



PORT DE QUÉBEC – EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Étude des conditions hydrosédimentologiques



Le Groupe-Conseil LaSalle Inc.

9620, rue Saint-Patrick, LaSalle (Québec) Canada H8R 1R8

Téléphone : (514) 366-2970 / Télécopieur : (514) 366-2971

Site Internet : www.gcl.qc.ca

Courrier électronique : gcl@gcl.qc.ca

***Rapport présenté à
Administration portuaire de Québec***

**PORT DE QUÉBEC – EXTENSION DU SECTEUR BEAUPORT
Étude des conditions hydrosédimentologiques**

R. 1744

Avril 2010

<Originale signée par>

Préparé par :

Catherine Denault, ing.

<Originale signée par>

Marc Villeneuve, ing.

414-103 (1086)

TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX.....	iii
LISTE DES FIGURES	iv
1.0 INTRODUCTION	1
2.0 MISE EN CONTEXTE.....	2
2.1 Zone à l'étude	2
2.2 Description du projet	2
2.3 Révision du concept.....	3
2.4 Variantes étudiées	6
3.0 DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE.....	9
3.1 Évolution morphologique de la pointe	9
3.1.1 Analyse des photos historiques du site.....	9
3.1.2 Visite du site.....	12
3.1.3 Stabilité de la plage actuelle	15
3.2 Analyse historique des niveaux d'eau et des vagues.....	19
3.2.1 Tendances historiques	19
3.2.2 Paramètres de conception	20
3.3 Analyse historique des glaces.....	21
4.0 MODÉLISATION NUMÉRIQUE	23
4.1 Modélisation hydrodynamique.....	23
4.1.1 Modèle MIKE 21 NHD.....	23
4.1.2 Limites de la zone modélisée.....	23
4.1.3 Numérisation de la bathymétrie	25
4.1.4 Conditions hydrodynamiques modélisées.....	31
4.1.5 Conditions aux limites	31
4.1.6 Paramètres de calculs.....	32
4.2 Modélisation des vagues et du transport sédimentaire	33
4.3 Validation du modèle numérique.....	33

TABLE DES MATIÈRES (suite)

5.0	RÉSULTATS DE MODÉLISATION	34
5.1	Processus modélisés	34
5.2	Variante modélisée	34
5.3	Courants de marée	35
5.4	Vagues	37
5.5	Courants de marée et courants littoraux	38
5.6	Transport sédimentaire	39
5.7	Variante privilégiée	50
6.0	CONCLUSIONS	52
	RÉFÉRENCES	54
	LEXIQUE	55

ANNEXE A – Expertise du Groupe-Conseil LaSalle

ANNEXE B – Rapport technique de la firme Consultants Ropars inc.

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Climat de vagues dans le secteur à l'étude	21
Tableau 2 : Position et étendue des bathymétries numériques	24
Tableau 3 : Réduction du transport sédimentaire par rapport aux conditions actuelles	40

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Port de Québec – Secteur Beauport	2
Figure 2 : Pointe de Beauport – Variante d'aménagement 2007.....	4
Figure 3 : Pointe de Beauport - Utilisation du site pour le <i>kitesurf</i>	5
Figure 4 : Pointe de Beauport – Variante d'aménagement 2009.....	8
Figure 5 : Photos aériennes du site	10
Figure 6 : Écarts de niveau entre le modèle de terrain 2005 et le modèle de terrain 1987	13
Figure 7 : Zones d'érosion et de déposition entre 2005 et 1987	14
Figure 8 : État de la pointe de Beauport à l'automne 2009	16
Figure 9 : Bathymétrie numérique et limites du modèle hydrodynamique.....	26
Figure 10 : Données du SHC dans la zone d'ensemble.....	27
Figure 11 : Données du SHC dans le secteur de Beauport.....	28
Figure 12 : Données bathymétriques et topographiques relevées en 2009	29
Figure 13 : Vue tridimensionnelle de la bathymétrie en conditions actuelles	30
Figure 14 : Conditions aux limites du modèle numérique.....	32
Figure 15 : Variantes d'aménagement modélisées	36
Figure 16 : Courants de marée de vive-eau au flot	42
Figure 17 : Courants de marée de vive-eau au jusant.....	43
Figure 18 : Simulation des vagues - Vagues entre l'ENE et l'E (78,75°).....	44
Figure 19 : Simulation des vagues - Vagues de l'ENE (67,5°)	45
Figure 20 : Courants de marée et courant littoraux – Vagues entre l'ENE et l'E (78,75°)	46
Figure 21 : Courants de marée et courants littoraux - Vagues de l'ENE (67,5°)	47
Figure 22 : Transport sédimentaire - Vagues entre l'ENE et l'E (78,75°)	48
Figure 23 : Transport sédimentaire - Vagues de l'ENE (67,5°)	49
Figure 24 : Variante 2009 - Modifications proposées	51

1.0 INTRODUCTION

L'Administration portuaire de Québec (APQ) étudie actuellement un projet d'extension du secteur portuaire Beauport, avec la mise en place de deux nouveaux quais dans le prolongement du quai 53.

Les impacts hydrodynamiques et sédimentologiques liés à ce projet ont fait l'objet de deux études récentes du Groupe-Conseil LaSalle¹ (réf. [1] et [2]). Au terme de la dernière étude, une configuration préférentielle de l'extension portuaire avait été définie en collaboration avec les représentants de la firme d'ingénierie CIMA+, qui étaient responsables de l'étude de préfaisabilité du projet (réf. [3]). La variante retenue répondait aux besoins fonctionnels du port, permettait d'équilibrer les volumes de remblais avec ceux dragués devant les nouveaux quais et était conçue en vue de minimiser les risques d'érosion, favorisant ainsi la pérennité de la plage. L'aménagement proposé augmentait également la longueur de la plage destinée aux activités récréatives.

La présente étude vise à parfaire et optimiser la conception de l'extension portuaire de manière à minimiser les risques d'érosion, et confirmer que l'extension proposée conduit à une stabilité accrue de la plage. L'analyse repose sur la caractérisation de l'évolution morphologique de la pointe de Beauport, l'historique des conditions hydrodynamiques ayant pu conduire à l'érosion de la plage actuelle, et la comparaison des conditions hydrosédimentologiques obtenues par modélisation numérique en conditions actuelles puis en présence du nouvel aménagement.

La méthodologie et les résultats sont présentés en quatre sections. La section 2 offre d'abord une description du projet et des futurs aménagements. La section 3 présente ensuite l'analyse effectuée pour caractériser la dynamique sédimentaire de la pointe de Beauport. La section 4 décrit les principaux paramètres de la modélisation numérique bidimensionnelle mise en œuvre pour prédire les conditions hydrosédimentologiques du site à l'étude. Finalement, les résultats de modélisation obtenus en conditions actuelles et en présence de l'extension portuaire font l'objet de la section 5.

¹ L'expertise du Groupe-Conseil LaSalle est présentée à l'annexe A.

2.0 MISE EN CONTEXTE

2.1 Zone à l'étude

Le projet d'expansion du port de Québec faisant l'objet de la présente étude est situé dans le secteur Beauport. Les quais 50 à 53 forment actuellement une ligne continue et délimitent la rive nord de l'estuaire de la rivière Saint-Charles (figure 1). La plage actuellement utilisée à des fins récréatives, notamment par les véliplanchistes, est située au nord-est du secteur portuaire, dans la portion supérieure de la pointe.



Figure 1 : Port de Québec – Secteur Beauport

2.2 Description du projet

Le projet d'extension portuaire du secteur Beauport consiste en la construction de deux nouveaux postes à quais (54 et 55) en eau profonde dans le prolongement du quai 53, avec une zone d'arrière-quai suffisamment grande pour une gestion efficace des solides et des liquides en vrac.

En phase de préfaisabilité, outre des critères d'ingénierie, la variante d'aménagement de la zone d'extension devait tenir compte des fonctions récréatives et biologiques existantes et potentielles du secteur de la baie de Beauport. Dans ce contexte, la variante proposée devait également viser les objectifs suivants :

- Éliminer les problèmes d'instabilité et de transport sédimentaire observés depuis la mise en place de l'aménagement actuel, et ainsi favoriser la pérennité de la future plage;
- Favoriser le développement d'un milieu humide dans le rentrant sud-ouest (voir figure 1).

La configuration de l'extension portuaire finalement retenue au terme des études de 2007 est illustrée à la figure 2. Elle consiste en une nouvelle ligne de quai longue de 610 m formant un angle de 17° avec les quais 50 à 53, avec des fonds dragués à -16 m (ZC)² devant les quais. La nouvelle plage est longue d'environ 600 m, et orientée de manière à diminuer les courants littoraux et l'érosion qui en résulte en présence de vagues de tempêtes issues de l'est (E) et de l'est-nord-est (ENE).

La jetée située à la limite nord de la plage agit comme un épi visant à freiner le transport littoral qui, en conditions actuelles, tend à déplacer le sable érodé le long de la plage vers le rentrant sud-ouest. La jetée proposée et la configuration générale de la portion nord de l'extension permettent également de mieux protéger le rentrant sud-ouest contre l'agitation due aux vagues, favorisant ainsi un meilleur épanouissement de cette zone en un milieu humide.

2.3 Révision du concept

Suite aux études de préfaisabilité, la construction d'infrastructures (chalet, parc, stationnements, etc.) visant la mise en valeur du site semble avoir passablement augmenté sa fréquentation. La diversification des activités récréatives et les besoins de chacun des groupes d'utilisateurs ont ainsi pu être mieux identifiés.

² (ZC) indique un niveau exprimé par rapport au zéro des cartes. À Québec, l'écart entre le zéro des cartes et le niveau géodésique (ou niveau moyen des mers (NMM)) est de 1,96 m : $H_{zc} = H_{nmm} + 1,96$.

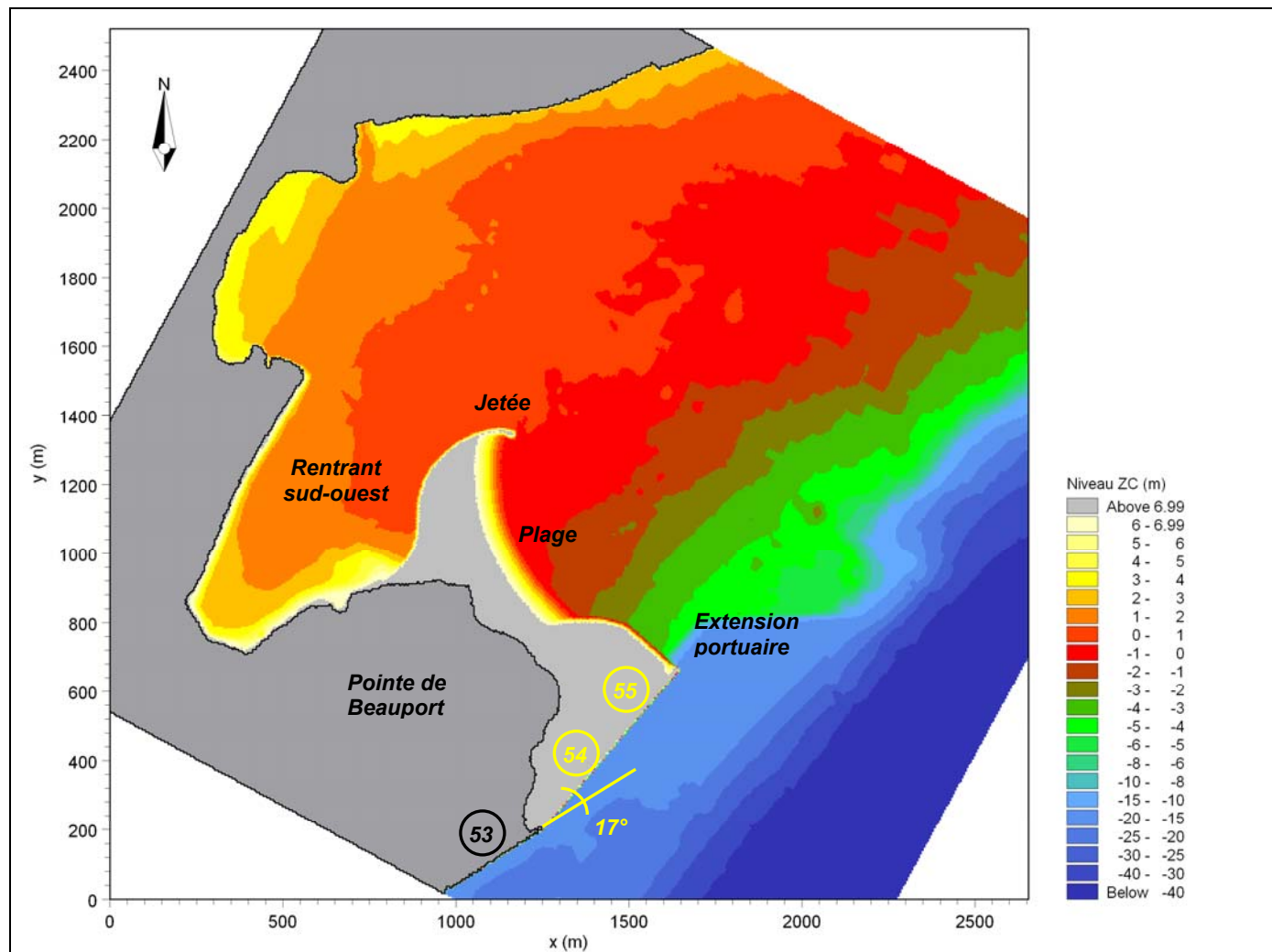


Figure 2 : Pointe de Beauport – Variante d'aménagement 2007

Il apparaît aujourd'hui que l'aménagement proposé aux termes des études de 2007 répond bien aux besoins de tous les utilisateurs du site, à l'exception d'un nouveau groupe d'utilisateurs, les *kitesurfers*. En effet, le concept de 2007 propose aux visiteurs, futurs baigneurs et véliplanchistes une plage commune, plus longue qu'en conditions actuelles. Aucun accès à l'eau n'est toutefois prévu le long de la rive du rentrant sud-ouest, qui est constitué d'un talus en enrochements.

Or, diverses sources d'information (vidéos, photos aériennes, usagers du site) indiquent que la flèche sableuse formée à l'extrémité nord de la plage représente l'accès privilégié au plan d'eau pour les adeptes du *kitesurf*, un sport dont la popularité a fortement augmenté ces dernières années. Tel qu'illustré à la figure 3, la variante d'aménagement proposée en 2007 élimine complètement cet accès au plan d'eau.

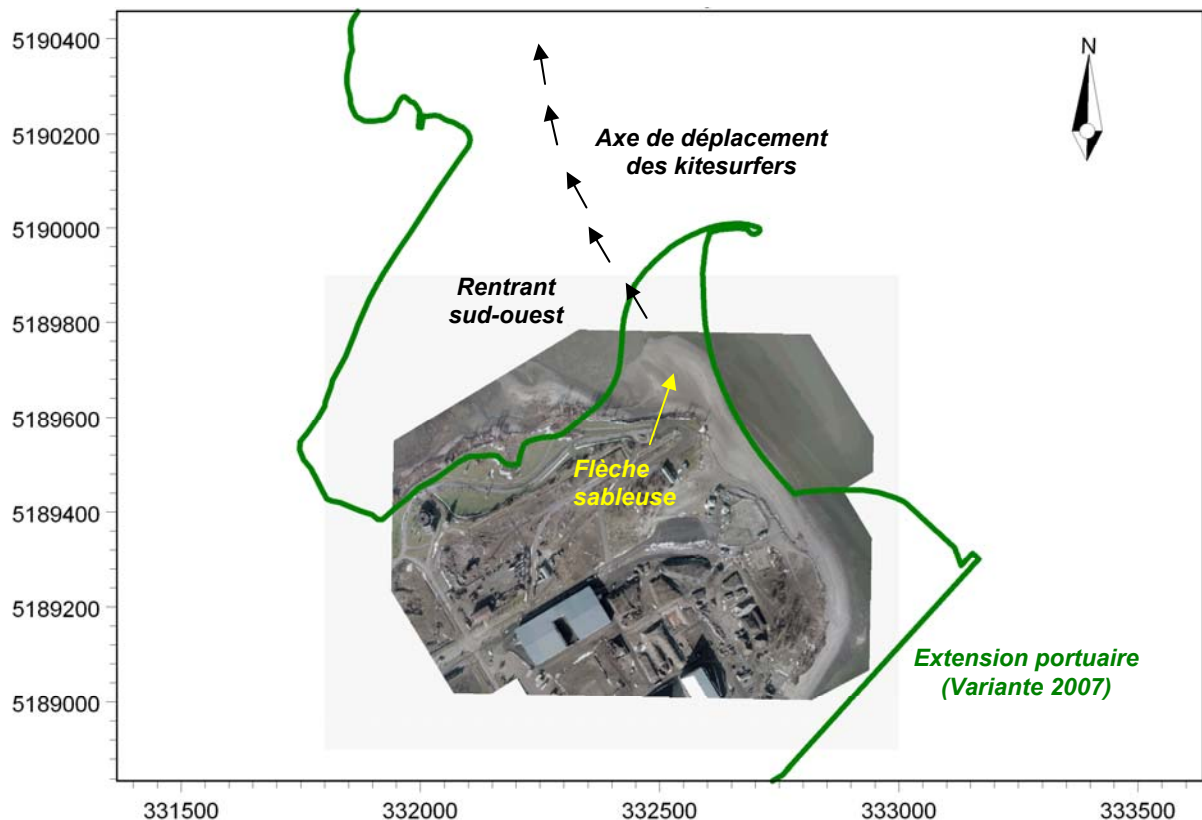


Figure 3 : Pointe de Beauport - Utilisation du site pour le *kitesurf*

Les sources d'informations consultées montrent également que l'utilisation du site par les *kitesurfers* se limite avant tout aux épisodes de vents issus des secteurs nord-est (NE) à E, avec un axe de déplacement nord-sud correspondant approximativement à la limite externe du rentrant sud-ouest (voir figure 3). Pour les autres vents dominants, issus des secteurs ouest (O) à sud-ouest (SO), l'utilisation du site par les *kitesurfers* semble très limitée. En effet, l'axe de navigation conduit alors vers le large et la voie de navigation du Saint-Laurent, avec les risques que cela implique : forts courants de marée, présence de navires, etc.

Par vents des secteurs NE à E, la longue plage de l'aménagement de 2007 serait problématique pour les *kitesurfers* car l'accès à l'axe de navigation privilégié, en bordure du rentrant sud-ouest, impliquerait d'abord de louvoyer contre le vent de manière à contourner la jetée prévue à l'extrémité de la plage. Cette manœuvre est généralement envisageable pour la plupart des planches à voile mais peut être très difficile sur un *kitesurf*.

Dans ce contexte, il a été décidé, de concert avec les représentants de l'APQ et des Consultants Ropars, de mettre au point et d'analyser une deuxième variante d'aménagement permettant de préserver les conditions d'utilisation actuelles du site par les *kitesurfers* (figure 4). La nouvelle extension portuaire proposée comporte désormais deux accès à l'eau : une plage principale est maintenue le long de la limite nord-est de l'extension et la rive longeant le rentrant sud-ouest offre un accès aux *kitesurfers* similaire à celui utilisé en conditions actuelles.

2.4 Variantes étudiées

Des points de vue récréatifs et environnementaux, les variantes 2007 et 2009 présentent toutes deux des avantages différents. La variante 2007 propose une longue plage aux plaisanciers et véliplanchistes, et favorise le développement d'un milieu humide intertidal dans le rentrant sud-ouest. La variante 2009 propose non seulement une longue plage, mais aussi un accès à l'eau du côté du rentrant sud-ouest, répondant ainsi aux besoins de tous les utilisateurs du site : plaisanciers, véliplanchistes et *kitesurfers*. La nouvelle configuration abaisse toutefois le niveau de protection offert au rentrant sud-ouest contre l'agitation due aux vagues des secteurs NE à E. La variante 2009 offre donc a priori une réduction du potentiel de formation d'une zone de marais dans le rentrant sud-ouest.

Il faut également souligner que les deux variantes permettent de prévenir l'intrusion dans le rentrant sud-ouest des sables érodés le long de la plage.

