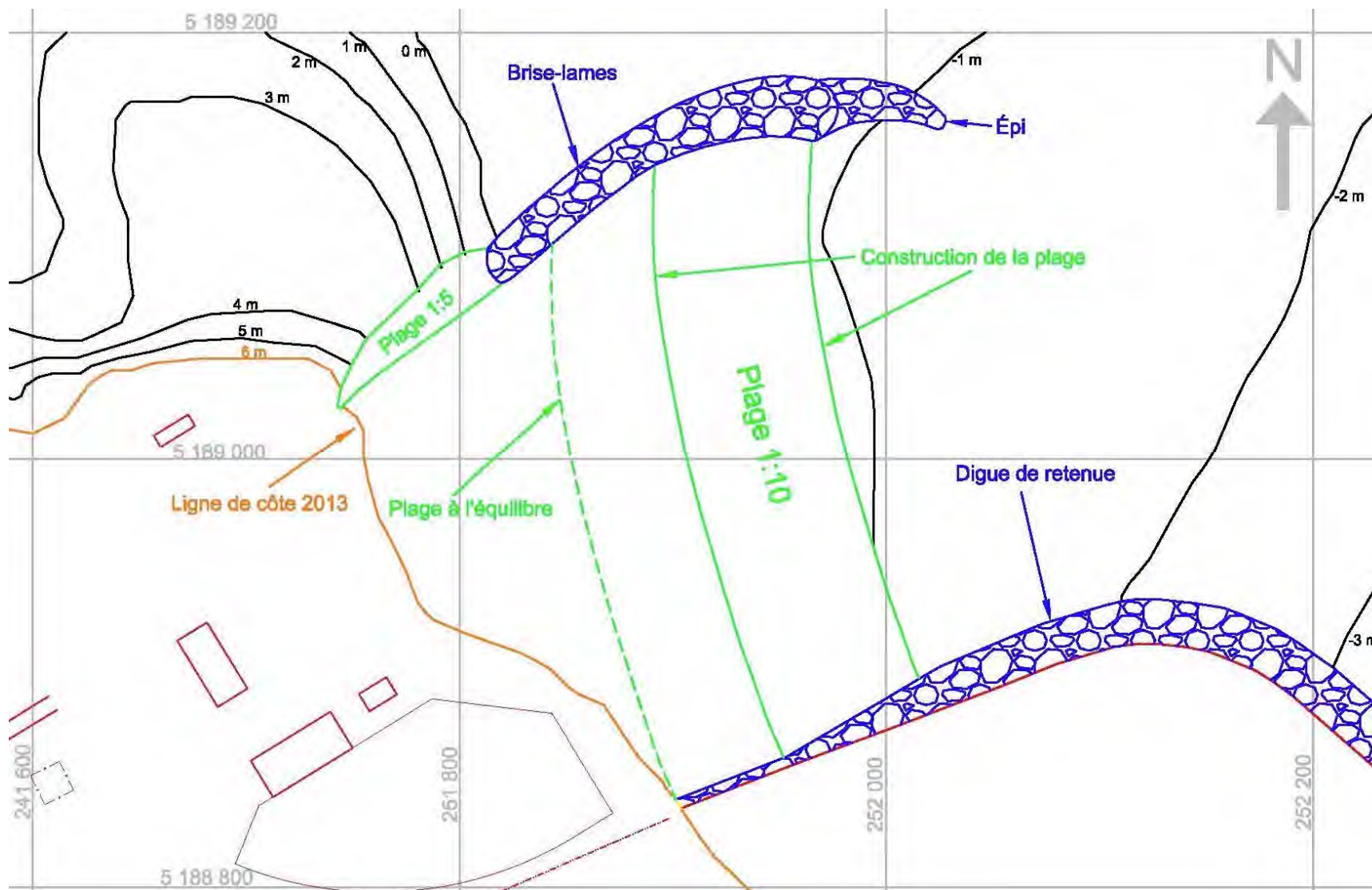


Figure A1 : Géométrie de la plage recommandée

ANNEXE « B »

Prévision de hausse des niveaux d'eau en fonction des changements climatiques

B Niveaux d'eau

B1 Sources de l'information

La Gestion des données scientifiques intégrées (GDSI) du ministère des Pêches et Océans Canada (MPO) met à la disposition du public les niveaux d'eau enregistrés à ses stations sur Internet⁹.

Des stations de la GDSI sont disponibles à proximité du secteur Beauport :

- La station de référence de Lauzon¹⁰ (N° 3250) pour laquelle des données horaires sont disponibles en 1896 et 2012 (environ 527 000 valeurs horaires recueillies entre 1950 et 2012),
- La station du Vieux-Québec (N° 3248) qui opère depuis 2009 et qui a remplacé la station de Lauzon depuis 2012 (près de 30 000 données horaires).

Les données des deux stations du Service hydrographique du Canada (SHC) à Québec ont été utilisées pour illustrer les niveaux d'eau qui se sont produits à Beauport lors des tempêtes.

Le SHC donne une différence de 1,958 m entre le Zéro des cartes marines (ZC) et le Niveau moyen des mers (NMM-CGVD28) pour Lauzon, le ZC se situant sous le NMM à Québec.

B2 Bases de données de la station de Lauzon

L'évaluation des fréquences de dépassement des niveaux d'eau enregistrés à la station de Lauzon a été faite entre 1950 et 2012. La figure B.1 illustre cette analyse pour les « extrêmes hauts » observés pendant cette période.

D'après la base de données disponibles et en utilisant la régression logarithmique obtenue avec cette base de données, les niveaux d'eau ont été calculés pour les récurrences suivantes :

- | | | | |
|-----------------------------|------------|----|-------------|
| - Une heure par 50 années : | +6,94 m ZC | ou | +4,98 m NMM |
| - Une heure par 30 années : | +6,86 m ZC | ou | +4,90 m NMM |
| - Une heure par 10 années : | +6,68 m ZC | ou | +4,72 m NMM |
| - Une heure par 5 années : | +6,57 m ZC | ou | +4,61 m NMM |

⁹ <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/index-fra.html>

¹⁰ <http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/isdm-gdsi/twl-mne/inventory-inventaire/sd-ds-fra.asp?no=3250&user=isdm-gdsi®ion=LAU&ref=maps-cartes>

Le cinquième rapport d'évaluation du GIEC a été publié en 2013 et 2014. En ce qui concerne l'évolution du niveau moyen des océans, plusieurs scénarios climatiques ont été analysés. La figure B.2, extraite du rapport synthèse¹², présente les courbes (moyenne et enveloppes) de l'évolution prévisible du niveau moyen des océans selon deux scénarios climatiques (RCP2.6 – optimiste et RCP8.5 – pessimiste/réaliste).