Le choix final de la variante d'aménagement dépend de plusieurs facteurs dépassant le cadre du présent mandat. La présente étude se concentre sur la modélisation des conditions hydrodynamiques (niveaux d'eau et courants) et sédimentologiques (transport des sédiments, risques d'érosion et de déposition) des deux variantes proposées.

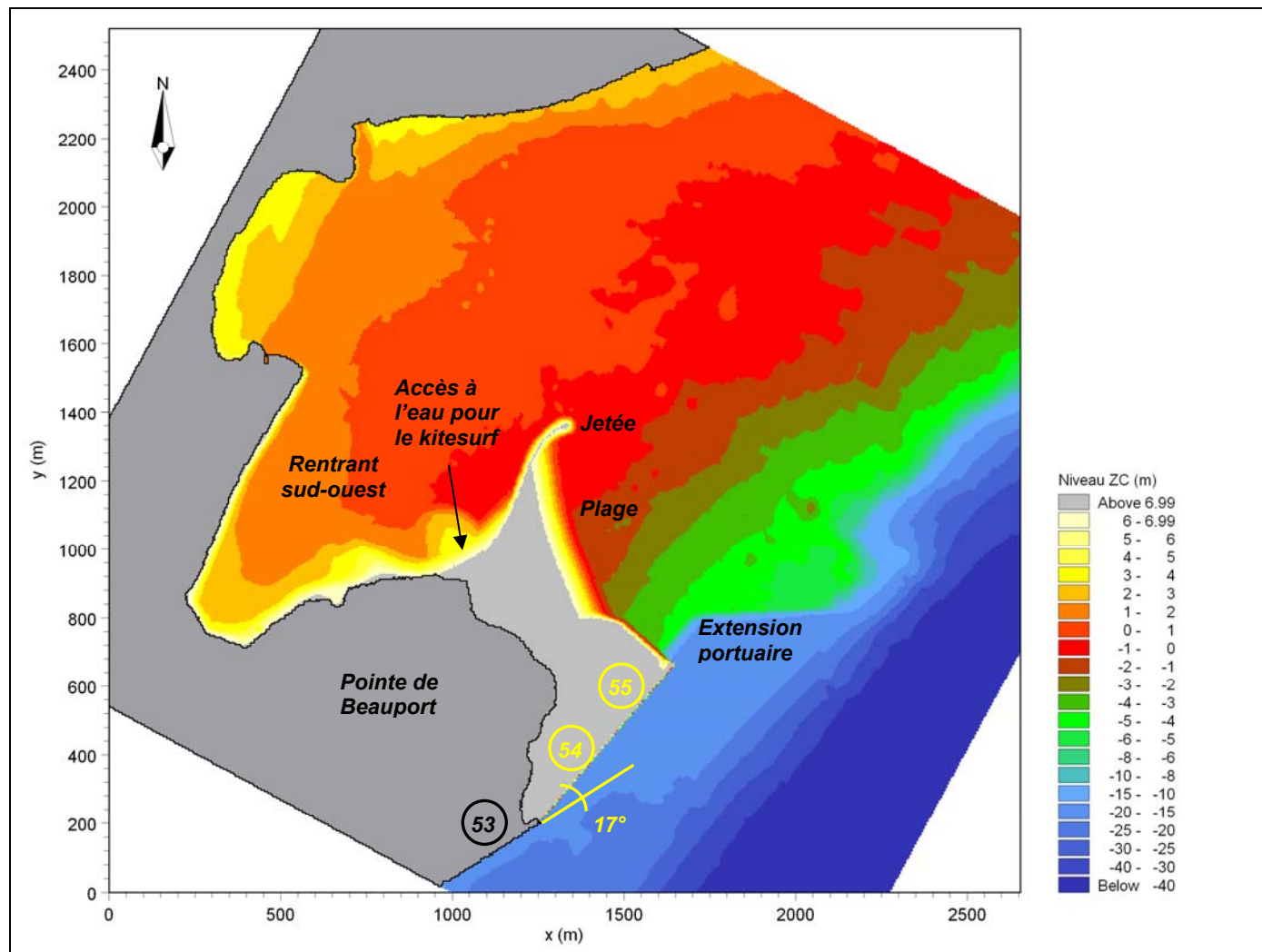


Figure 4 : Pointe de Beauport – Variante d'aménagement 2009

3.0 DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE

En vue de mieux comprendre la dynamique sédimentaire actuelle du site et d'assurer une représentativité optimale de la modélisation numérique du transport sédimentaire, des analyses préalables ont été effectuées dans le cadre de la présente étude :

- Une analyse des photos aériennes du site prises depuis son aménagement initial devait d'abord permettre de caractériser l'évolution morphologique de la pointe de Beauport (section 3.1.1). Cette analyse a été complétée par une visite du site, effectuée par les représentants du GCL, le 8 octobre 2009 (section 3.1.2);
- Une analyse historique des niveaux d'eau et des vagues applicables au site a également été réalisée, en vue de mieux comprendre l'évolution temporelle de la pointe et, plus précisément, d'établir si l'érosion de la pointe s'est produite de manière graduelle au fil des ans ou si, au contraire, elle ne s'est effectuée que ces dernières années. Cette analyse, présentée à la section 3.2, a aussi permis de définir certains paramètres de conception des futurs ouvrages et de valider les hypothèses ayant servi à la modélisation des conditions hydrosédimentologiques;
- L'analyse temporelle des niveaux d'eau et des vagues a été complétée par un examen du régime des glaces dans le secteur à l'étude (section 3.3).

3.1 Évolution morphologique de la pointe

3.1.1 Analyse des photos historiques du site

La pointe de Beauport a été aménagée à partir de la fin des années '60 à l'aide des matériaux dragués pour permettre l'accès aux nouveaux postes à quais 51 à 53. La figure 5 présente quatre photos aériennes du site prises au fil des ans, entre 1973 et 2005. Afin de caractériser l'évolution morphologique de la pointe de Beauport depuis sa mise en place initiale, une analyse des photos illustrées à la figure 5 a été réalisée en sous-traitance par la firme CIMA+, qui a confié au Groupe LPA le mandat de procéder à l'orthorectification des photos aériennes, puis de produire des modèles de terrain basés sur ces orthophotos.

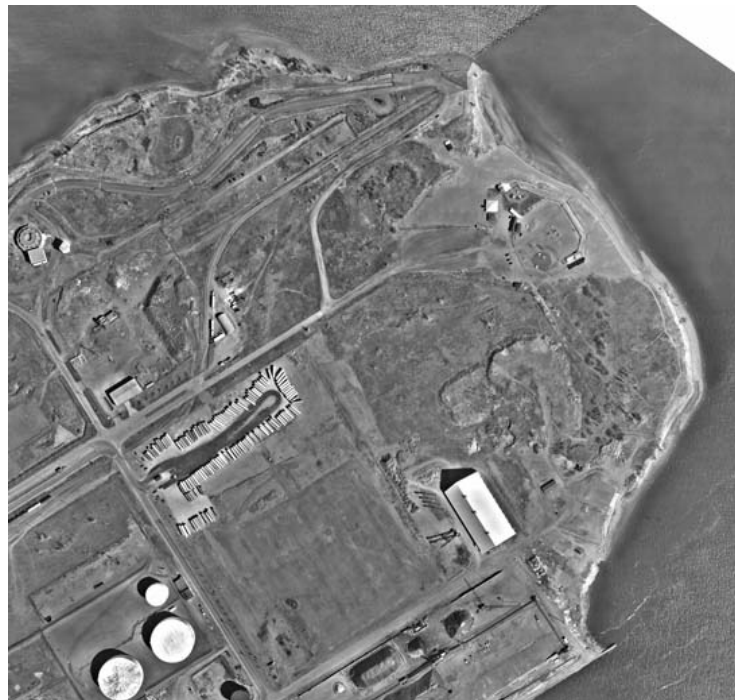


a) 1973



b) 1987

Figure 5 : Photos aériennes du site



c) 1999



d) 2005

Figure 5 (suite) : Photos aériennes du site

L'examen visuel de la photo prise en 1973 (figure 5a) révèle que la mise en place de la pointe de Beauport n'était pas encore complétée à cette époque. Cette photo n'a donc pas été utilisée dans l'analyse de l'évolution de la plage. Ce sont les photos de 1987 (figure 5b) et 2005 (figure 5d) qui ont finalement été retenues pour analyse, celle de 1999 (figure 5c) ayant été prise à marée haute et étant par conséquent moins révélatrice pour caractériser l'évolution de la plage.

La figure 6 présente les écarts de niveau obtenus en soustrayant les niveaux du modèle de terrain de 1987 de ceux de 2005, avec en arrière-plan la photo aérienne de 2005. L'analyse de comparaison a été effectuée pour les isobathes situées entre - 1,0 m (ZC) et +1,5 m (ZC). Les zones en bleu, vert et gris présentent des écarts de niveau négatifs, indiquant une érosion depuis 1987, tandis que les zones en orangé, rose et violet présentent des écarts de niveau positifs, synonymes d'accumulation depuis 1987. La figure 7 résume ces résultats sans gradation de couleur : la zone d'érosion est en rouge et la zone d'accumulation en bleu.

Les résultats présentés aux figures 6 et 7, de même que la visite du site (voir section suivante), confirment l'instabilité de la plage actuelle, et la forte tendance des sédiments à migrer vers le nord de la pointe, menant à la création de la flèche sableuse clairement visible en conditions actuelles (voir figures 5d et 6). Ces données montrent également que les sables érodés par les vagues le long de la plage viennent à contourner cette flèche pour se déposer dans les zones plus calmes du rentrant sud-ouest.

3.1.2 Visite du site

Les déplacements des sédiments mis en évidence par la comparaison des modèles de terrain de 1987 et de 2005 sont également confirmés par la composition des sédiments retrouvés sur le site. Les figures 8b à 8e présentent des photos de la pointe prises lors d'une visite du site le 8 octobre 2009. La figure 8a illustre l'emplacement où chacune des photos a été prise.

Dans la partie sud de la pointe (figure 8b), la plage comporte une fraction importante de matériaux grossiers (graviers et cailloux). L'érosion des sédiments plus fins n'a laissé en place que ces sédiments de plus gros calibre, qui protègent aujourd'hui la plage par effet de pavage.

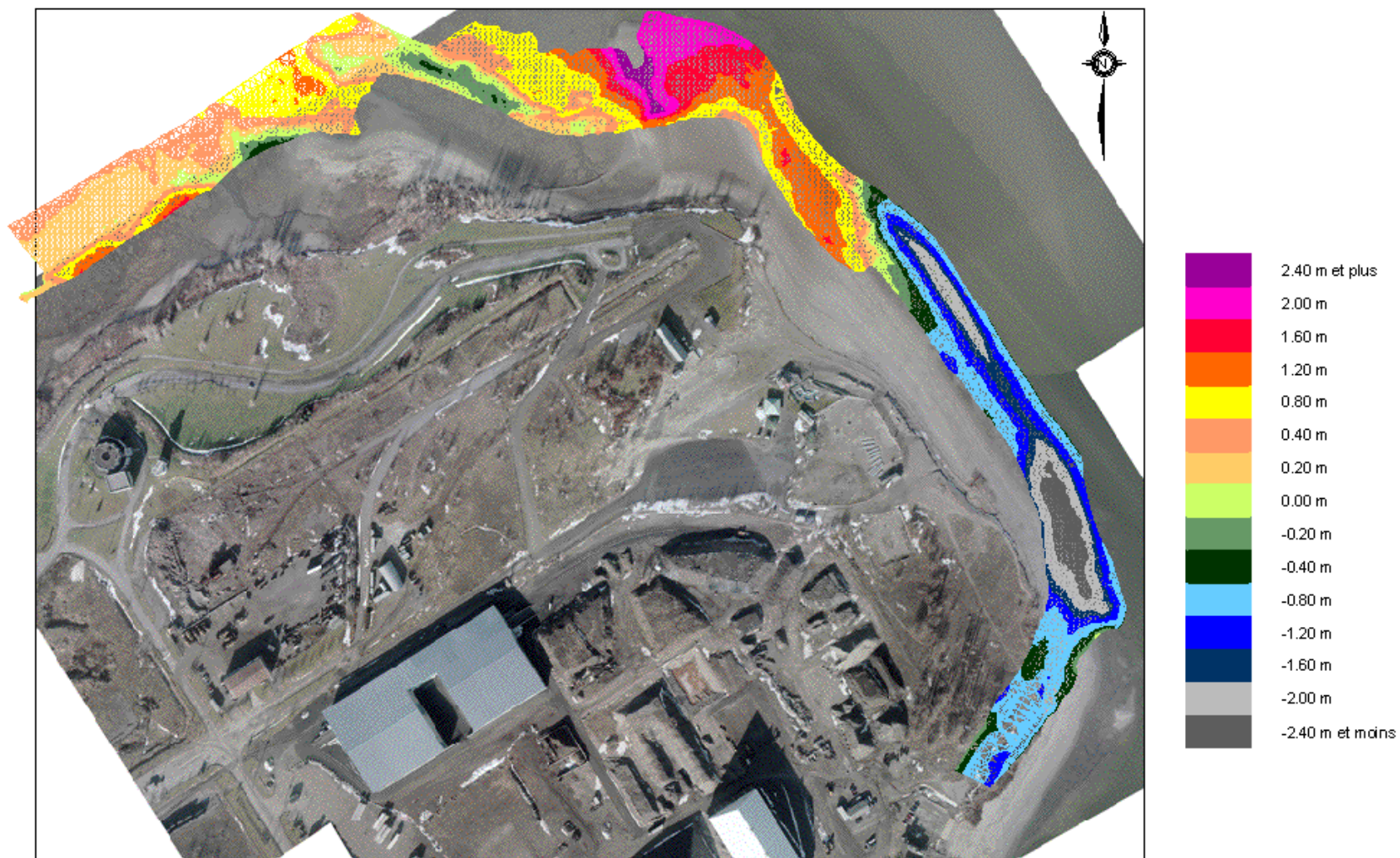


Figure 6 : Écarts de niveau entre le modèle de terrain 2005 et le modèle de terrain 1987

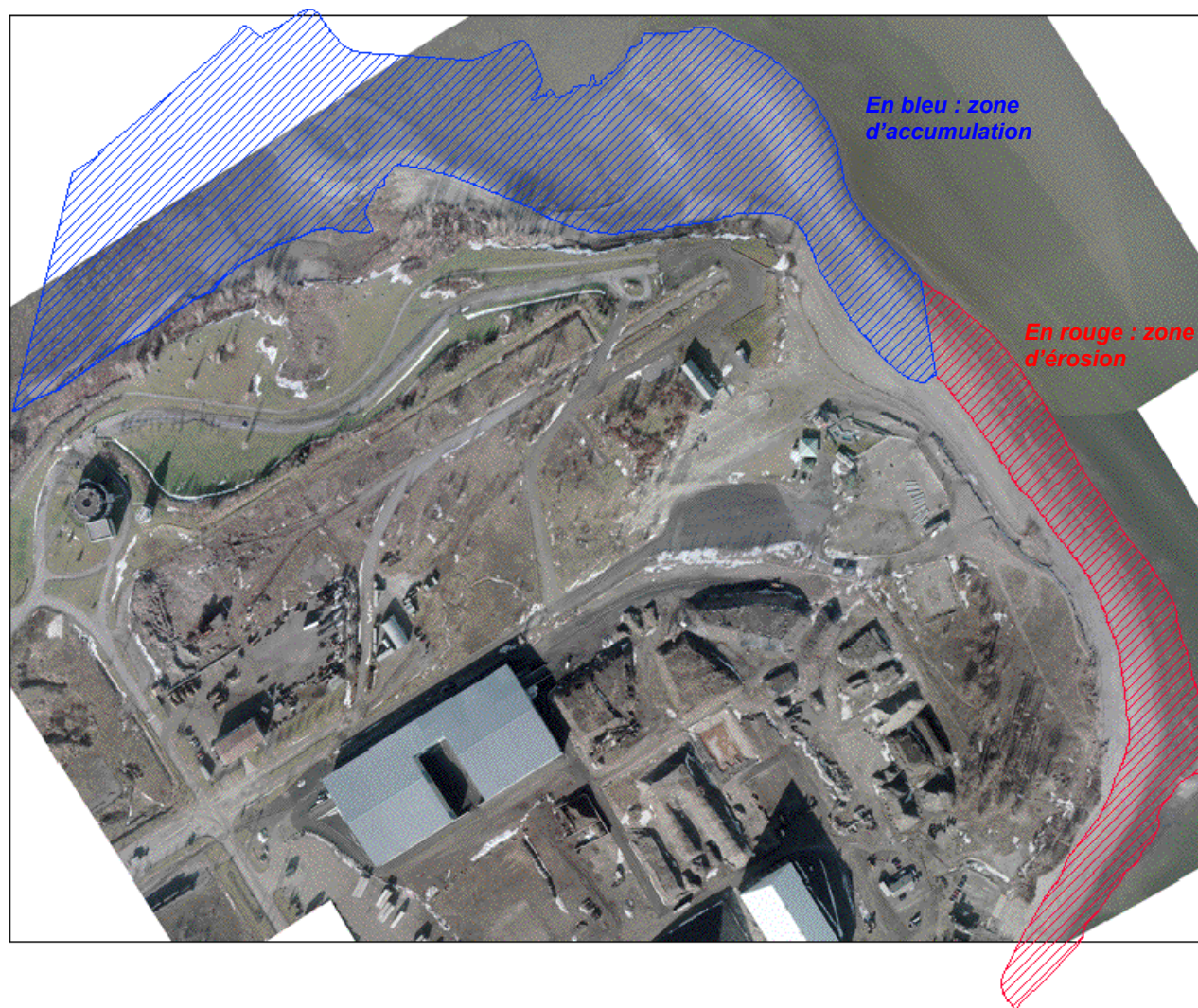


Figure 7 : Zones d'érosion et de déposition entre 2005 et 1987

On note également dans cette zone un recul important des talus dans le haut de plage (figure 8c). Dans la zone intermédiaire de la plage (figure 8d), la proportion en sable est plus élevée et l'effet de pavage est moins marqué. Les cailloux et graviers qui s'y trouvent sont de taille moins importante que dans la zone située plus au sud. Finalement, plus au nord (figure 8e) et du côté du rentrant sud-ouest (figure 8f), les sédiments sont majoritairement composés de sables.

3.1.3 Stabilité de la plage actuelle

L'analyse des photos aériennes du site et la composition des sédiments constituant la plage montrent une forte tendance à l'érosion et démontrent clairement que la plage actuelle n'est pas stable. Le moteur principal de l'érosion réside dans l'agitation et les courants littoraux³ créés par les vagues de tempêtes issues des secteurs NE à E.

La portion sud de la pointe a déjà été soumise à une érosion importante, laissant en place un pavage de matériaux grossiers. À l'extrémité sud de la pointe, les sédiments érodés ont probablement été chassés vers le large par l'action combinée des courants littoraux (vagues) et des courants de flot (marée). Toutefois, la majeure partie des sables érodés par les vagues ont été déplacés vers le nord, contribuant à la formation de la flèche sableuse et au début d'ensablement du rentrant sud-ouest.

À long terme, la migration des sables vers le nord (et le rentrant sud-ouest) devrait se poursuivre, conduisant graduellement dans la portion nord de la plage à la formation d'un pavage de graviers et de cailloux similaire à celui actuellement observé dans la portion sud.

Cette conclusion, qui était également formulée dans l'étude de 2007 (réf. [3]), semble indéniable. L'échelle de temps requise pour que l'aspect de la portion nord de la plage soit ainsi modifié est toutefois très difficile à établir. On ne peut parler ici d'un effet à court terme (quelques années), mais il est en retour évident que l'aménagement actuel ne permet pas d'assurer la pérennité à long terme de la plage.

³ Voir le lexique à la fin du texte pour la définition des principaux termes techniques utilisés dans le présent rapport.



a) Emplacement des photos



b) Sédiments grossiers et effet de pavage dans la zone sud de la pointe (vue vers le nord)

Figure 8 : État de la pointe de Beauport à l'automne 2009



c) Érosion du talus en haut de plage dans la zone sud de la plage



d) Sable et de gravier dans la zone intermédiaire de la plage (vue vers le nord)

Figure 8 (suite) : État de la pointe de Beauport à l'automne 2009



e) Sable dans la zone nord de la pointe (vue vers le sud)



f) Sable dans le rentrant sud-ouest

Figure 8 (suite) : État de la pointe de Beauport à l'automne 2009

3.2 Analyse historique des niveaux d'eau et des vagues

L'analyse présentée à la section précédente démontre clairement que la pointe actuelle de Beauport est en érosion. Les photos aériennes du site ne sont pas assez nombreuses pour déterminer si cette érosion s'est produite graduellement ou uniquement ces dernières années. Il est donc possible que l'érosion de la pointe ait débuté dès la mise en place initiale de l'extension portuaire. Il est par contre aussi possible que des phénomènes plus récents attribuables aux changements climatiques (absence de glace en début et en fin d'hiver, rehaussement du niveau d'eau, augmentation du nombre de tempêtes, etc.) aient augmenté la vulnérabilité de la pointe à l'érosion ces dernières années seulement.

Afin de compléter les informations ayant trait aux conditions hydrosédimentologiques, et de mieux comprendre l'érosion observée sur le site, une analyse des données historiques des niveaux d'eau et des vagues a été réalisée par la firme Consultants Ropars (CRI) (réf. [4]). Le rapport complet de cette étude est annexé au présent rapport, à l'annexe B.

3.2.1 Tendances historiques

a) Niveaux d'eau

Les données horaires de niveaux d'eau enregistrés à la station de Lauzon ont été analysées de 1950 à 2009. L'analyse de ces données révèle une évolution décroissante des niveaux moyens et une relative constance des niveaux d'eau maximums depuis 1950. Il n'y a donc pas eu d'augmentation significative des niveaux d'eau dans le secteur à l'étude depuis la mise en place initiale de la pointe.

b) Vents et vagues

En l'absence de données de vagues applicables au secteur à l'étude, on utilise les données de vents recueillies aux stations météorologiques avoisinantes pour calculer le régime des vagues. La tendance historique du climat des vagues est donc déduite directement de l'évolution du climat des vents.

Des données de vents sont disponibles à trois stations météorologiques situées à proximité de la pointe de Beauport : aéroport de Québec, Lauzon et Beauport. La station de l'aéroport de Québec n'a pas été retenue, sa localisation étant trop à l'intérieur des terres. Les seules

données de vent (direction et vitesse) disponibles aux stations de Beauport et de Lauzon couvrent des périodes respectives de 1991 à 2006 et de 1999 à 2009.

Pour les deux stations considérées, il n'y a pas de patron évident d'évolution du climat des vagues. Il faut toutefois souligner que la période de disponibilité des données est trop limitée pour véritablement détecter une tendance à long terme.

3.2.2 Paramètres de conception

L'analyse des données historiques de niveaux d'eau et de vents a également permis de déterminer les paramètres de dimensionnement des protections en enrochements des aménagements projetés ainsi que le climat de vagues à considérer dans la modélisation des conditions hydrosédimentologiques du site.

a) Niveaux d'eau

L'analyse des niveaux d'eau à la station de Lauzon indique qu'il faudrait retenir les niveaux suivants pour le dimensionnement des ouvrages :

- Pour les calculs concernant la réfraction des vagues lors d'événements de tempête se produisant régulièrement, sans tenir compte des changements climatiques en cours, il est recommandé de considérer un niveau d'eau de +5,9 m (ZC). Le dimensionnement de la crête des ouvrages en enrochement devrait être effectué pour ce même niveau;
- Une vérification de la conception des digues et des plages en fonction des vagues et des glaces devrait également être faite pour un niveau d'eau extrême haut probable de 6,8 m (ZC) pour s'assurer que les dommages en relation avec un tel événement exceptionnel restent acceptables.

Il est recommandé de tenir compte d'un rehaussement de 0,5 m du niveau d'eau attribuable aux changements climatiques. Les niveaux d'eau de conception tenant compte de la hausse probable du niveau des océans dans les prochaines décennies sont ainsi de 6,4 m et 7,3 m (ZC).

a) Vagues

Les climats de vagues établis à partir des données de vents des stations de Lauzon et de Beauport montrent que les vagues déterminantes en termes de dimensionnement de la plage ou des protections en enrochement viennent exclusivement des secteurs est à nord-est.

L'étude de la hauteur des vagues au large a permis de fixer à environ 1,6 m la hauteur significative des vagues se produisant dans la baie de Beauport une fois tous les 35 à 50 ans (vie utile standard des ouvrages côtiers).

Le tableau 1 présente les conditions de vagues retenues lors de la précédente analyse en 2007 (réf. [1]). Ces vagues se produisent environ une trentaine d'heures et une cinquantaine d'heures par année respectivement et semblent représentatives des conditions hydrodynamiques qui feraient évoluer la plage des battures de Beauport, surtout dans le cadre d'une comparaison entre les conditions actuelles et les conditions futures.

Tableau 1 : Climat de vagues dans le secteur à l'étude

Direction	Période (s)	Hauteur significative (m)
ENE	3,9	0,76
E	3,9	0,71

Il est à noter que le climat de vagues du tableau 1 représente des conditions de vagues au large de la pointe de Beauport, en eau profonde, où l'influence du niveau d'eau est négligeable. L'influence du niveau d'eau sur les vagues près de la berge est prise en compte dans les simulations de la réfraction des vagues et du transport sédimentaire (cf. section 4.2).

3.3 Analyse historique des glaces

En parallèle à l'analyse des données historiques de niveaux d'eau et de vents, le GCL a effectué une revue de la cartographie des glaces du fleuve en vue de documenter une

réduction potentielle au fil des ans de la couverture de glace de batture aux abords de la pointe de Beauport.

Les cartographies de glace préparées à partir des observations de la Garde côtière canadienne ont d'abord été rassemblées. Celles-ci offrent un excellent degré de précision dans la représentation de la glace de batture et dans l'évolution temporelle des conditions de glace (cartes quotidiennes), mais ne sont conservées que pour les cinq dernières années.

Le Service canadien des glaces d'Environnement Canada offre un vaste inventaire de données historiques des glaces. Ces archives couvrent toutefois de grandes étendues et ne permettent pas de discerner la couverture des glaces à proximité de la pointe de Beauport.

Le manque de données relatives aux glaces dans le secteur à l'étude n'a donc pas permis de mettre en relation les conditions de glace avec l'érosion de la plage observée sur le site.

4.0 MODÉLISATION NUMÉRIQUE

La modélisation numérique des conditions hydrosédimentologiques a été effectuée à l'aide des divers modules du modèle bidimensionnel MIKE21. Ce modèle commercial, conçu au Danemark par la firme *DHI Water & Environment* jouit d'une réputation internationale et a été utilisé avec succès dans de nombreux projets impliquant la simulation des écoulements en milieux fluviaux, estuariens et côtiers.

4.1 Modélisation hydrodynamique

4.1.1 Modèle MIKE 21 NHD

La modélisation des courants induits par la marée et les vagues (courants littoraux) repose sur le module NHD (*Nested Hydrodynamics*) de MIKE 21, qui permet d'imbriquer des maillages de résolution variable pour représenter la bathymétrie. Les zones d'intérêts 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.

D'après les conditions imposées aux limites de la zone considérée, le modèle fournit les valeurs de niveaux et de vitesses d'écoulement intégrées sur la verticale en chacun des points de maillage de la bathymétrie.

Le modèle utilisé en 2007 (réf. [1]) a été modifié pour définir de nouvelles zones de maillage et pour intégrer de nouveaux relevés bathymétriques et topographiques effectués en 2009 dans le secteur de la pointe de Beauport et dans le rentrant sud-ouest.

4.1.2 Limites de la zone modélisée

La figure 9 illustre l'étendue de la zone couverte par le modèle numérique hydrodynamique. 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. Ces limites coïncident avec celles du modèle physique du port exploité par le GCL de 1972 à 1990. Cet agencement permet de bénéficier pour le réglage du modèle numérique des résultats de

modélisation physique, de même que des relevés in situ de 1971 qui avaient servi à l'étalonnage du modèle réduit.

La configuration adoptée permet également 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.

Afin d'obtenir une bathymétrie numérique suffisamment précise dans les secteurs à l'étude, tout en évitant des temps de calculs excessifs pouvant résulter de l'application d'un maillage trop fin à l'ensemble de la zone modélisée, des maillages de résolution variable ont été mis à profit. Comme l'indique la figure 9, trois niveaux de maillage ont été utilisés :

- Maillage d'ensemble en utilisant des cellules carrées de $\Delta x = \Delta y = 45$ m;
- Maillage secondaire de $\Delta x = \Delta y = 15$ m couvrant l'ensemble du secteur Beauport;
- Maillage fin de $\Delta x = \Delta y = 5$ m englobant l'estuaire de la rivière Saint-Charles et la zone d'extension des futurs quais 54 et 55.

Le tableau 2 donne la position et l'étendue de chacune des bathymétries imbriquées dans le modèle numérique.

Tableau 2 : Position et étendue des bathymétries numériques

Numéro de bathymétrie	$\Delta x = \Delta y$ (m)	Longueur x (m)	Longueur y (m)	Origine		
				Est (UTM19)	Nord (UTM19)	Relative
1	45	19 260	22 680	352 000,00	5 191 737,00	--
2	15	2 925	2 790	334 919,52	5 190 322,76	(313,217)
3	5	2 655	2 520	334 735,12	5 190 273,35	(9,9)

4.1.3 Numérisation de la bathymétrie

Les données bathymétriques de base utilisées pour le montage du modèle numérique MIKE 21 ont été obtenues auprès du Service hydrographique du Canada (SHC) :

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.

Les figures 10 et 11 illustrent la zone couverte par chacun des relevés hydrographiques. Les profondeurs ont été exprimées par rapport au zéro des cartes (ZC) à Québec et positionnées dans le système de coordonnées géographiques UTM (zone 19).

Les relevés hydrographiques du SHC dans la zone littorale de 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 du présent mandat, des relevés additionnels ont donc 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 situées entre la limite supérieure des plans bathymétriques du SHC et le niveau de marée extrême de +7,1 m (ZC) enregistré dans le port de Québec. Les données bathymétriques et topographiques relevées en 2009 sont illustrées à la figure 12. La figure 13 offre une vue tridimensionnelle de la bathymétrie de l'estuaire de la rivière Saint-Charles et des abords de la pointe de Beauport.