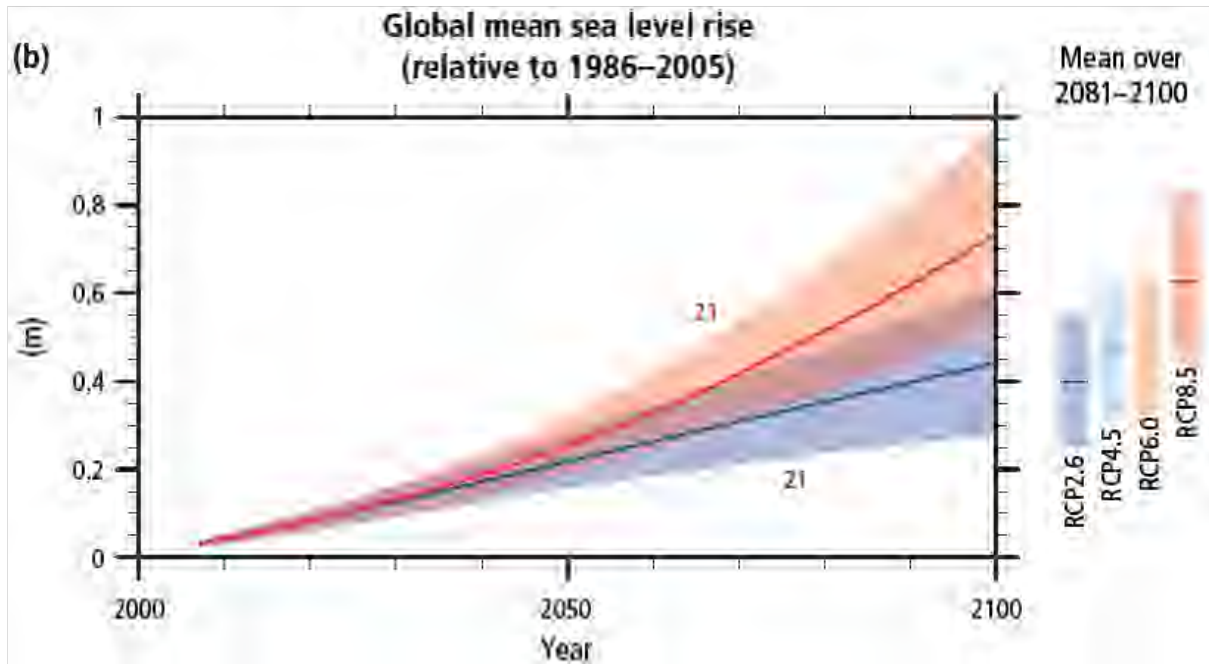


Figure B.2 Évolution du niveau moyen des mers selon le scénario climatique retenu

La figure B.3 présente la même information sous une forme différente, soit les enveloppes de valeurs à l'échéance 2081-2100 par rapport à la situation de 1986-2005. Cette figure est extraite du chapitre 13 du rapport scientifique¹³ (Assessment report).

12 Climate change 2014 – Synthesis report – Summary for policymakers
 (https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_FRENCH.pdf)

13 WG1-AR5-Chapitre 13 « Sea level changes » (https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_Chapter13_FINAL.pdf)