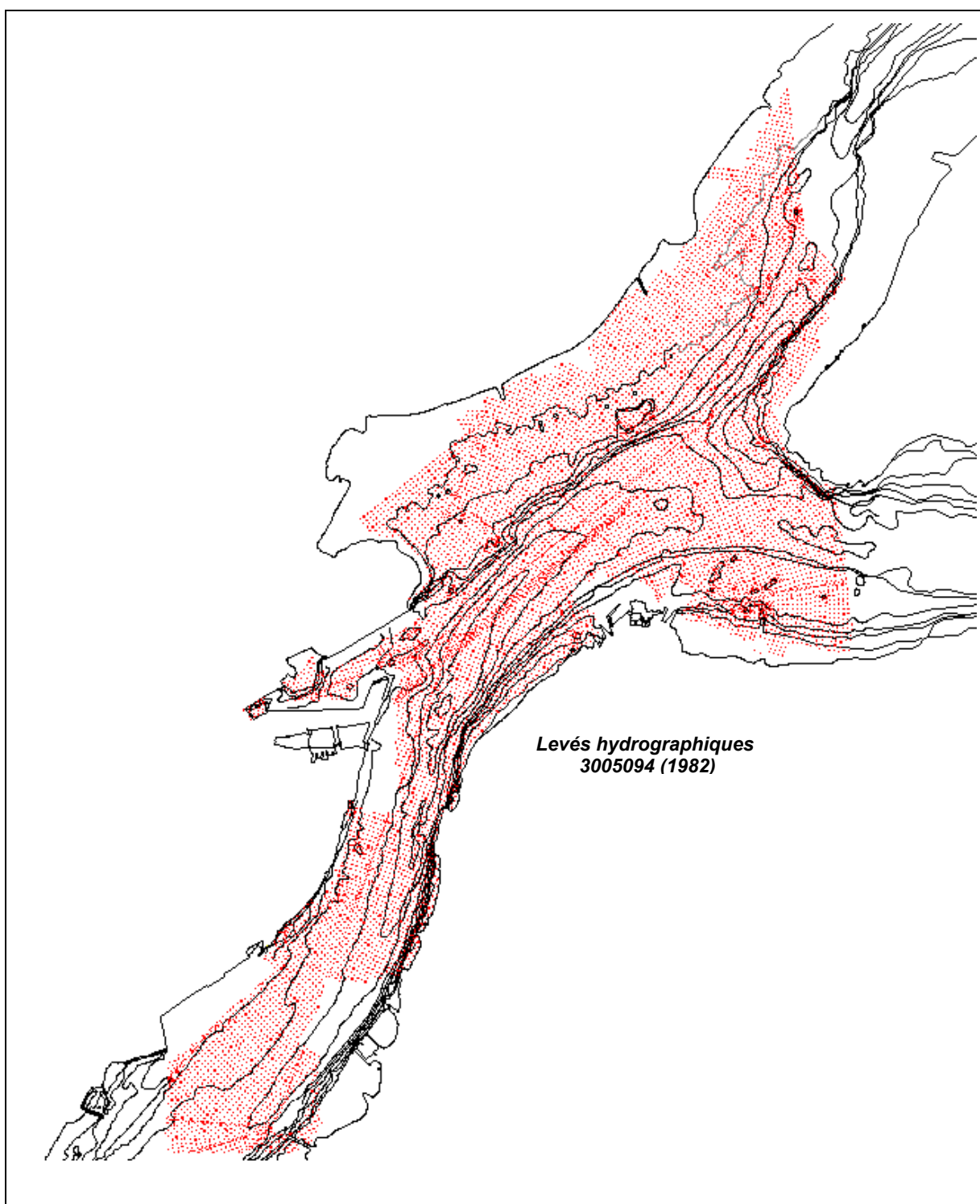


Figure 10 : Données du SHC dans la zone d'ensemble

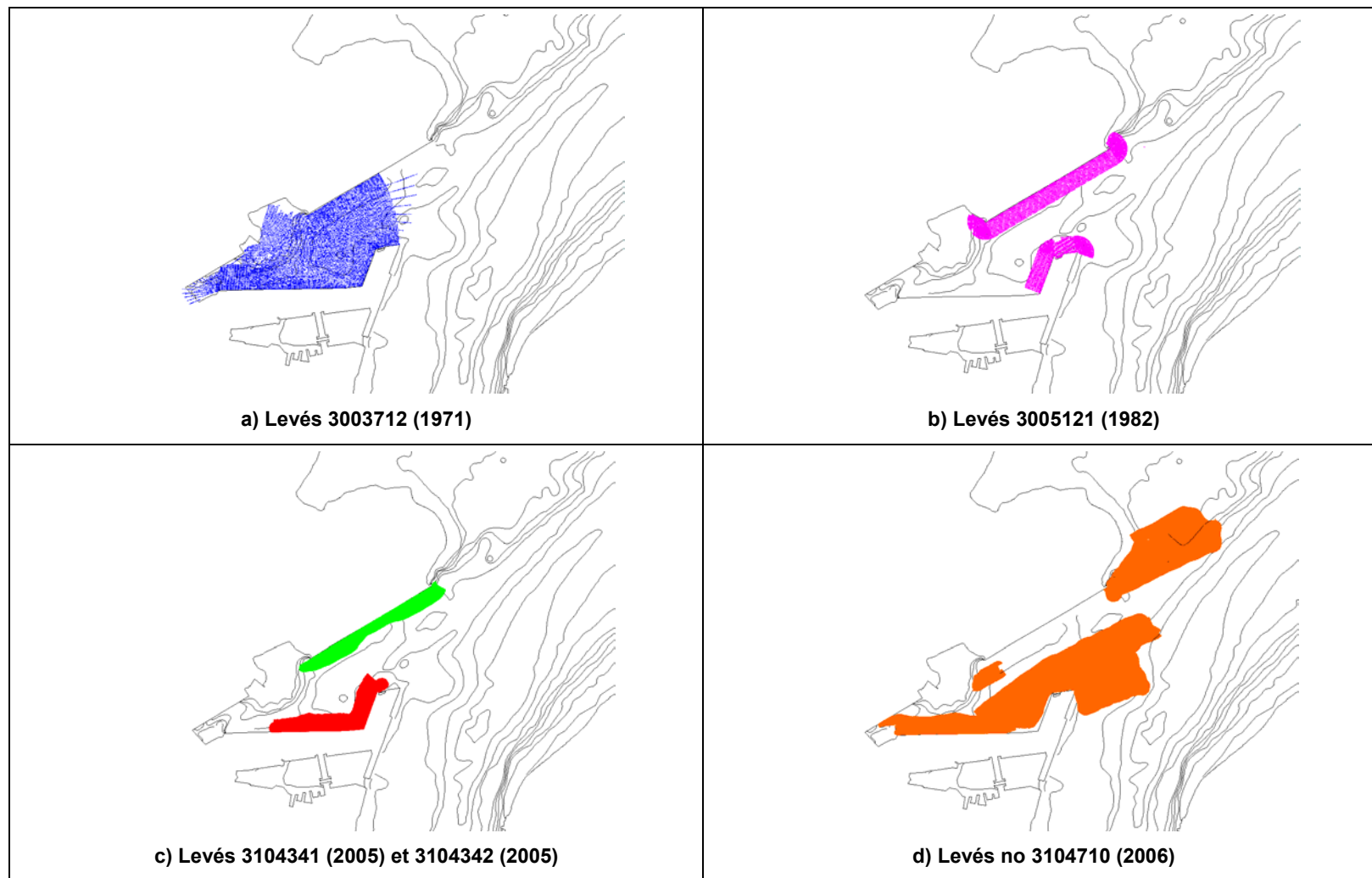


Figure 11 : Données du SHC dans le secteur de Beauport

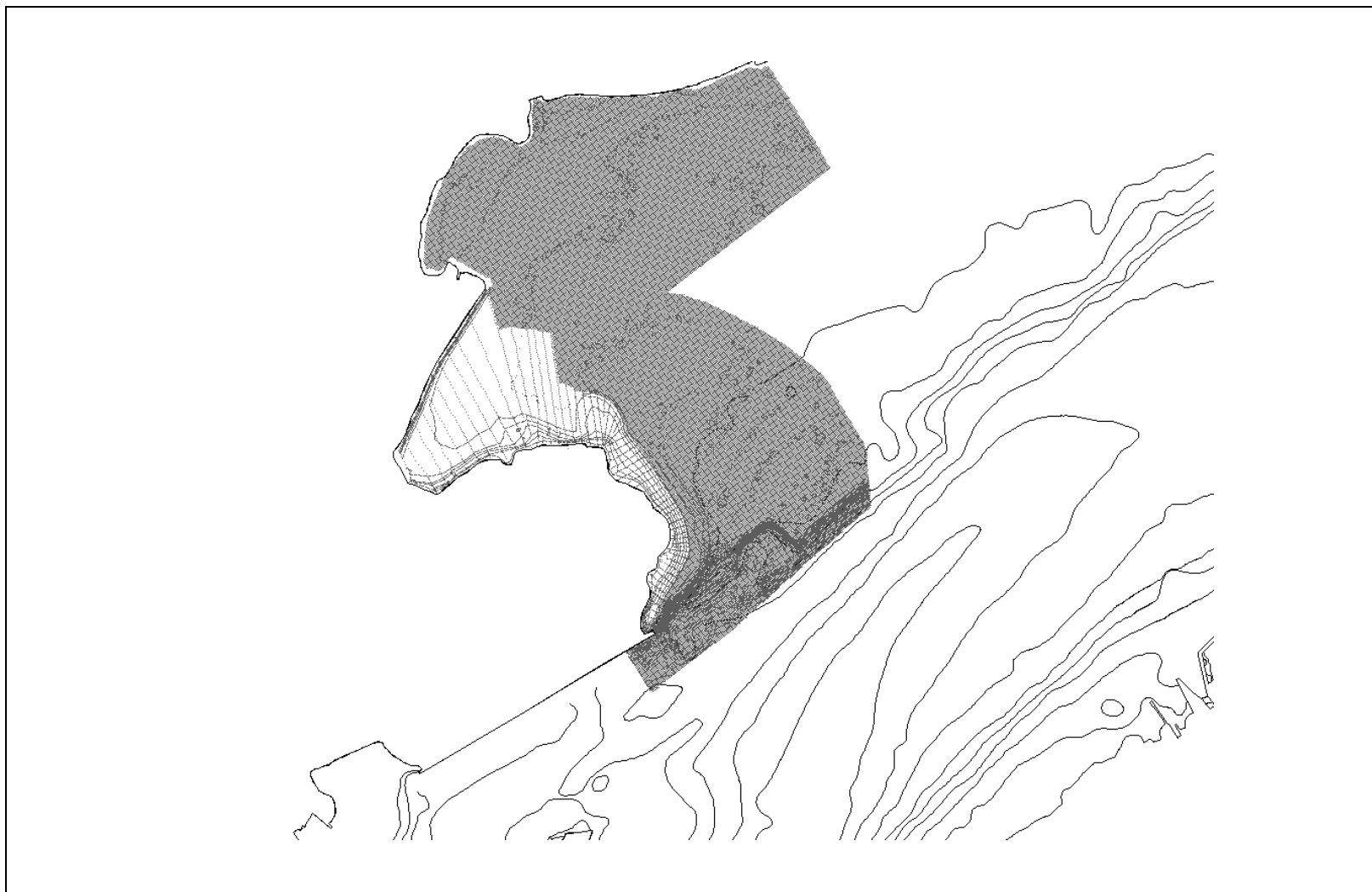


Figure 12 : Données bathymétriques et topographiques relevées en 2009

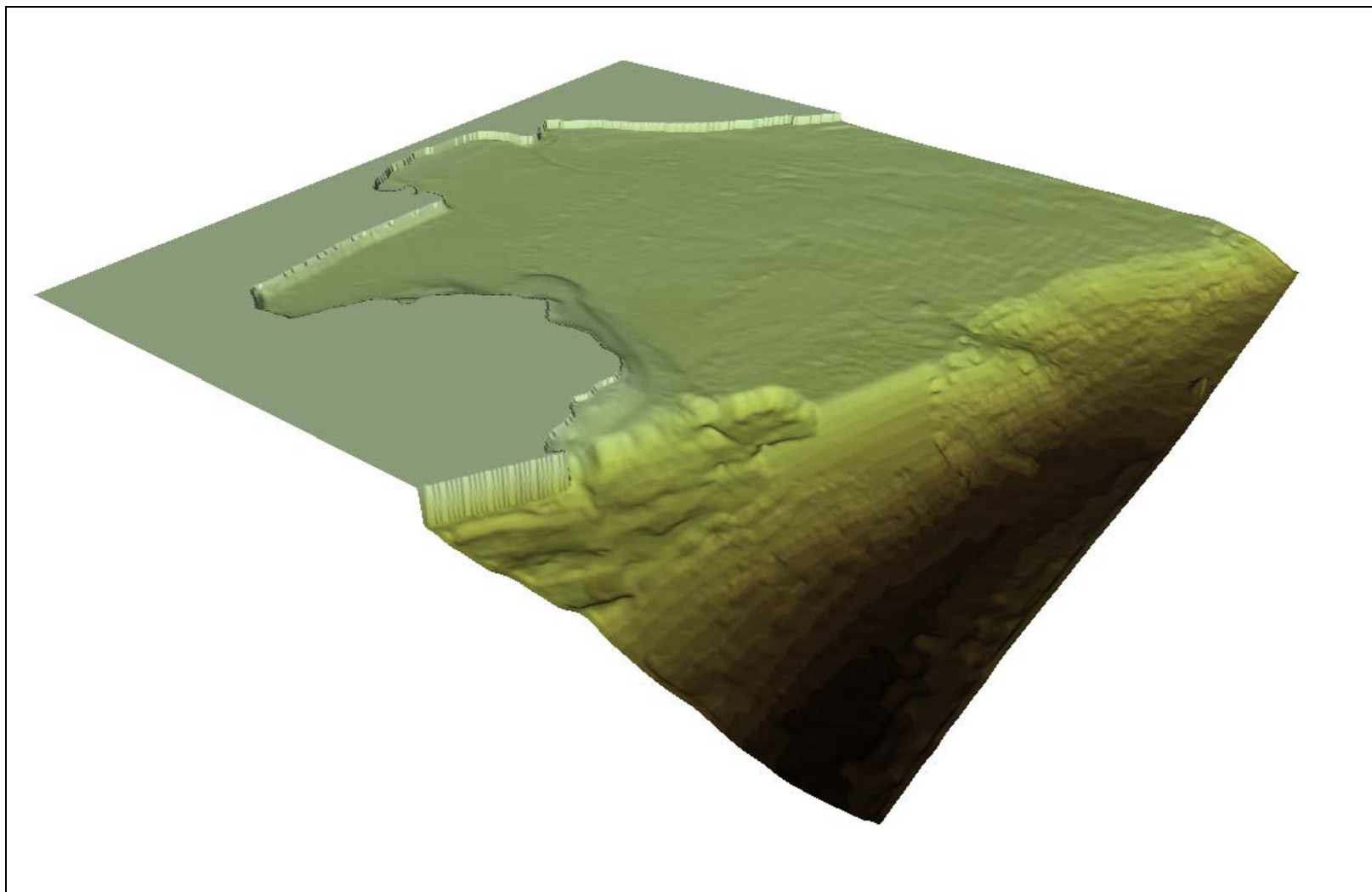


Figure 13 : Vue tridimensionnelle de la bathymétrie en conditions actuelles

4.1.4 Conditions hydrodynamiques modélisées

Les simulations hydrodynamiques et sédimentologiques ont été effectuées pour un scénario de marée de vive-eau. Les études réalisées antérieurement par le GCL (réf. [1] et [2]) ont en effet montré que ces conditions de marée permettaient de bien mettre en lumière les principales caractéristiques hydrosédimentologiques des variantes à l'étude.

La marée modélisée correspond aux conditions de vive-eau du 22 juin 1971. Cette marée avait été reproduite au modèle physique du port et avait fait l'objet de relevés détaillés sur le terrain, en préparation de l'exploitation du modèle réduit. Avec un marnage de 5,2 m, cette marée n'est excédée qu'environ 5% du temps.

Il est à noter qu'indépendamment de la date de cet épisode de marée, les résultats fournis par le modèle numérique sont évidemment applicables à tout cycle de marée de vive-eau ayant une amplitude similaire.

4.1.5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites d'un modèle hydrodynamique représentent les paramètres de niveaux d'eau, de débit ou de vitesses d'écoulement 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.

La marée de vive-eau du 22 juin 1971 a été induite au modèle numérique en imposant les conditions aux limites suivantes :

- Débit à la limite amont;
- Débit dans le bras nord de l'île d'Orléans;
- Niveau d'eau dans le bras sud de l'île d'Orléans.

La figure 14 illustre graphiquement l'évolution de ces conditions hydrodynamiques.

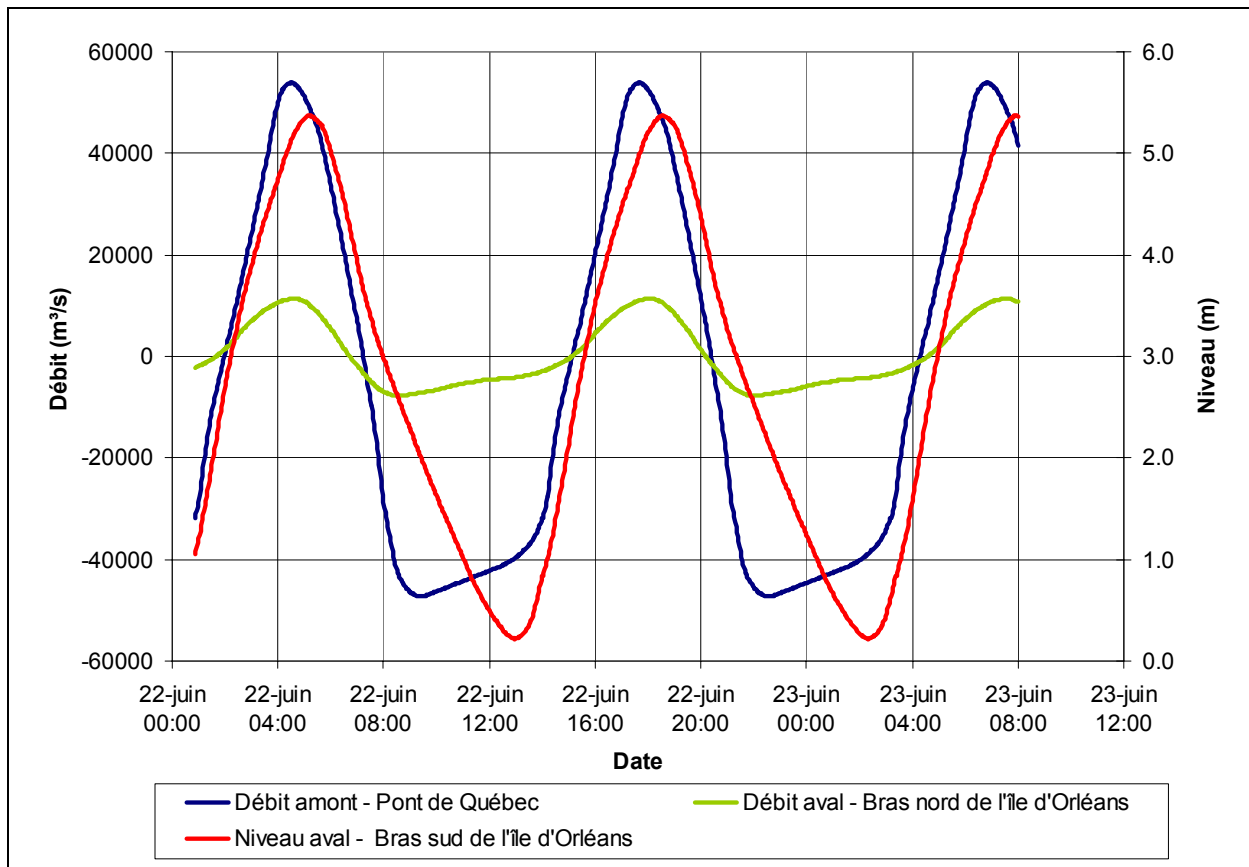


Figure 14 : Conditions aux limites du modèle numérique

4.1.6 Paramètres de calculs

Les simulations hydrodynamiques ont été effectuées avec un pas de temps fixé à $\Delta t = 1$ seconde. Les simulations débutaient à 01 :00 le 22 juin 1971 et se terminaient 25,5 heures plus tard, le 23 juin 1971 à 02 :30. Le cycle de marée enregistré en nature entre 00 :00 et 13 :00 le 22 juin 1971 était en fait imposé deux fois, le premier cycle servant essentiellement à stabiliser le modèle numérique.

Toutes les simulations ont été réalisées avec un coefficient de Manning de $n = 0,03$, constant dans l'ensemble des secteurs modélisés. Cette valeur a été validée dans les études précédentes du GCL dans le secteur du port de Québec (réf. [1] et [2]).

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 des maillages 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 les études précédentes du port de Québec (réf. [1] et [2]), les mêmes paramètres de viscosité turbulente ont été conservés, soit 3 m²/s pour le maillage d'ensemble ($\Delta x = \Delta y = 45$ m), et 0,3 m²/s pour les maillages plus fins.

4.2 Modélisation des vagues et du transport sédimentaire

La transformation des vagues du large à l'approche du littoral sous l'effet de la réfraction et du déferlement a été simulée à l'aide du module NSW (*Nearshore Spectral Waves*) de MIKE 21. Les contraintes de radiation des vagues fournies par ce modèle ont ensuite permis de simuler les courants littoraux induits par les vagues le long de la pointe de Beauport.

La modélisation du transport sédimentaire associé aux courants et aux vagues a été effectuée à l'aide du module ST (*Sand Transport*) de MIKE 21.

Pour tenir compte de l'influence du niveau d'eau sur la transformation des vagues du large et le transport sédimentaire, les simulations ont été effectuées en variant le niveau d'eau selon le cycle de marée de vive-eau utilisé dans la modélisation des conditions hydrodynamiques.

Le secteur considéré pour la modélisation de la réfraction des vagues et du transport sédimentaire correspond à la zone couverte par le maillage $\Delta x = \Delta y = 5$ m (voir figure 9).

4.3 Validation du modèle numérique

Le modèle hydrodynamique du port de Québec exploité par le GCL a déjà fait l'objet d'une validation détaillée. Les résultats de validation sont présentés dans le rapport R.1605 (réf. [2]) et ne sont pas repris dans le présent rapport.

5.0 RÉSULTATS DE MODÉLISATION

Les sections suivantes présentent les résultats de modélisation hydrosédimentologique. Des instantanés des résultats (i.e. à un moment précis du cycle de marée) sont présentés dans les sections suivantes pour illustrer et mettre en évidence les principaux points ressortant de l'analyse des résultats de modélisation. Pour ne pas alourdir le rapport, le reste des résultats est présenté sous forme d'animations (fichiers *.avi), clairement identifiées sur le cédérom annexé au présent rapport. Pour chaque animation, les résultats couvrent un cycle complet de marée de vive-eau.

5.1 Processus modélisés

Il a été établi que la plage actuelle de la pointe de Beauport est en déséquilibre sédimentaire, soumise à un transport littoral de sédiments sableux du sud vers le nord (cf. section 3). Les forces motrices conduisant au transport des sables sont liées à l'agitation provoquée par les vagues, qui soulève les sédiments et les met en suspension dans la colonne d'eau, et aux courants induits par ces vagues, qui les transportent par charriage ou en suspension le long du littoral.

En plus de l'agitation et des courants dus aux vagues, le transport des sédiments peut être influencé par les courants de marée. Nos études précédentes de la dynamique sédimentaire de la pointe de Beauport (réf. [1] et [2]) négligeaient ces courants, mais à ce stade du projet, il apparaissait important de les prendre en compte.

Pour avoir le portrait le plus complet possible de la dynamique sédimentaire associée aux variantes d'aménagement proposées, les simulations ont donc été effectuées en combinant les courants littoraux et l'agitation causés par les vagues aux variations des niveaux et des courants associées à la marée.

5.2 Variantes modélisées

Les trois variantes modélisées pour l'analyse des conditions hydrosédimentologiques du projet sont les suivantes :

1. *Conditions actuelles* : Il s'agit des conditions de base pour évaluer les changements apportés par l'extension du secteur portuaire sur les conditions hydrosédimentologiques du site. Comparativement aux études précédentes réalisées par le GCL (réf. [1] et [2]), les relevés les plus récents de bathymétrie et de topographie de la pointe et du rentrant sud-ouest ont été intégrés au modèle numérique (cf. section 4.1.3);
2. *Variante 2007* : Variante D2 retenue au terme de l'étude de faisabilité effectuée en 2007 (réf. [1]). L'extension portuaire suit un angle de 17° par rapport à la ligne des quais 50 à 53, les fonds devant les nouveaux quais sont dragués à -16 m ZC, et la plage est longue de 600 m, orientée pour diminuer le transport littoral induit par les vagues en provenance de l'E et de l'ENE. Une jetée est aménagée à l'extrémité nord pour stopper le transit littoral et protéger le rentrant sud-ouest de l'agitation des vagues;
3. *Variante 2009* : Variante élaborée à partir de la variante 2007 pour mieux répondre aux besoins de tous les utilisateurs du site, incluant les *kitesurfers*. L'extension des quais et la zone draguée sont identiques à celles de la variante 2007. La plage est toutefois longue de 475 m et légèrement déplacée vers le large. La nouvelle configuration permet d'aménager un accès au plan d'eau du côté du rentrant sud-ouest.

Il est à noter que les volumes de remblais nécessaires à la construction de la variante 2009 ont été calculés sommairement à l'aide du préprocesseur de MIKE 21. Comparativement à la variante 2007, la variante 2009 nécessiterait environ 7,3% plus de matériaux.

Les trois variantes modélisées sont illustrées à la figure 15.

5.3 Courants de marée

Les figures 16 et 17 comparent les courants de marée de vive-eau obtenus pour chacune des variantes à l'étude. Les instantanés présentés correspondent aux courants maximums de jusant et de flot. Les animations complètes peuvent être visionnées sur le cédérom du rapport, dans le dossier [Hydrodynamique].

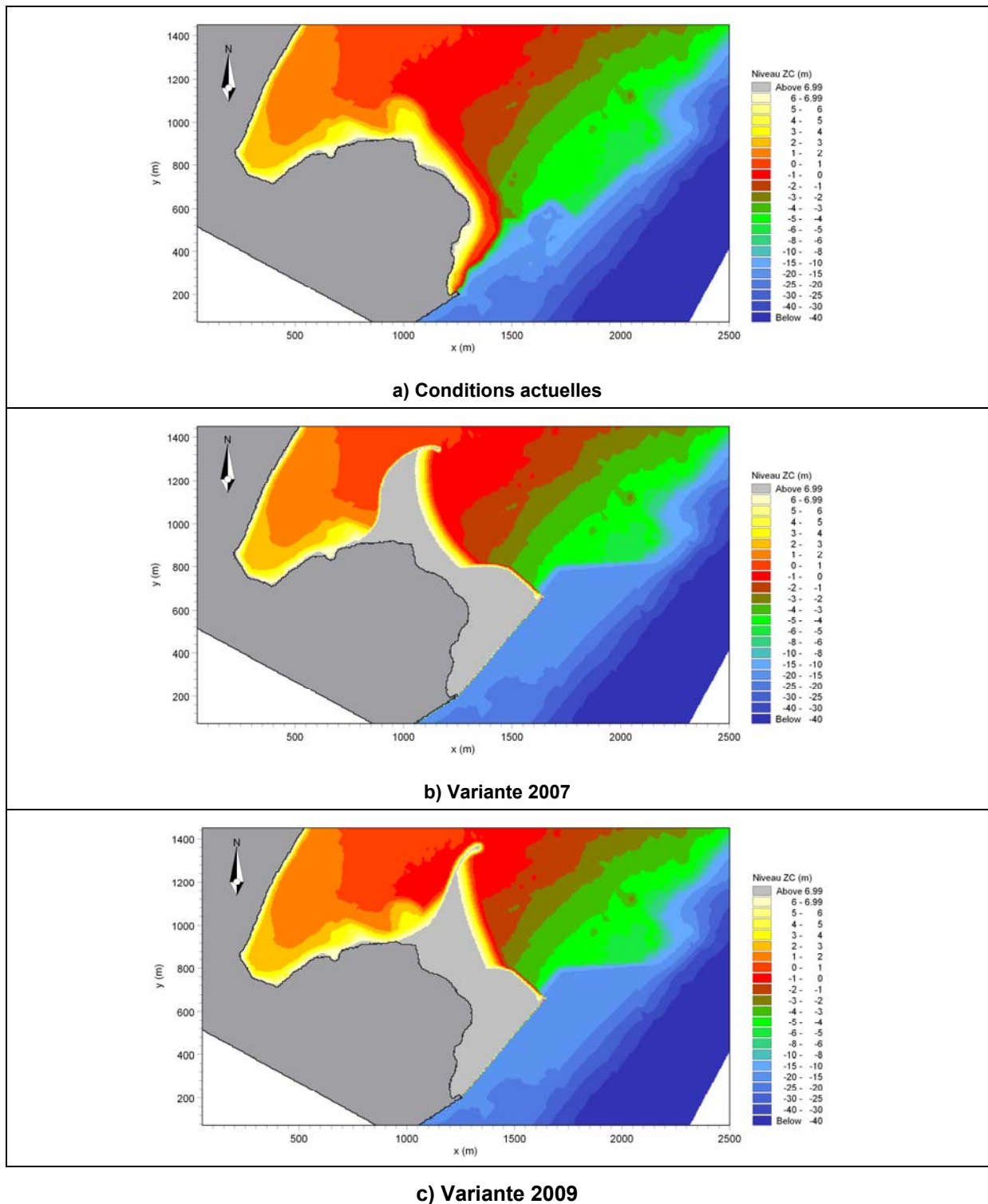


Figure 15 : Variantes d'aménagement modélisées

Les courants les plus importants le long des plages des trois variantes sont observés au flot (figure 16). En conditions actuelles, des vitesses allant jusqu'à 0,6-0,7 m/s sont atteintes dans la portion sud-est de la plage. Pour les deux variantes proposées, les plages demeurent en retrait des courants principaux, et les courants de marée demeurent inférieurs à 0,2 m/s pour la variante 2007, et à 0,3 m/s pour la variante 2009.