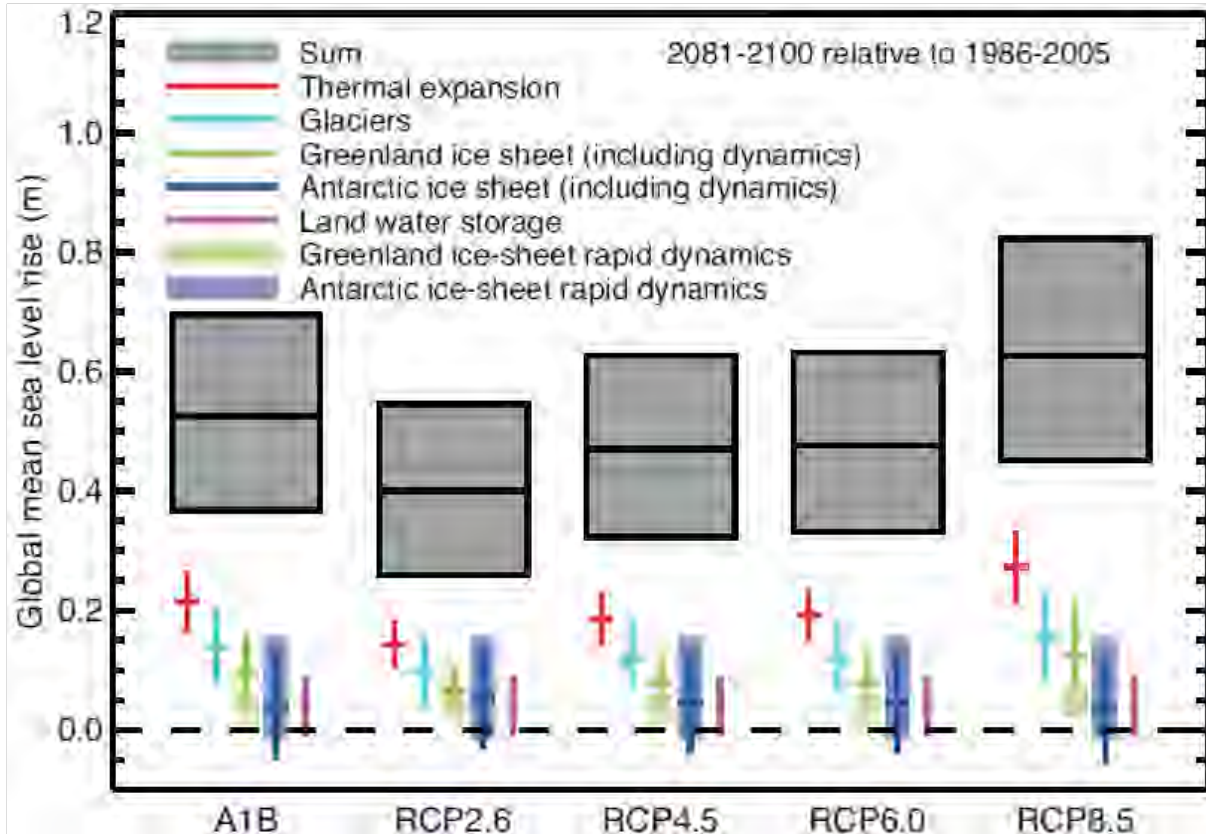


Figure B.3 Relèvement du niveau moyen des océans selon le scénario climatique retenu

La façon dont se déroulent les négociations en vue de la réduction d'émission de gaz à effet de serre et le niveau des engagements actuels de l'ensemble des gouvernements tendent à indiquer que c'est le pire scénario (RCP8.5) qui est probablement le plus réaliste pour l'instant. Du point de vue de l'ingénierie des ouvrages, il est également recommandé d'éviter les scénarios trop optimistes compte tenu des risques encourus.

Une courbe exponentielle a été ajustée sur la courbe moyenne du scénario RCP8.5 (figure B.2). La figure B.4 présente l'évolution (hausse) du niveau d'eau obtenue en fonction des années en prenant pour point de départ 2010. La ligne continue bleue représente l'évolution exponentielle alors que la courbe pointillée rouge représente l'évolution linéaire selon le taux de relèvement des niveaux d'eau actuellement observé. Aucune provision n'est incluse dans cette courbe pour la variation d'élévation de la croûte terrestre (relèvement isostatique).