Au jusant (figure 17), la pointe de Beauport est complètement en retrait de la veine principale de l'écoulement et les courants de marée sont faibles pour les trois scénarios d'aménagement.

La jetée de la variante 2009 est située plus au large que celle de 2007 et intercepte au flot des courants qui sont légèrement plus élevés. Dans le rentrant sud-ouest, les courants de marée demeurent inférieurs à 0,1 m/s pour la majeure partie du cycle de marée, et ce tant en conditions actuelles qu'en présence des aménagements projetés.

5.4 Vagues

Sur la base de l'analyse du régime des vagues décrit à la section 3.2, les vagues les plus importantes, en hauteur et en fréquence, sont les vagues des secteurs ENE et E. D'après l'analyse de l'évolution morphologique de la pointe, ce sont effectivement ces vagues qui dominent la dynamique sédimentaire du secteur. Deux principaux cas de vagues issues de ces secteurs ont donc été choisis pour la modélisation :

- Vagues en provenance de la direction médiane entre l'ENE et l'E (angle d'incidence de 78,75°);
- Vagues en provenance de l'ENE (angle d'incidence de 67,5°).

Les simulations de vagues ont été réalisées en tenant compte de la variation des niveaux d'eau, pour un cycle complet de marée de vive-eau. Les simulations complètes peuvent être visionnées sur le cédérom du rapport, dans le dossier [Vagues].

Pour les deux cas de vagues considérés, les figures 18 et 19 présentent l'aspect typique de la direction et de la hauteur des vagues obtenues pour les conditions actuelles et les deux variantes d'aménagement.

Tel qu'illustré aux figures 18 et 19, les vagues obtenues le long des plages des variantes 2007 et 2009 conservent des hauteurs significatives similaires à celles obtenues en conditions actuelles le long de la pointe de Beauport. Aucun changement majeur dans l'agitation causée par les vagues, et les conditions de sédimentation fine, n'est donc anticipé pour les deux variantes proposées.

5.5 Courants de marée et courants littoraux

Les figures 18 et 19 montrent clairement que les variantes 2007 et 2009 offrent une ligne de plage plus perpendiculaire par rapport aux vagues dominantes des secteurs E et ENE que la plage actuelle.

Les figures 20 et 21, ainsi que le dossier d'animation [Courants_Marée+Littoraux], présentent les résultats obtenus en combinant les courants de marée et les courants induits par les vagues décrites à la section précédente. Le réalignement des plages des variantes 2007 et 2009 se traduit par une réduction tangible de l'intensité et de l'emprise des courants littoraux simulés avec les nouveaux aménagements par rapport à ceux obtenus en conditions actuelles. À l'extrémité nord des plages, les variantes 2007 et 2009 conduisent même, à certains instants de la marée, à des courants littoraux pratiquement nuls ou en direction inverse à celle des conditions actuelles. Cette atténuation des courants littoraux le long de la plage principale est obtenue pour les deux directions de vagues et les deux variantes simulées, mais semble plus importante pour les vagues en provenance de l'ENE et la variante 2009.

Tel que mentionné précédemment, la jetée de la variante 2009 intercepte les courants de marée plus au large, ce qui contribue à créer au flot un courant de retour dans le sillage de la jetée. Des courants de l'ordre de 0,2 m/s sont ainsi générés le long de la jetée de la variante 2009, du côté du rentrant sud-ouest, un phénomène qui n'est pas aussi marqué pour la variante 2007 (figures 20 et 21). Ce résultat est favorable au concept de 2009, dans la mesure où un accès à l'eau est prévu de ce côté pour les *kitesurfers* et que la sédimentation fine n'y est pas souhaitée.

5.6 Transport sédimentaire

Afin de pouvoir quantifier de manière plus tangible la réduction du transport sédimentaire induite par le réaménagement de la plage actuelle, des simulations du transport des sédiments ont été effectuées en superposant aux niveaux d'eau et courants de marée, les courants littoraux et les vagues produites par des tempêtes issues de l'ENE et d'une direction médiane entre l'ENE et l'E. L'analyse a été effectuée sur une base horaire avec un sable uniforme de diamètre 0,2 mm, pour un cycle complet de vive-eau.

Les figures 22 et 23 présentent le transport sédimentaire (en m^3/s par m de largeur) obtenu pour ces deux directions de vagues, en présence du niveau d'eau moyen de la marée (+3,3 m (ZC)). Les résultats complets sont inclus sous forme d'animations sur le cédérom du rapport, dans le dossier [Transport_Sédiments].

Les figures 22c et 23c illustrent bien le transport littoral qui contribue en conditions actuelles à la formation de la flèche sableuse située à l'extrémité nord de la plage. En conditions futures, que ce soit pour la variante 2007 (figures 22d et 23d) ou la variante 2009 (figures 22e et 23e), le transport sédimentaire est clairement diminué.

Pour quantifier la réduction du transport sédimentaire, les résultats de simulation ont été intégrés selon deux sections perpendiculaires aux plages étudiées (L1 et L2 sur les figures 22 et 23). Les sections d'analyse ont été positionnées dans la portion nord des plages, et couvrent la gamme des niveaux d'eau du cycle de marée. Bien que positionnées à des endroits différents, à cause des variations de l'emplacement et de l'orientation de la plage d'une variante à l'autre, les sections d'analyse sont de la même longueur et sont espacées de la même distance.

Une synthèse globale des résultats est relativement complexe car les niveaux d'eau varient durant le cycle de marée et la zone de transport littoral n'est pas la même à marée haute qu'à marée basse. À marée haute, par exemple, les lignes d'extraction de données (L1 et L2) couvrent une grande bande littorale sur laquelle il y a du transport sédimentaire dans deux directions opposées (voir figures 22 et 23). Le transport en eau plus profonde n'est toutefois pas représentatif du phénomène d'érosion caractéristique de la dynamique sédimentaire du secteur. Pour pouvoir comparer les différentes variantes entre elles et inclure toutes les

conditions de niveaux et de courants rencontrées durant le cycle de marée, seule la direction dominante de transport (du sud vers le nord) a été considérée pour l'analyse.

Les taux de transport sédimentaire calculés par le modèle (en $\text{m}^3/\text{s}/\text{m}$) ont été intégrés le long des sections L1 et L2, afin d'obtenir un volume cumulatif de sédiments (en m^3) transitant par les deux sections. Le tableau 3 résume les résultats obtenus, en terme de pourcentage de réduction par rapport aux conditions actuelles, pour les vagues issues d'une direction entre l'ENE et l'E (direction $78,75^\circ$) et les vagues de l'ENE (direction $67,5^\circ$). Les pourcentages du tableau 3 confirment que les variantes 2007 et 2009 permettent toutes deux de diminuer le transport littoral par rapport aux conditions actuelles. La variante 2007 permet une réduction de l'ordre de 30 à 35% selon la direction des vagues, alors que la variante 2009 offre une réduction accrue de l'ordre de 35 à 50 %.

La réduction du transport sédimentaire obtenue avec les deux variantes à l'étude diminue le potentiel d'érosion et de recul de la plage et apporte l'effet positif de diminuer la tendance à l'ensablement du rentrant sud-ouest. L'exercice de modélisation du transport sédimentaire réalisée dans cette étude ne permet toutefois pas de faire de prévisions à long terme sur la stabilité de la plage. Il faudrait pour ce faire effectuer une modélisation beaucoup plus complexe, tenant compte de différents épisodes de tempêtes et de nombreux cycles de marée. D'un point de vue sédimentaire, il faudrait raffiner la représentation des sédiments du site et déterminer la provenance et la concentration des sédiments en suspension dans l'eau.

Tableau 3 : Réduction du transport sédimentaire par rapport aux conditions actuelles

Direction des vagues	Variante 2007	Variante 2009
$78,75^\circ$	29,8 %	34,2 %
$67,5^\circ$	35,4 %	49,5 %

Les simulations ayant été effectuées pour des paramètres de modélisation identiques, il est toutefois possible de faire une analyse comparative des variantes entre elles. Ainsi, d'après les résultats de modélisation hydrosédimentologique, le réaménagement de la plage, selon les configurations des variantes 2007 ou 2009, offre par rapport aux conditions actuelles une stabilité accrue vis-à-vis de l'action des vagues et des courants et contribue ainsi à favoriser la pérennité de la plage.

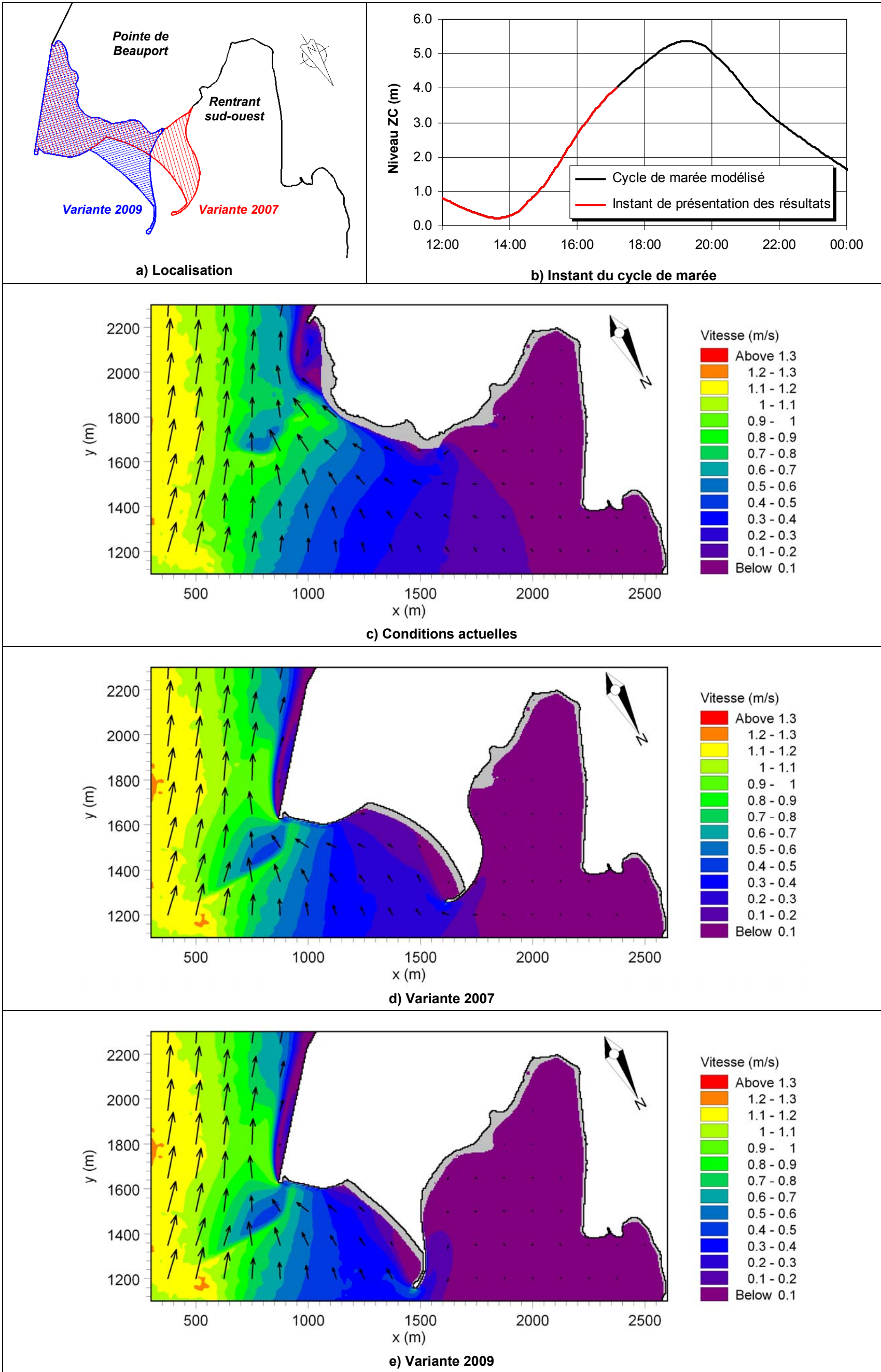


Figure 16 : Courants de marée de vive-eau au flot

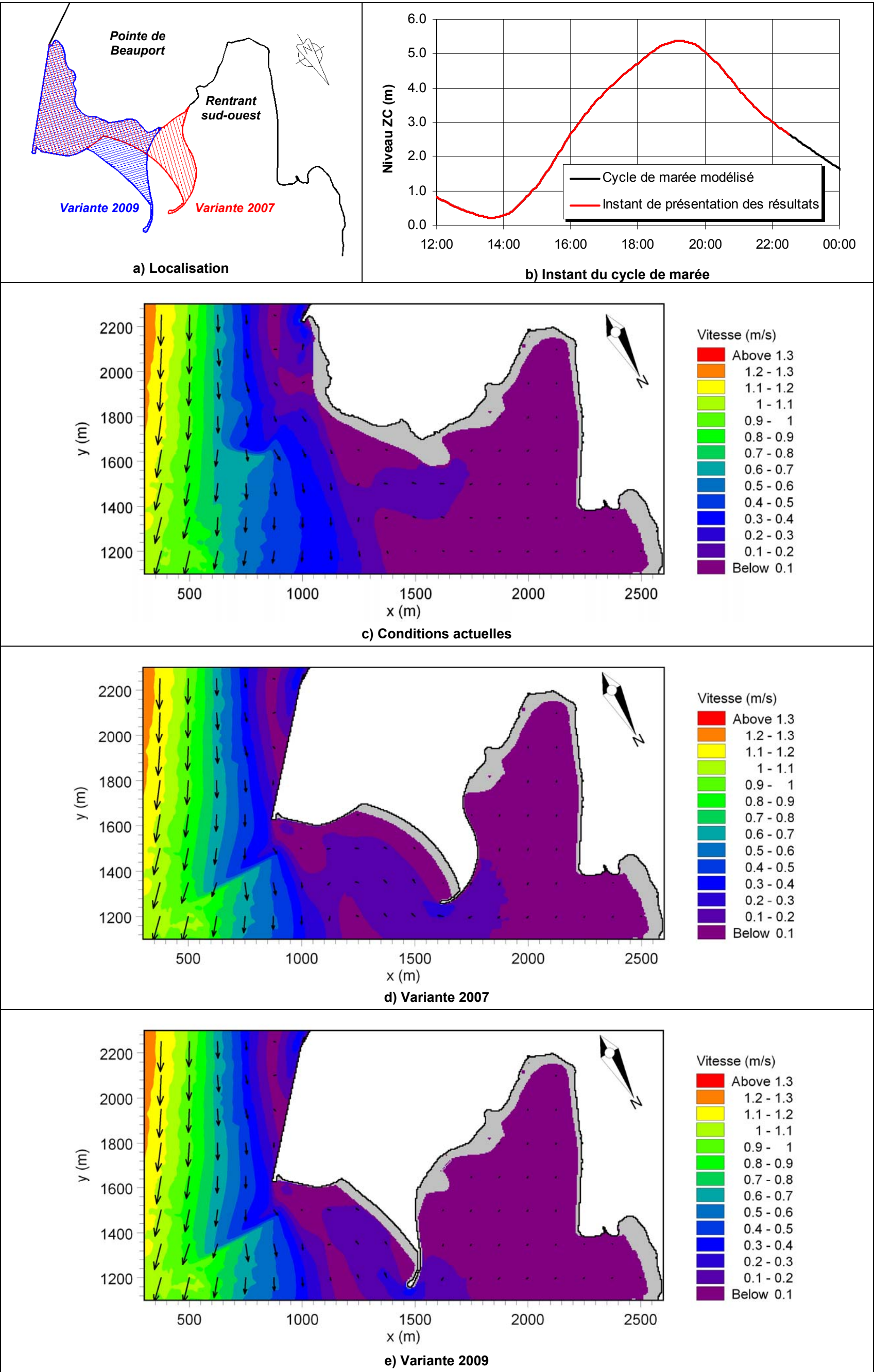


Figure 17 : Courants de marée de vive-eau au jusant

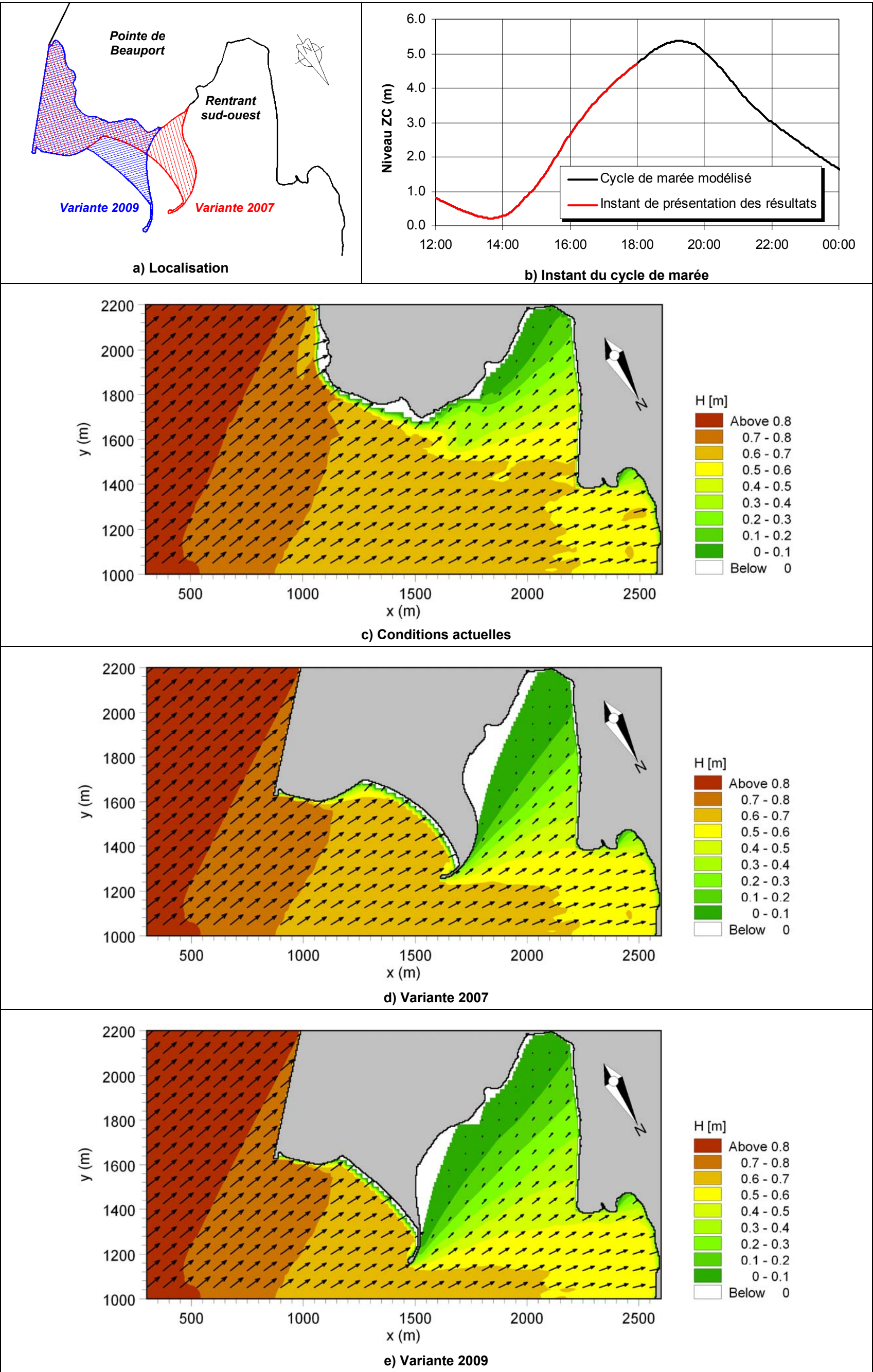


Figure 18 : Simulation des vagues - Vagues entre l'ENE et l'E (78,75°)

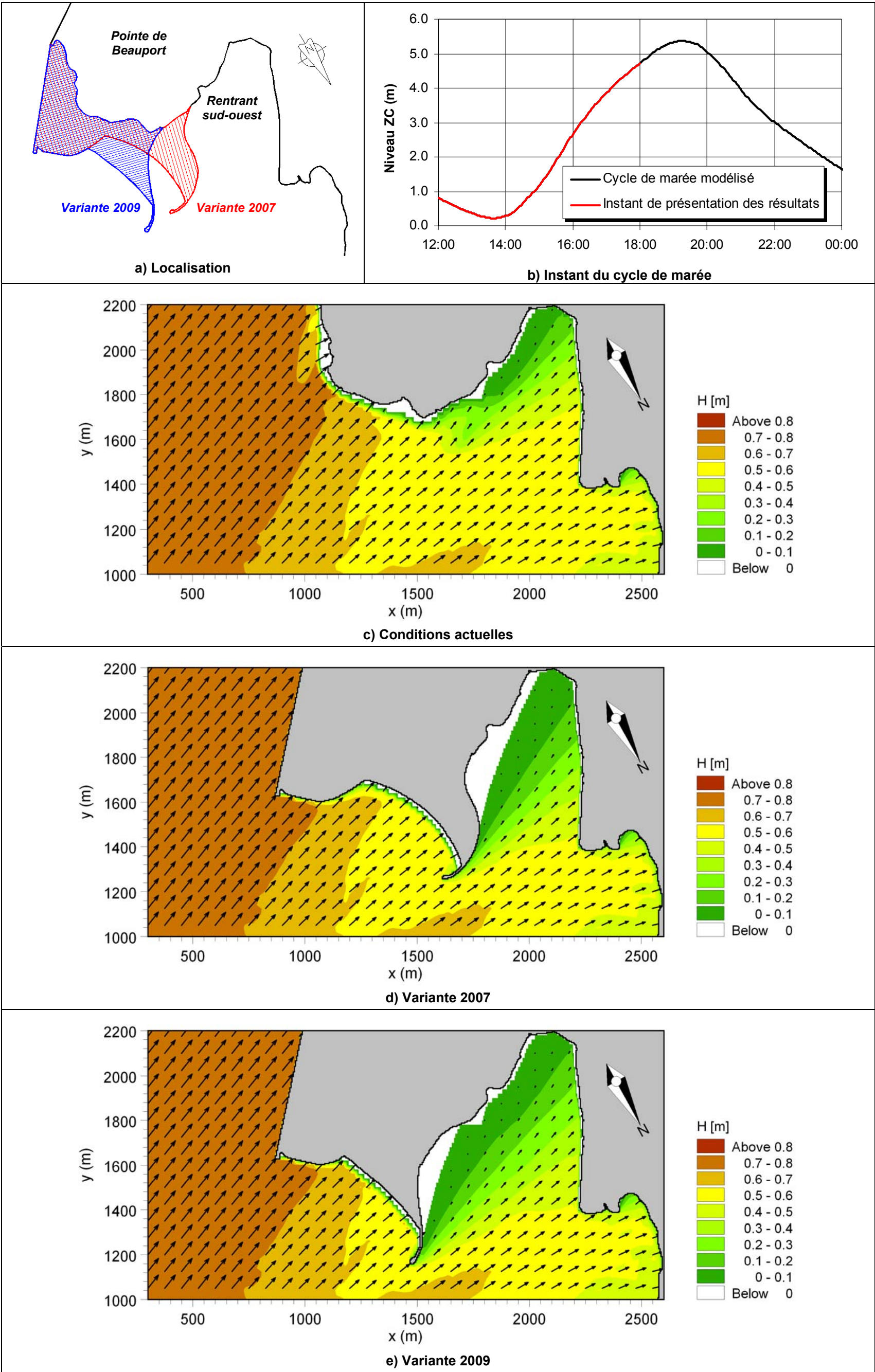


Figure 19 : Simulation des vagues - Vagues de l'ENE (67,5°)

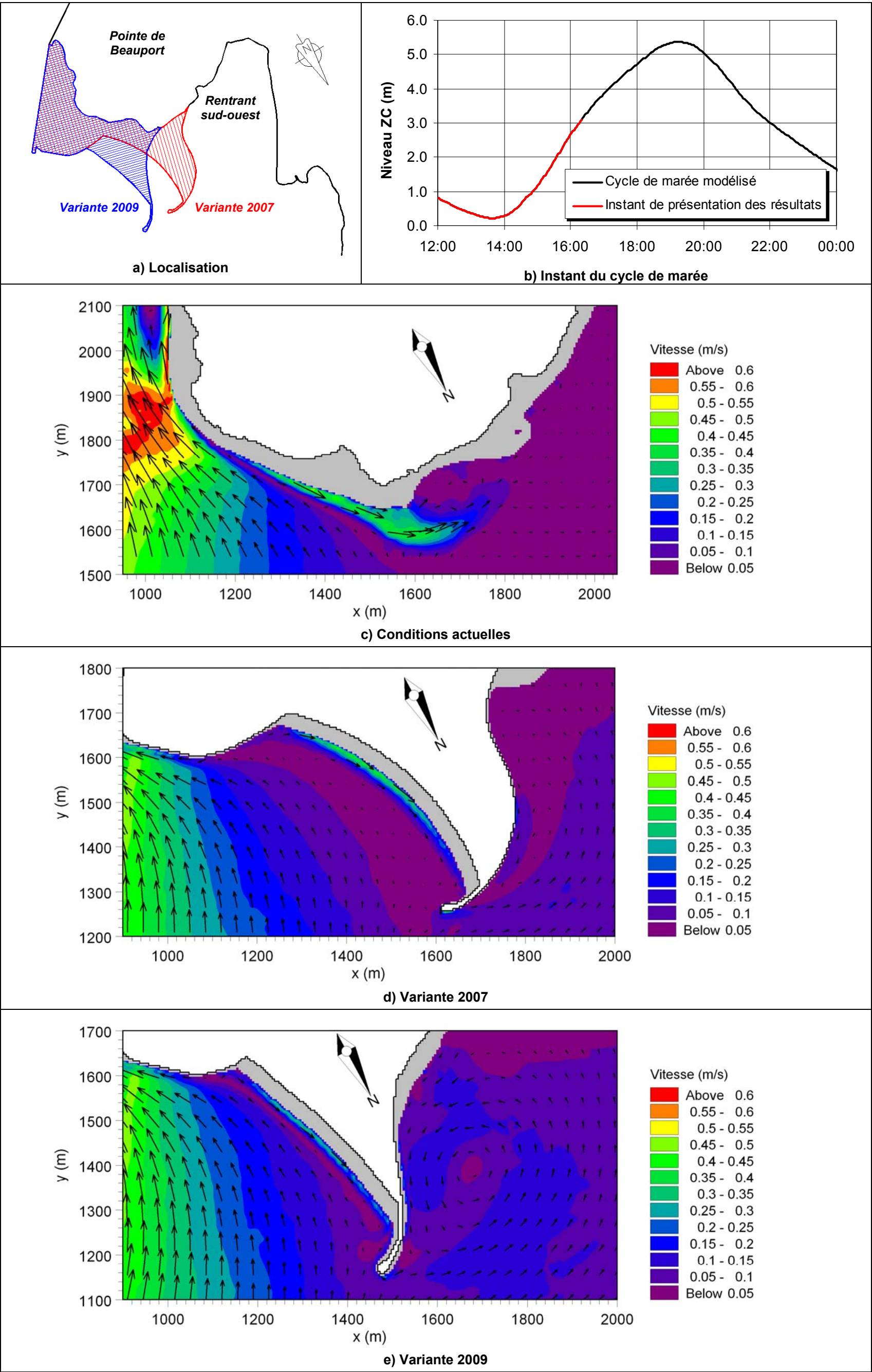


Figure 20 : Courants de marée et courant littoraux – Vagues entre l’ENE et l’E (78,75°)

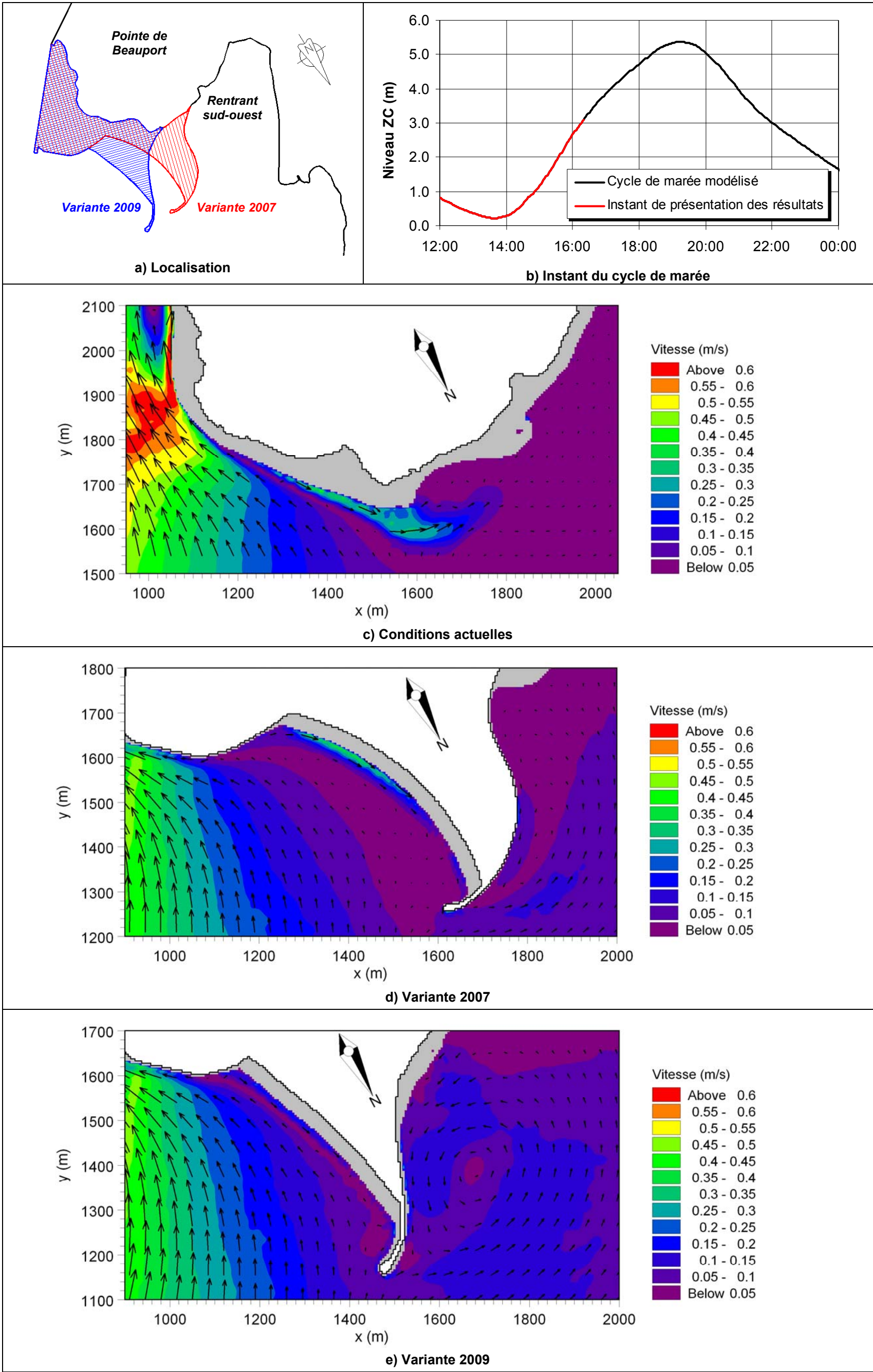


Figure 21 : Courants de marée et courants littoraux - Vagues de l'ENE (67,5°)

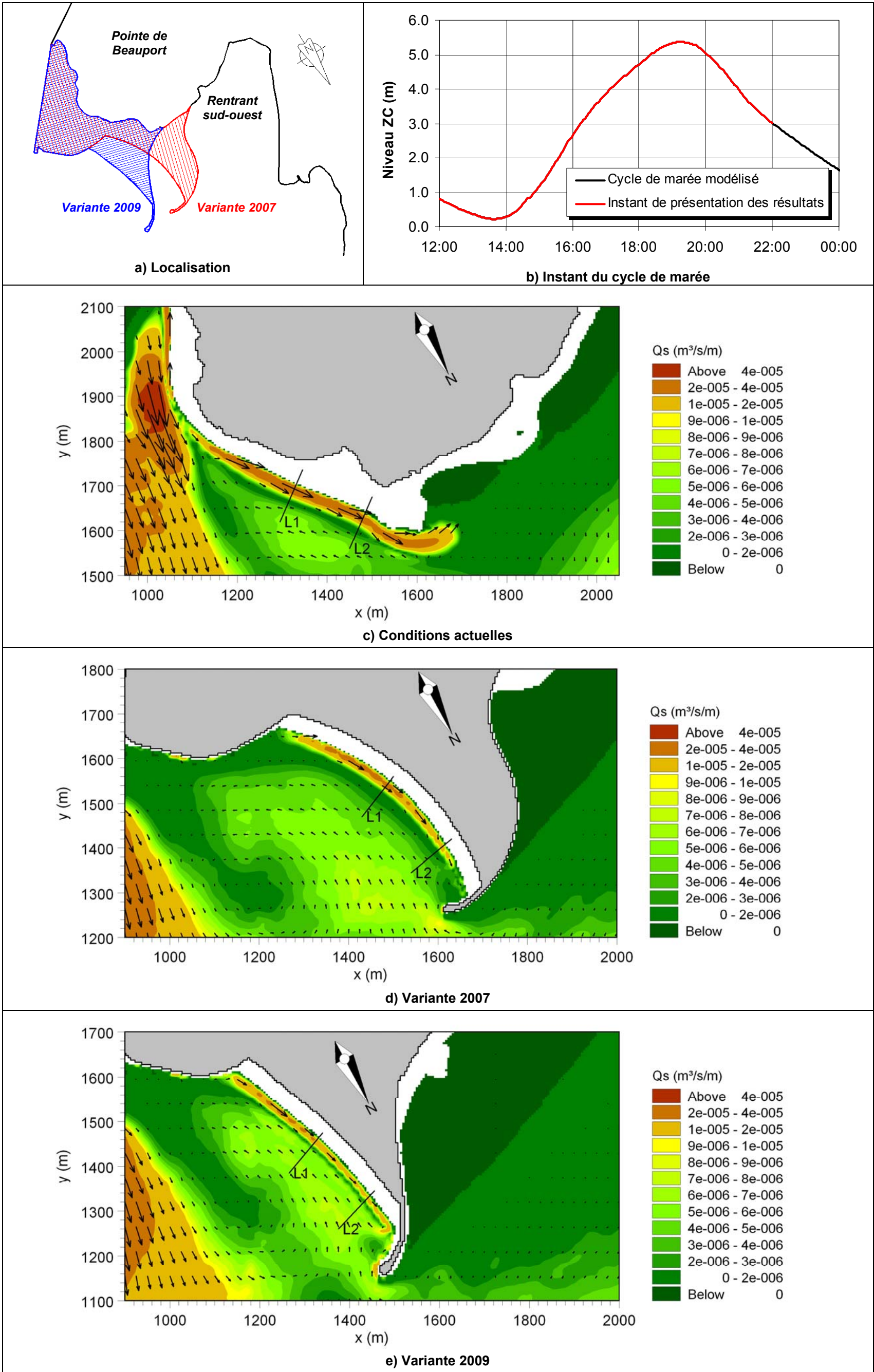


Figure 22 : Transport sédimentaire - Vagues entre l'ENE et l'E (78,75°)

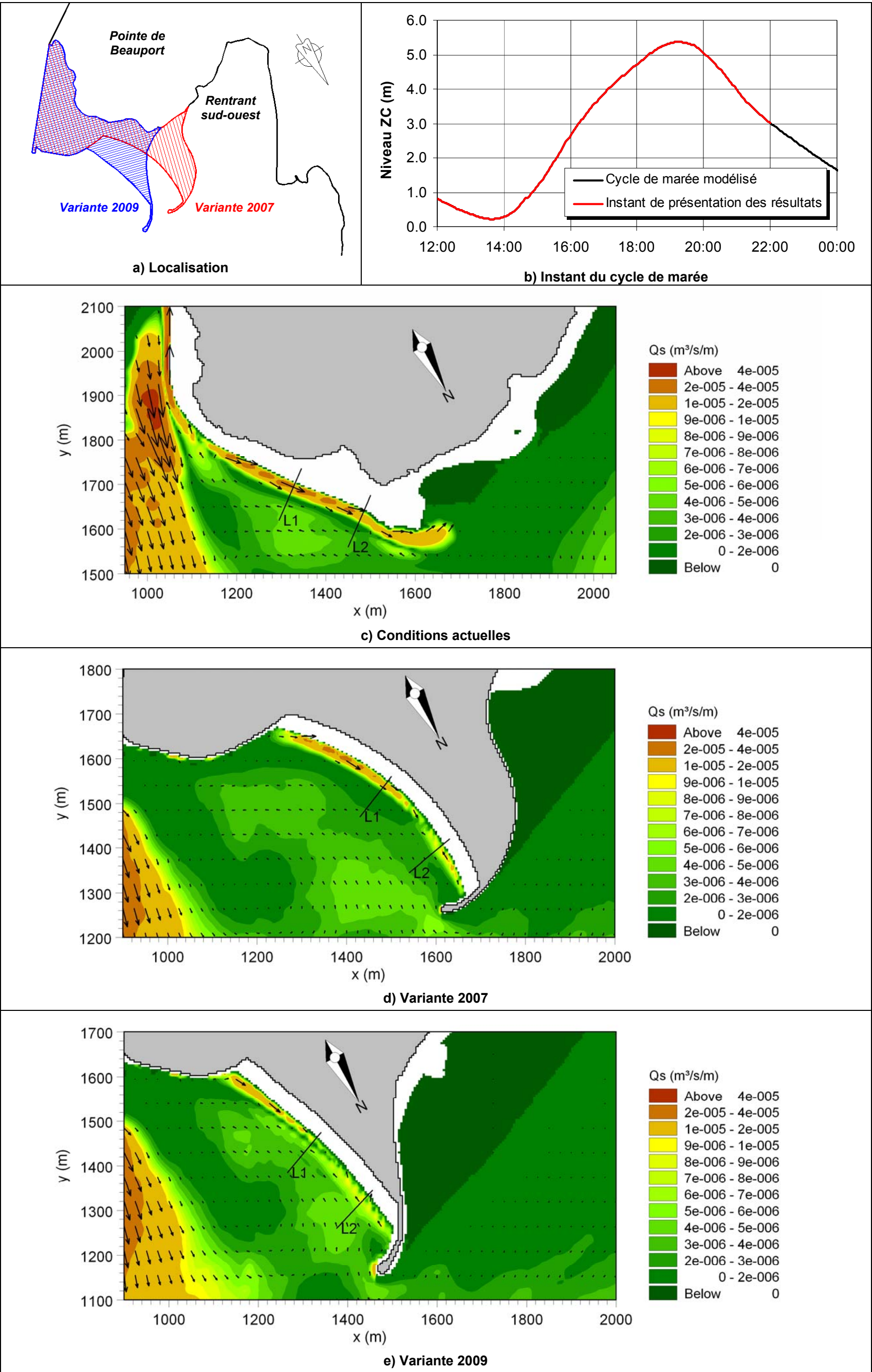


Figure 23 : Transport sédimentaire - Vagues de l'ENE (67,5°)

5.7 Variante privilégiée

Le choix de la variante finale d'aménagement dépend de plusieurs facteurs : coûts d'implantation, équilibre des volumes de remblais et de dragage, enjeux environnementaux, pérennité de la plage, objectifs récréo-touristiques, etc.