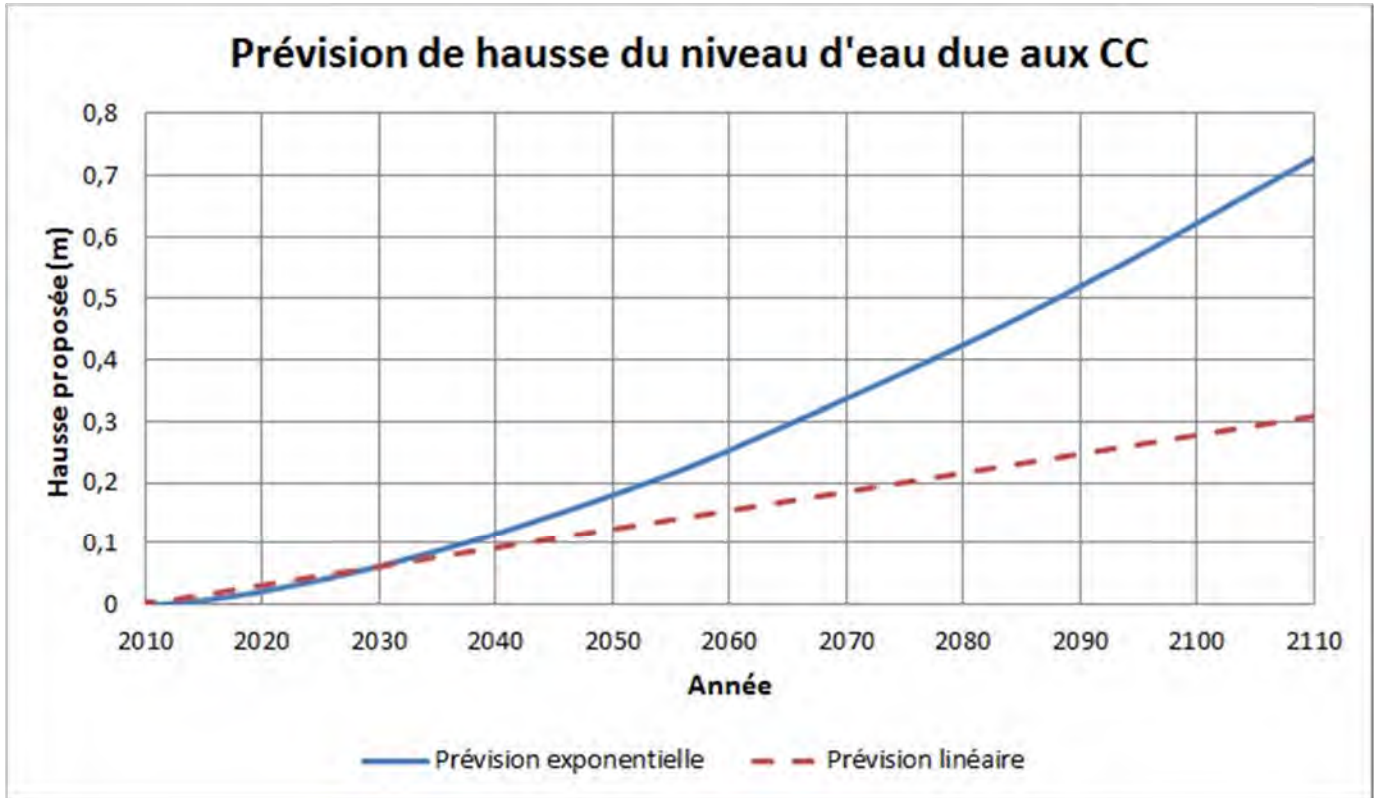


Figure B.4 Hausse de niveau d'eau proposée pour tenir compte des changements climatiques

Pour une échéance de 50 ans, cette courbe donne un rehaussement du niveau d'eau de 0,255 m.

B4 Relèvement isostatique dans la région de Québec

Ressources naturelles Canada (NRCan) met à la disposition du public un modèle permettant de calculer pour tout point au Canada le taux de mouvement de la croûte terrestre¹⁴.

Pour le site de la baie de Beauport, le taux de relèvement fourni par le modèle de NRCan est de 2,30 mm/an vers le haut. Il faudrait donc soustraire 115 mm (50 fois 2,3 mm) au rehaussement du niveau d'eau prévu à Beauport, ce qui donnerait un **rehaussement effectif du niveau d'eau de 0,14 m**.

¹⁴ <http://webapp.geod.nrcan.gc.ca/geod/tools-outils/trx.php>

B5 Étude des hausses du niveau d'eau du MPO

Une étude récente¹⁵ a été publiée par Pêches et Océans Canada (MPO) à propos des valeurs de rehausse du niveau d'eau à considérer le long des côtes du Canada. Les tableaux 5b et 6b de cette étude donnent les chiffres suivants comme allocation de hausse de niveau d'eau à considérer à Saint-François IO pour le scénario RCP 8.5 et la période allant de 1995 à 2050 :

- 0,25 m pour la hausse non-corrigée du niveau d'eau et
- **0,16 m** pour la hausse des niveaux d'eau corrigée des mouvements de la croûte terrestre.

Les deux approches sont cohérentes. C'est la valeur corrigée recommandée par le MPO (0,16 m pour une échéance de 50 ans) qui sera retenue.

B6 Niveaux d'eau hauts recommandés à Québec

L'analyse des niveaux d'eau aux stations marégraphiques proches de Godbout indique que les concepteurs d'infrastructures côtières ou portuaires dans cette région du Saint-Laurent devraient se servir des niveaux d'eau suivants qui tiendraient compte de la hausse probable du niveau des océans dans les prochaines années :

- | | | | |
|-----------------------------|------------|----|--------------|
| - Une heure par 50 années : | +7,10 m ZC | ou | +5,14 m NMM |
| - Une heure par 30 années : | +6,91 m ZC | ou | +4,95 m NMM |
| - Une heure par 10 années : | +6,68 m ZC | ou | +4,72 m NMM |
| - Une heure par 5 années : | +6,57 m ZC | ou | +4,61 m NMM |
| - Une heure par 2 années : | +6,42 m ZC | ou | +4,46 m NMM |
| - Une heure par année : | +6,30 m ZC | ou | +4,34 m NMM. |

Il serait important de suivre l'évolution des prévisions de rehaussement de niveaux d'eau en relation avec les changements climatiques pour s'assurer de la pertinence des niveaux d'eau obtenus avec les recommandations officielles

¹⁵ Zhai L., B. Greenan, J. Hunter, T.S. James, G. Han, R. Thomson, and P. MacAulay 2014. Estimating Sea-level Allowances for the coasts of Canada and the adjacent United States using the Fifth Assessment Report of the IPCC. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean. Sci. 300: v + 146 pp.