Du point de vue de la stabilité de la plage, les résultats de simulation hydrosédimentologique montrent que les deux variantes d'aménagement étudiées permettent de diminuer le transport sédimentaire par rapport aux conditions actuelles. Entre les deux aménagements, c'est la variante 2009 qui procure la plus grande réduction du transport sédimentaire.

Si la variante 2009 est retenue, quelques modifications mineures pourraient y être apportées (voir zones en rouge, figure 24) :

- Plage davantage incurvée vers l'intérieur pour mieux équilibrer les volumes de remblais et de dragage, et offrir un site de mise à l'eau moins orienté vers le large et le chenal de navigation du fleuve;
- Extrémité de la jetée davantage tournée vers le sud-est pour que le musoir de la jetée soit soumis à des courants de plus faible intensité.

Ces retouches ne modifieraient pas les conclusions du présent rapport et ne devraient être prises en compte que lors d'étapes plus avancées du projet.

L'orientation de la plage principale de la variante 2009 a été optimisée par rapport aux vagues dominantes du secteur est. Pour les épisodes de vents en provenance de l'E, de l'ENE et du NE, le site de mise à l'eau des *kitesurfers* est relativement bien protégé par la jetée de la plage principale. Par vents du NNE, il devient par contre plus exposé à l'action des vagues et risque de connaître un transport littoral vers l'intérieur du rentrant sud-ouest. Il pourrait donc s'avérer préférable de sélectionner des matériaux un peu plus grossiers (graviers et galets) pour ce site d'accès à l'eau (voir figure 24).

Selon les matériaux qui seront finalement utilisés, il faudra prendre en compte dans la planification à long terme de l'aménagement de la variante 2009 la possibilité d'avoir à recharger le site d'accès à l'eau situé du côté du rentrant sud-ouest.

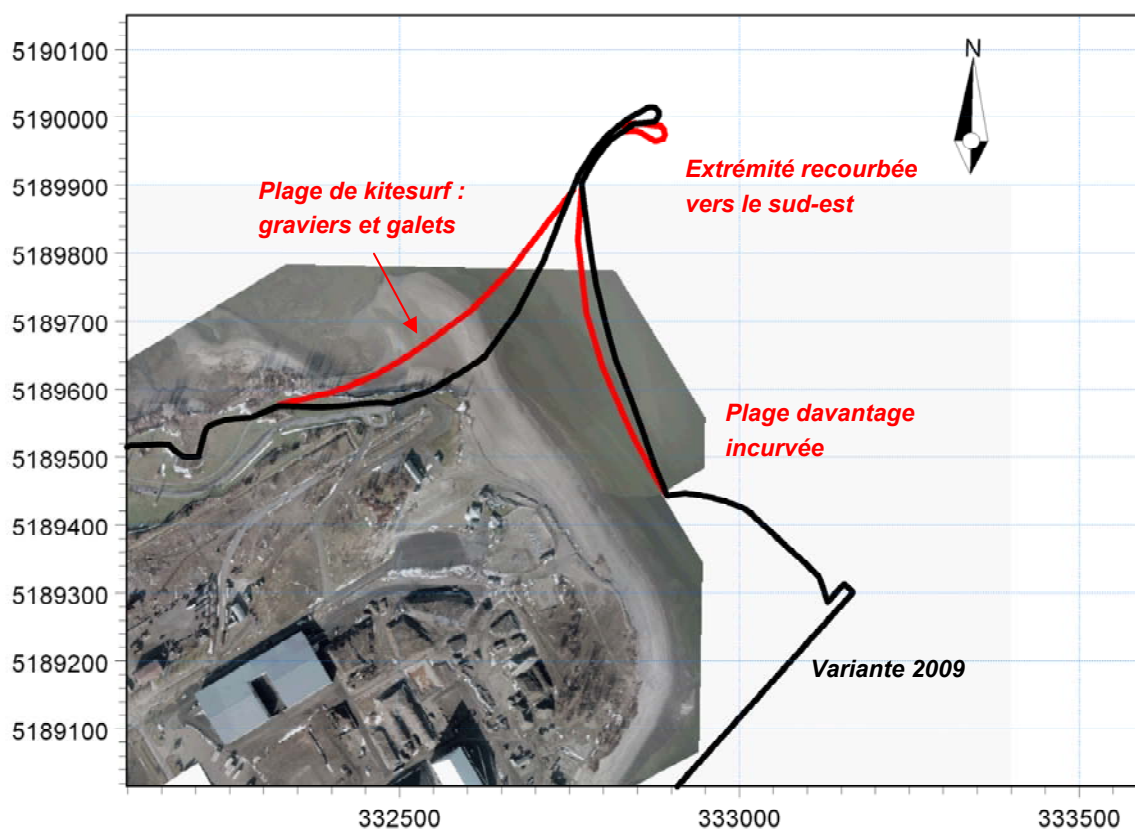


Figure 24 : Variante 2009 - Modifications proposées

6.0 CONCLUSIONS

L'Administration portuaire de Québec (APQ) a confié au Groupe-Conseil LaSalle le mandat d'étudier les conditions hydrosédimentologiques associées à son projet d'expansion dans le secteur Beauport, qui consiste en la mise en place de deux nouveaux postes à quais dans le prolongement du quai 53.

L'étude devait initialement se pencher sur les conditions hydrosédimentologiques associées à la variante d'aménagement retenue au terme des études de préféabilité (variante 2007). La mise en valeur du site et la diversification des activités récréatives depuis lors ont toutefois permis de mieux identifier les besoins de chacun des groupes d'utilisateurs. Une nouvelle variante d'aménagement (variante 2009), conservant les conditions d'accès au plan d'eau pour les *kitesurfers*, a donc été mise au point.

L'analyse s'est basée sur la caractérisation de l'évolution morphologique de la pointe de Beauport, l'historique des conditions hydrodynamiques ayant conduit à l'érosion de la plage actuelle, et la comparaison des conditions hydrosédimentologiques obtenues par modélisation numérique en conditions actuelles puis en présence des deux variantes d'aménagement proposées.

Les principales conclusions qui ressortent de l'étude sont les suivantes :

- L'examen des photos aériennes du site et de la composition des sédiments constituant la plage actuelle montre une forte tendance à l'érosion, causée par l'agitation et les courants littoraux créés par les vagues de tempêtes issues des secteurs NE à E. La portion sud de la pointe a déjà été soumise à une érosion importante, laissant en place un pavage de matériaux grossiers. La majeure partie des sables érodés par les vagues a été déplacée vers le nord, contribuant à la formation de la flèche sableuse et au début d'ensablement du rentrant sud-ouest observés en conditions actuelles.
- À long terme, la migration des sables vers le nord et le rentrant sud-ouest devrait se poursuivre, conduisant graduellement dans la portion nord de la plage à la formation d'un pavage de graviers et de cailloux similaire à celui actuellement observé dans la portion sud. L'échelle de temps requise pour que l'aspect de la portion nord de la plage

soit ainsi modifié est très difficile à établir, mais il apparaît évident que l'aménagement actuel ne permet pas d'assurer la pérennité à long terme de la plage.

- L'analyse des données historiques de niveaux d'eau, de vagues et de glace n'a pas permis d'établir de tendance nette permettant d'établir si l'érosion de la pointe s'effectue graduellement depuis sa mise en place ou, si au contraire, elle représente un phénomène relativement récent.
- La modélisation des conditions hydrosédimentologiques a été mise en œuvre en tenant compte des principales forces motrices à l'origine de l'érosion observée sur le site. Les simulations ont ainsi été effectuées en combinant les variations des niveaux et des courants associées à la marée aux courants littoraux et à l'agitation causés par des vagues en provenance de l'ENE et d'une direction médiane entre l'ENE et l'E.
- Les résultats de modélisation numérique indiquent que les configurations des variantes 2007 et 2009 offrent une stabilité accrue vis-à-vis de l'action des vagues et des courants par rapport aux conditions actuelles et contribuent ainsi à favoriser la pérennité de la plage. Des deux aménagements, c'est la variante 2009 qui procure la plus grande réduction du transport sédimentaire.
- L'orientation de la plage principale de la variante 2009 a été optimisée par rapport aux vagues dominantes du secteur est. Pour la plupart des épisodes de tempêtes de ce secteur, le site de mise à l'eau des *kitesurfers* est bien protégé par la jetée de la plage principale. Par vents du NNE, il devient par contre plus exposé à l'action des vagues et risque de connaître un transport littoral vers l'intérieur du rentrant sud-ouest. Il pourrait donc s'avérer préférable de sélectionner des matériaux un peu plus grossiers (graviers et galets) pour ce site d'accès à l'eau.

Le choix de la variante finale d'aménagement dépend de nombreux facteurs : coûts d'implantation, équilibre des volumes de remblais et de dragage, enjeux environnementaux, pérennité de la plage, objectifs récréo-touristiques, etc. Des points de vue hydrosédimentologique et récréatif, la variante 2009 semble être plus avantageuse que la variante 2007. La plage principale de la variante 2009 est en effet mieux orientée pour réduire le transport littoral et permet de répondre aux besoins de tous les utilisateurs du site, incluant les *kitesurfers*.

RÉFÉRENCES

- [1] VILLENEUVE, M. (2007). *Port de Québec – Nouvelles infrastructures portuaires Beauport 2007(J-4161) – Modélisation numérique des conditions hydrauliques*. Rapport du Groupe-Conseil LaSalle no 1657 préparé pour l'Administration portuaire de Québec, août 2007.
- [2] VILLENEUVE, M. ET HOSSAINI N. (2006). *Port de Québec – Legs fédéral de 2008 – Site de la baie de Beauport – Impacts de l'extension du secteur portuaire de Beauport sur les conditions hydrosédimentologiques locales*. Rapport du Groupe-Conseil LaSalle no 1605 préparé pour l'Administration portuaire de Québec, avril 2006.
- [3] ROPARS, Y., MASSÉ, R. ET HAMELIN R. (2007). *Port de Québec - Nouvelles infrastructures portuaires – Étude de préfaisabilité – Beauport 2007, J-4161*. Rapport de CIMA+, projet no Q07459A, préparé pour l'Administration portuaire de Québec, septembre 2007.
- [4] ROPARS, Y (2009). *Port de Québec – Extension du secteur Beauport – Étude des conditions hydrodynamiques*. Rapport préparé pour le Groupe-Conseil LaSalle, pour le compte de l'Administration portuaire de Québec, décembre 2009.

LEXIQUE

Marées

Flot : Champ des courants associé à la marée montante.

Jusant : Champ des courants associé à la marée descendante.

Marée de vive-eau : Marée de forte amplitude obtenue environ tous les quinze jours, lorsque la terre, la lune et le soleil sont alignés.

Marée de morte-eau : Marée de faible amplitude obtenue environ tous les quinze jours, lorsque la terre, la lune et le soleil forment un angle droit.

Vagues

Réfraction : Transformation des vagues à l'approche du littoral sous l'effet de la diminution de la profondeur et de la morphologie des fonds marins.

Contrainte de radiation : Principal mécanisme expliquant le transport sédimentaire le long des côtes. Les contraintes de radiation correspondent à des flux de quantité de mouvement générés par des vagues approchant le littoral de manière oblique.

Courants littoraux : Courants engendrés par le déferlement des vagues, qui se déplacent le long de la rive, parallèlement à la ligne du rivage.

Modélisation numérique

Pas de temps : Intervalle de temps utilisé par les modèles numériques pour la résolution des équations régissant la mécanique des fluides.

Rugosité des fonds : Importance des aspérités ou irrégularités des fonds marins, qui contribue à dissiper l'énergie de l'écoulement ou des vagues.

Viscosité turbulente : Paramètre utilisé dans la formulation des modèles numériques bidimensionnels et qui agit sur l'importance des décollements et courants de retour simulés par le modèle.

Hydrodynamique

Décollement : Portion d'un écoulement demeurant en retrait de la veine principale d'écoulement. Les décollements sont habituellement générés par l'interaction entre l'écoulement et un corps solide.

Courant de retour : Courant décrivant une trajectoire circulaire, souvent généré dans les zones de décollement.

- ANNEXE A -

Expertise du Groupe-Conseil LaSalle

EXPERTISE DU GROUPE-CONSEIL LASALLE

Depuis plus de cinquante ans, le Groupe-Conseil LaSalle (www.gcl.qc.ca) est un chef de file nord américain dans le domaine de l'hydraulique et de la mécanique des fluides appliquée. D'abord connu sous le nom de Neyrpac Canada, notre bureau d'étude est devenu le Laboratoire d'Hydraulique LaSalle en 1960, puis le Groupe-Conseil LaSalle en 1991. Il a été acquis en 1975 par ses principaux cadres. Reconnu pour son expertise en modélisation physique (modèles réduits) et numérique, notre firme s'appuie sur une équipe d'une vingtaine d'ingénieurs, techniciens et maquettistes œuvrant dans tous les secteurs du génie hydraulique.

Le Groupe-Conseil LaSalle exploite un des seuls laboratoires d'hydraulique privés en Amérique du Nord. Notre expertise en modélisation physique a été mise à profit pour la plupart des grands projets de nature hydraulique réalisés au Québec depuis le début des années soixante. Mentionnons seulement la création de l'île Notre-Dame (Expo 67), les phases I et II du complexe hydroélectrique La Grande et la conception de nombreux ports du Saint-Laurent.

Parallèlement à ses travaux en modélisation physique, le Groupe-Conseil LaSalle a rapidement développé des outils de modélisation numérique. Initialement conçus dans les années soixante, nos modèles du régime hydraulique hivernal des rivières ont été améliorés au fil des ans et font encore autorité aujourd'hui.

Depuis plus de dix ans, le Groupe-Conseil LaSalle exploite sur une base régulière les modèles numériques d'écoulement à surface libre de la famille MIKE. Ces modèles commerciaux de réputation internationale ont été conçus au Danemark par la firme DHI Water & Environment et ont fait leurs preuves dans de nombreux projets à l'échelle mondiale. Le Groupe-Conseil LaSalle est l'une des seules firmes privées au Canada à utiliser les modèles MIKE 11 (modèle unidimensionnel), MIKE 21 (bidimensionnel) et MIKE 3 (tridimensionnel). Que ce soit pour l'hydrodynamique, le transport des sédiments ou l'étude des vagues, nos ingénieurs maîtrisent l'ensemble des modules spécialisés constituant les modèles MIKE. La collaboration étroite entre notre firme et DHI se traduit actuellement par

un projet conjoint de développement de modules de glaces en rivière pour l'environnement MIKE.

Le Groupe-Conseil LaSalle a activement participé aux divers projets de développement mis de l'avant par le port de Québec depuis le début des années soixante-dix. De 1972 à 1990, nos ingénieurs ont exploité le modèle réduit du port qui avait été construit dans le laboratoire d'hydraulique de la Garde Côtière Canadienne, à Lachine. La masse de données recueillies lors de la construction et la validation de ce modèle, de même que les résultats obtenus au cours des nombreuses études réalisées par la suite, notamment pour le secteur de Beauport, ont fourni au GCL une expérience unique pour tout ce qui touche l'analyse de l'hydrodynamique du port de Québec.

Cette expérience a été enrichie en 1999 par la réalisation d'une étude sur modèle numérique du secteur de l'anse au Foulon (quai 103). En 2006, le modèle numérique a été actualisé puis étendu de manière à inclure les deux bras de l'Île d'Orléans, dans le cadre de l'étude hydrosédimentologique du secteur Beauport.

- ANNEXE B -

Rapport technique de la firme Consultants Ropars inc.



Extension du secteur BEAUPORT

Étude des conditions hydrodynamiques

Dossier GCL-R.1744
Rapport technique



Par
Yann ROPARS, ing., M.Sc.



CONSULTANTS ROPARS INC
3643, Chemin Saint-Louis
Québec (Québec) G1W 1T2

Avril 2010

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	1
2	Niveaux d'eau.....	2
2.1	Source de l'information.....	2
2.2	Station du SHC à Québec.....	2
2.3	Station du SDMM à Lauzon.....	3
2.4	Influence des changements climatiques sur les niveaux d'eau hauts.....	4
2.5	Niveaux d'eau hauts recommandés à Québec.....	6
2.6	Conversion en niveaux géodésiques à Québec	7
3	Données de vent	8
3.1	Source de l'information.....	8
3.2	Station de Lauzon.....	8
3.3	Station de Beauport.....	9
3.4	Évolution du climat	10
4	Prédictions de vague.....	11
4.1	Contexte de l'étude de vagues.....	11
4.2	Fetchs	11
4.3	Vagues.....	14
4.4	Vagues caractéristiques.....	16
4.5	Vagues extrêmes prédites dans la baie de Beauport	23
4.6	Recommandation concernant les vagues.....	25

ANNEXES

- ANNEXE A Vents de la station météorologique de LAUZON – 1991 à 2006 – Roses des vents
- ANNEXE B Vents de la station météorologique de BEAUPORT – 1999 à 2009 – Roses des vents
- ANNEXE C Vagues prédites devant la plage de Beauport – Station météorologique de LAUZON – 1991 à 2006 – Roses des vagues
- ANNEXE D Vagues prédites devant la plage de Beauport – Station météorologique de BEAUPORT – 1999 à 2009 – Roses des vagues

LISTE DES FIGURES

- Figure 2.1 Fréquence de dépassement des niveaux d'eau hauts à Lauzon (1950-2009)
- Figure 2.2 Évolution des niveaux moyens annuels à Lauzon entre 1950 et 2009
- Figure 2.3 Évolution des niveaux maximum annuels à Lauzon entre 1950 et 2009
- Figure 3.1 Station météo de BEAUPORT – Caractéristiques des vents par année
- Figure 4.1 Rose des vagues devant la plage des battures de Beauport – Lauzon 1991-2006 – facteur d'amplification des vitesses de vent de 1,1
- Figure 4.2 Rose des vagues devant la plage des battures de Beauport – Beauport 1999-2009 – facteur d'amplification des vitesses de vent de 1,1
- Figure 4.3 Rose des vagues à l'entrée du rentrant sud-ouest – Beauport 1999-2009 – facteur d'amplification des vitesses de vent de 1,1
- Figure 4.4 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague
- Figure 4.5 Relation Hauteur significative / Période des vagues pour Lauzon
- Figure 4.6 Relation Hauteur significative / Période des vagues pour Beauport
- Figure 4.7 Relation Hauteur significative / Direction des vagues pour Lauzon
- Figure 4.8 Relation Hauteur significative / Direction des vagues pour Beauport
- Figure 4.9 Prédiction Hs extrême devant la plage des battures de Beauport – Lauzon - F=1,1
- Figure 4.10 Prédiction Hs extrême devant la plage des battures de Beauport – Beauport - F=1,1
- Figure 4.11 Prédiction de Hs extrême à l'entrée du rentrant sud-ouest – Beauport - F=1,1

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1	Données du SHC pour Québec-Lauzon (m ZC)
Tableau 2.2	Caractéristiques de la marée selon les données de la station de Lauzon (SDMM)
Tableau 4.1a	Radiales selon les directions devant la plage des battures de Beauport
Tableau 4.1b	Fetchs effectifs selon les directions devant la plage des battures de Beauport
Tableau 4.2a	Radiales selon les directions à l'entrée du rentrant sud-ouest
Tableau 4.2b	Fetchs effectifs selon les directions à l'entrée du rentrant sud-ouest
Tableau 4.3	Correspondance des directions de vague
Tableau 4.4	Vagues caractéristiques devant la plage – Lauzon 91-06
Tableau 4.5	Vagues caractéristiques devant la plage – Beauport 99-09
Tableau 4.6	Comparaison des résultats de vagues caractéristiques selon la station météorologique retenue

1 Introduction

Le Port de Québec évalue la possibilité d'extension des installations portuaires dans le secteur BEAUPORT.

Cette évaluation requiert des informations sur les conditions hydrodynamiques afin de dimensionner les infrastructures et d'apprécier les phénomènes hydrodynamiques qui dominent dans cet environnement.

La présente étude vise à rassembler l'information disponible à travers différentes bases de données, à l'analyser et à calculer la récurrence de certains paramètres hydrodynamiques, dont les niveaux d'eau et les vagues qui se produisent dans le secteur.

2 Niveaux d'eau

2.1 Source de l'information

Le Services des données sur le milieu marin (SDMM) de Pêches et Océans Canada (MPO) met à la disposition du public les niveaux d'eau de ses stations sur Internet (http://www.meds-sdmm.dfo-mpo.gc.ca/meds/Databases/Data_f.htm).

Une station de mesure (et de référence) des niveaux d'eau du SDMM (Lauzon – N° 3250) a opéré depuis 1896 à proximité des installations portuaires de Québec :

- Les données de cette station de Lauzon ont été utilisées pour déduire les niveaux d'eau probables dans la zone des battures de Beauport. Ces données se retrouvent également sur le site Internet du SHC [<http://www.lau.chs-shc.gc.ca/cgi-bin/tide-shc.cgi?queryType=showZone&language=french®ion=4&zone=3>].
- Les élévations de niveaux d'eau sont données en mètres par rapport au zéro des cartes marines (m ZC). La correspondance en niveau géodésique (m Géod.) est également indiquée.

2.2 Station du SHC à Québec

Le Service hydrographique du Canada (SHC) fournit les données suivantes pour le port de Québec – station de Lauzon (niveaux d'eau fournis par rapport au zéro des cartes marines ou ZC) :

Tableau 2.1 Données du SHC pour Québec-Lauzon (m ZC)

Localité	Québec		
Port de référence	Québec		
Carte marine no	1316		
Type de marées	semi-diurne		
Marnage	Marée moyenne		4,4 m
	Grande marée		5,9 m
Hauteur	Pleine mer supérieure	Marée moyenne	4,9 m
		Grande marée	6,1 m
	Basse mer inférieure	Marée moyenne	0,5 m
		Grande marée	0,2 m
Extrêmes enregistrés	Extrême de pleine mer		7,1 m
	Extrême de basse mer		- 1,3 m
Niveau moyen de l'eau			2,6 m

2.3 Station du SDMM à Lauzon

L'évaluation des fréquences de dépassement des niveaux d'eau enregistrés à la station de Lauzon a été faite de 1950 à 2009 (jusqu'au 30 novembre 2009, ce qui exclut les très hauts niveaux d'eau du début décembre 2009). Il y a donc eu soixante années de données analysées, ces données étant prises aux heures.

Les figures suivantes illustrent cette analyse pour les « extrêmes hauts » observés pendant cette période de 1950 à 2009.

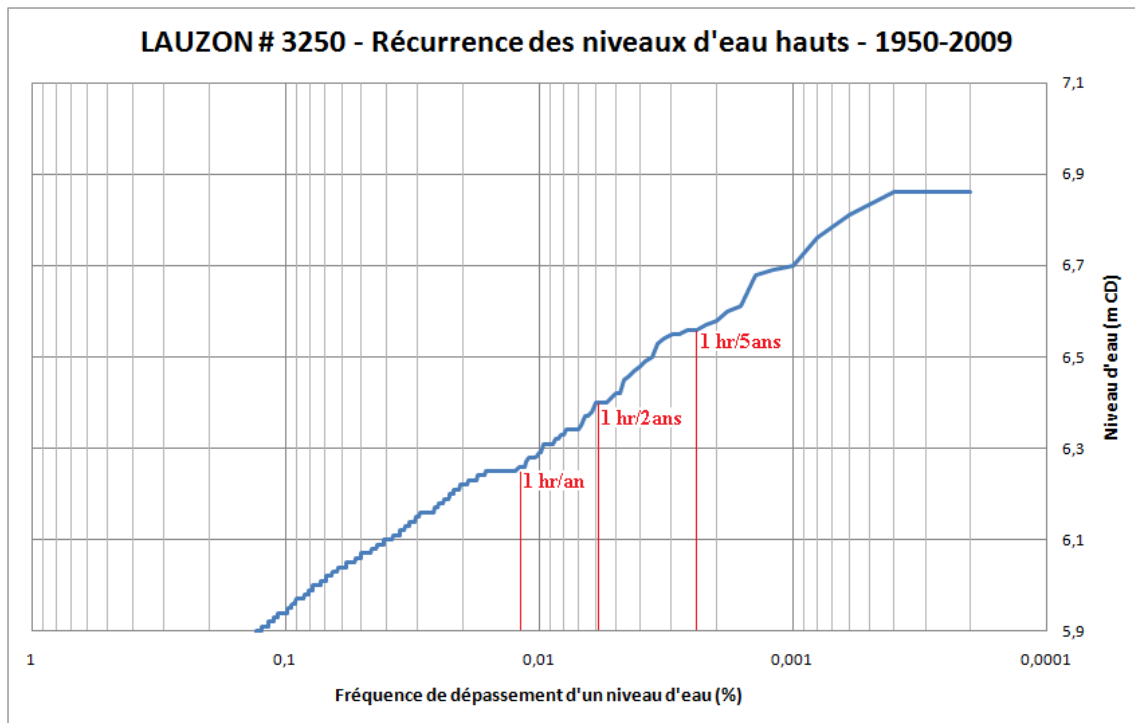


Figure 2.1 Fréquence de dépassement des niveaux d'eau hauts à Lauzon (1950-2009)

L'analyse des données de niveau d'eau enregistrées par le SDMM à la station de Lauzon a permis de produire les récurrences de niveaux d'eau à cette station pour les récurrences indiquées au tableau 2.2.

Tableau 2.2 Caractéristiques de la marée selon les données de la station de Lauzon (SDMM)

Fréquence de dépassement	Niveaux hauts
Un jour par année	+5,76 m ZC
Douze heures par année	+5,88 m ZC
Une heure par année	+6,26 m ZC
Une heure par 2 années	+6,40 m ZC
Une heure par 5 années	+6,56 m ZC

Les événements qui nous intéressent pour la conception de la jetée située à l'extrémité nord de l'extension portuaire sont ceux pour lesquels une forte tempête du secteur est se conjugue avec une grande marée pour donner des niveaux d'eau exceptionnels. Une analyse de concordance entre ces événements de très haut niveau d'eau et de vents forts du secteur est devrait être réalisée pour déterminer le niveau d'eau à considérer. En attendant cette analyse, à titre préliminaire, c'est le niveau pratiquement maximum observé entre 1950 et 2009 qui sera retenu, soit 6,8 m au-dessus du zéro des cartes marines (+6,8 m ZC) pour le dimensionnement en fonction des vagues.

2.4 Influence des changements climatiques sur les niveaux d'eau hauts

Les dernières analyses du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) en matière de changements climatiques indiquent un relèvement moyen du niveau des océans de l'ordre de 0,2 à 0,6 m au cours du prochain siècle¹ si on ne tient pas compte de la fonte accélérée des calottes glacières. Selon ces analyses², au cours des prochaines 50 années, il faudrait s'attendre à un relèvement de 0,05 à 0,2 m dans la région du Golfe du Saint-Laurent.

Toutefois, l'incertitude entourant plusieurs paramètres (hausse de la température et surtout fonte des glaciers) pourrait faire varier cette prévision. Les chiffres qui circulent actuellement à propos de la remontée du niveau d'eau moyen des océans sont plutôt de 0,8 m à 2 m d'ici la fin de ce siècle³ en tenant compte de la fonte accélérée des glaciers, si

¹ Rapport du Groupe de travail I du GIEC "Résumé à l'intention des décideurs", Chapitre 2 Tableau RID.3 page 13 "<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg1/ar4-wg1-spm-fr.pdf>"

² Rapport du GIEC "Climate changes 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability", Chapitre 2 Encadré 2.5 page 153 "<http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar4/wg2/ar4-wg2-chapter2.pdf>"

³ Pfeffer, W.T. & al, "Kinematic Constraints on Glacier Contribution to 21st-Century Sea-Level Rise", SCIENCE, Vol 321, 5 September 2008, www.sciencemag.org

bien qu'il faudrait peut-être plutôt parler d'un relèvement d'au moins 0,3 m à 0,5 m dans les prochaines 50 années et d'au moins 0,8 m d'ici 2100.

Pour ce qui est de la région de Québec, plusieurs phénomènes viennent « perturber » ce relèvement du niveau moyen des océans. Le relèvement isostatique à Québec serait de 0,22 m/siècle selon les observations de niveaux d'eau faites par le Service des données sur le milieu marin (SDMM – MPO) à la station marégraphique de Lauzon (figure suivante). Ce phénomène fait en sorte que les niveaux d'eau moyens ont actuellement tendance à baisser à Québec, mais la tendance pourrait bientôt s'inverser.

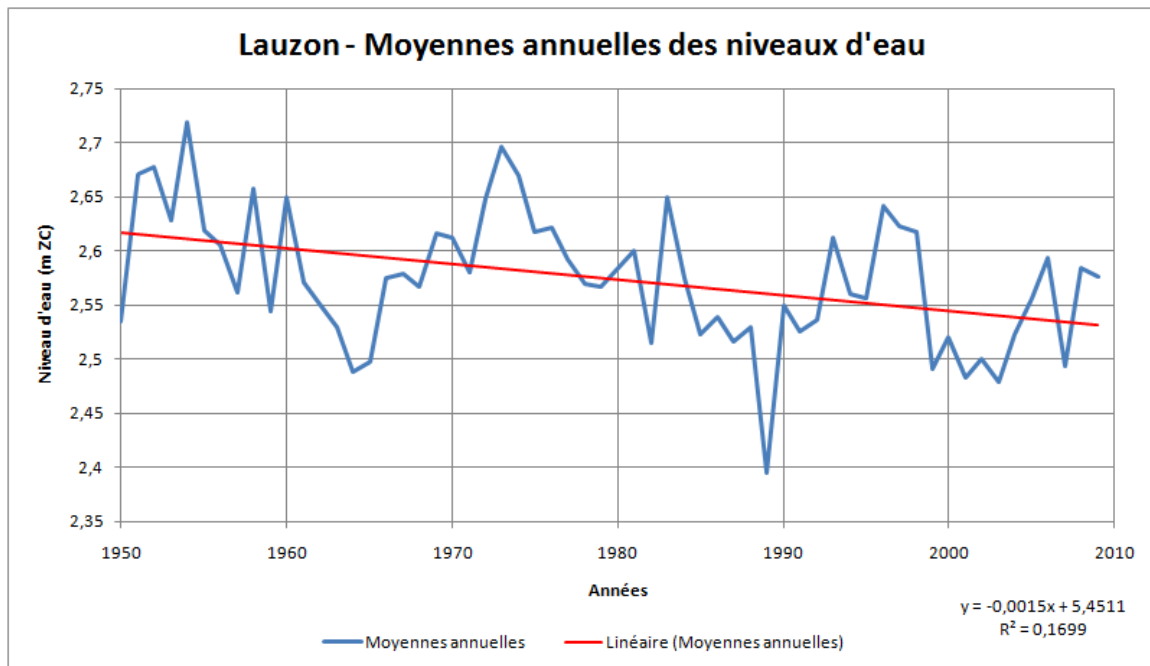


Figure 2.2 Évolution des niveaux moyens annuels à Lauzon entre 1950 et 2009

L'évolution décroissante des niveaux moyens se produit alors que l'évolution des niveaux d'eau maximaux indique une relative constance depuis 1950. La figure suivante indique le maximum annuel (Max) ainsi que la moyenne des 12 et des 24 plus hautes valeurs horaires annuelles de niveau d'eau (Max 12 et Max 24) depuis 1950. La droite de tendance des maximums apparaît également sur la figure.

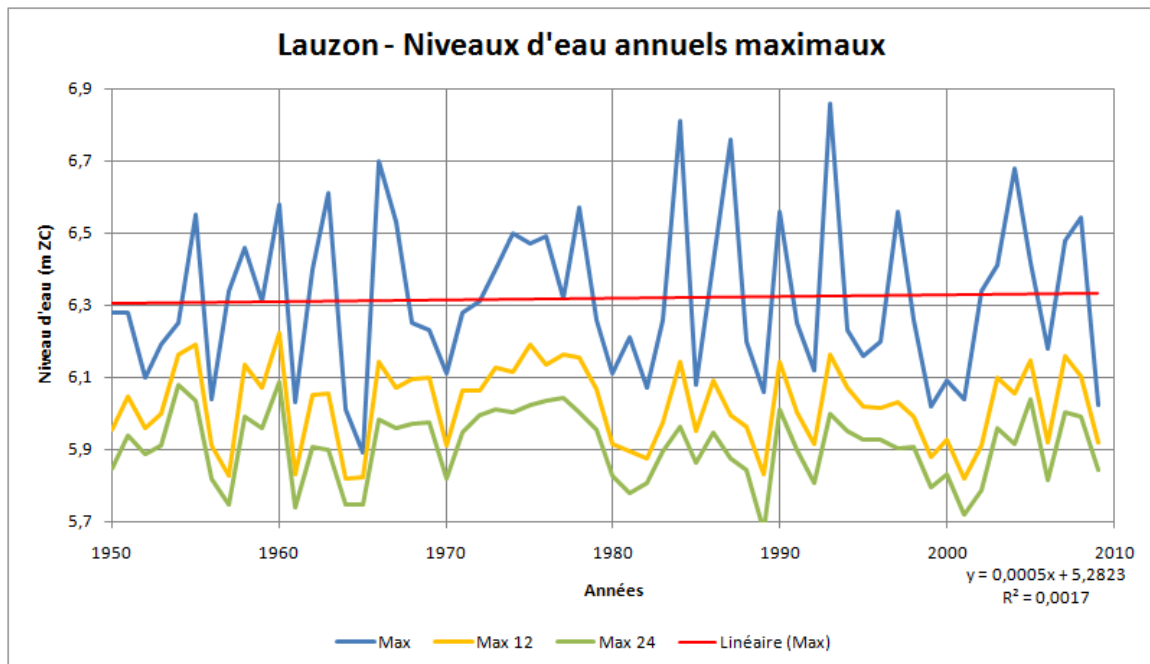


Figure 2.3 Évolution des niveaux maximum annuels à Lauzon entre 1950 et 2009

Les débits d'eau douce et la baisse de ces débits anticipée avec les changements climatiques n'ont qu'une influence minimale sur les variations de niveau d'eau à Québec. La baisse d'hydraulicité anticipée du fleuve Saint-Laurent avec les changements climatiques ne devrait se traduire que par une baisse du niveau d'eau de 5 à 10 cm à Québec.

Si l'on s'en tient aux chiffres « officiels » du GIEC, la fourchette de hausse du niveau moyen des océans devrait se traduire par une hausse du niveau d'eau à Québec de 0 à 0,3 m d'ici 2100. Par contre, si l'on prend les chiffres moins optimistes tenant compte de la fonte accélérée des glaciers, cette fourchette de hausse du niveau d'eau à Québec serait de 0,5 à 1,7 m.

Il nous semble prudent de considérer que la hausse des niveaux d'eau à Québec d'ici 2100 sera d'au moins 0,5 m.

2.5 Niveaux d'eau hauts recommandés à Québec

L'analyse des niveaux d'eau à la station de Lauzon indique qu'il faudrait considérer le niveau de +6,8 m ZC comme étant actuellement le niveau d'eau extrême haut probable, mais ce niveau extrême pourrait atteindre +7,4 m ZC vers 2100 avec les changements climatiques.

Pour les calculs concernant la réfraction des vagues lors d'événements de tempête se produisant régulièrement, sans tenir compte des changements climatiques en cours, il

serait recommandé de considérer au moins le niveau d'eau de +5,9 m ZC (soit le niveau dépassé 12 heures par année).

Le dimensionnement de la crête des ouvrages en enrochement devrait être effectué pour ce même niveau de +5,9 m ZC de manière à évaluer l'impact de tels événements sur les terrains. Cette recommandation tient compte de la probabilité qu'un tel événement de niveau d'eau très haut se produise en même temps qu'une très forte tempête.

Les recommandations concernant les niveaux d'eau de conception qui tiendraient compte de la hausse probable du niveau des océans dans les prochaines décennies seraient donc :

- Pour le dimensionnement des ouvrages en enrochement et des plages : +6,4 m ZC.
- Une vérification de la conception des digues et des plages en fonction des vagues et des glaces devrait également être faite pour un niveau de $6,8 \text{ m} + 0,5 \text{ m} = +7,3 \text{ m ZC}$ pour s'assurer que les dommages en relation avec un tel événement exceptionnel restent acceptables.

Il serait recommandé 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 recommandés avec les recommandations officielles actuelles.

2.6 Conversion en niveaux géodésiques à Québec

Selon les informations du SHC, la différence entre le zéro géodésique et le zéro marégraphique à Québec (station de Lauzon) est de 1,966 m, le zéro des cartes marines se trouvant sous le zéro géodésique.

En référence géodésique, les niveaux d'eau recommandés seraient, en tenant compte des changements climatiques :

- +4,4 m Géod. pour le dimensionnement des ouvrages en enrochement et des plages;
- +5,3 m Géod. pour la vérification de l'impact des événements exceptionnels.

3 Données de vent

3.1 Source de l'information

Environnement Canada fournit certaines informations météorologiques dans la région de Québec. Les stations disponibles à proximité des battures de Beauport sont la station météorologique de Beauport, celle de Lauzon et celle de l'aéroport de Québec.

La station météorologique de l'aéroport de Québec est beaucoup trop à l'intérieur des terres et trop à l'ouest du port de Québec pour que les vents qui y sont enregistrés puissent être utilisés pour générer le climat de vagues dans la baie de Beauport.

La station météorologique de Lauzon est relativement bien placée pour ce qui est des vents du secteur est qui pourraient affecter les installations portuaires de Beauport. De plus, elle est en opération depuis 1978. Malheureusement, Environnement Canada a décidé de ne plus rendre disponible les informations de vent de cette station parce que l'anémomètre n'est pas situé à une élévation standard de 10 m au-dessus du sol. Des vérifications ont été faites avec la base de données disponible pour cette station, soit de 1991 à 2006, pour obtenir une meilleure idée de la variabilité des vents et de leur influence sur les vagues dans la baie de Beauport.

La station météorologique de Beauport est en opération depuis 1999 et les données ont été compilées jusqu'en juillet 2009.

3.2 Station de Lauzon

L'annexe A présente l'ensemble des roses de vent obtenues pour l'ensemble de la base de données et pour chaque année avec les informations de la station météorologique de Lauzon entre 1991 et 2006.

La rose des vents de l'ensemble des données indique les directions préférentielles du vent à cette station, soit l'est-nord-est qui domine nettement (suivi de l'est et du nord-est) et l'ouest qui vient loin derrière en termes de fréquence de vents forts. On remarque des variabilités annuelles, comme en 1992 avec relativement peu de vent du secteur est-nord-est ou au contraire 1995 avec de forts vents de ce secteur. Il est par contre impossible de mettre en lumière une quelconque tendance avec les années.

La vitesse maximale de vent enregistrée de 1991 à 2006 à cette station est de 108 km/h, mais il s'agit d'un événement isolé en 2004, les vitesses annuelles maximales étant en général inférieures à 85 km/h.

3.3 Station de Beauport

L'annexe B présente l'ensemble des roses de vent obtenues pour l'ensemble de la base de données et pour chaque année avec les données de la station météorologique de Beauport entre 1999 et 2009.

La rose des vents de l'ensemble des données indique les directions préférentielles du vent à cette station, soit l'est-nord-est qui domine nettement (suivi du nord-est) et l'ouest-sud-ouest qui vient loin derrière en termes de fréquence de vents forts.

Il faut mettre à part dans l'analyse les années 1999 et 2009 à cause de leur faible couverture en termes de données (40,09 % pour 1999 et données s'arrêtant en fin du mois de juillet en 2009).

On remarque aussi des variabilités annuelles, comme en 2000 et 2002 avec des vents forts des secteurs nord-est et est-nord-est ou au contraire 2004 avec des vents généralement faibles.

Il est impossible de mettre en lumière une quelconque tendance avec les années. La figure suivante indique les fréquences de dépassement de vitesse de vent, tous secteurs confondus, d'année en année. Les années 1999 et 2009 se retrouvent dans la partie inférieure du graphique pour les raisons évoquées plus haut. Sinon, il n'y a pas de patron évident d'évolution du climat des vents à cette station, la période de disponibilité de données étant cependant très nettement insuffisante pour détecter ce genre d'évolution du climat.

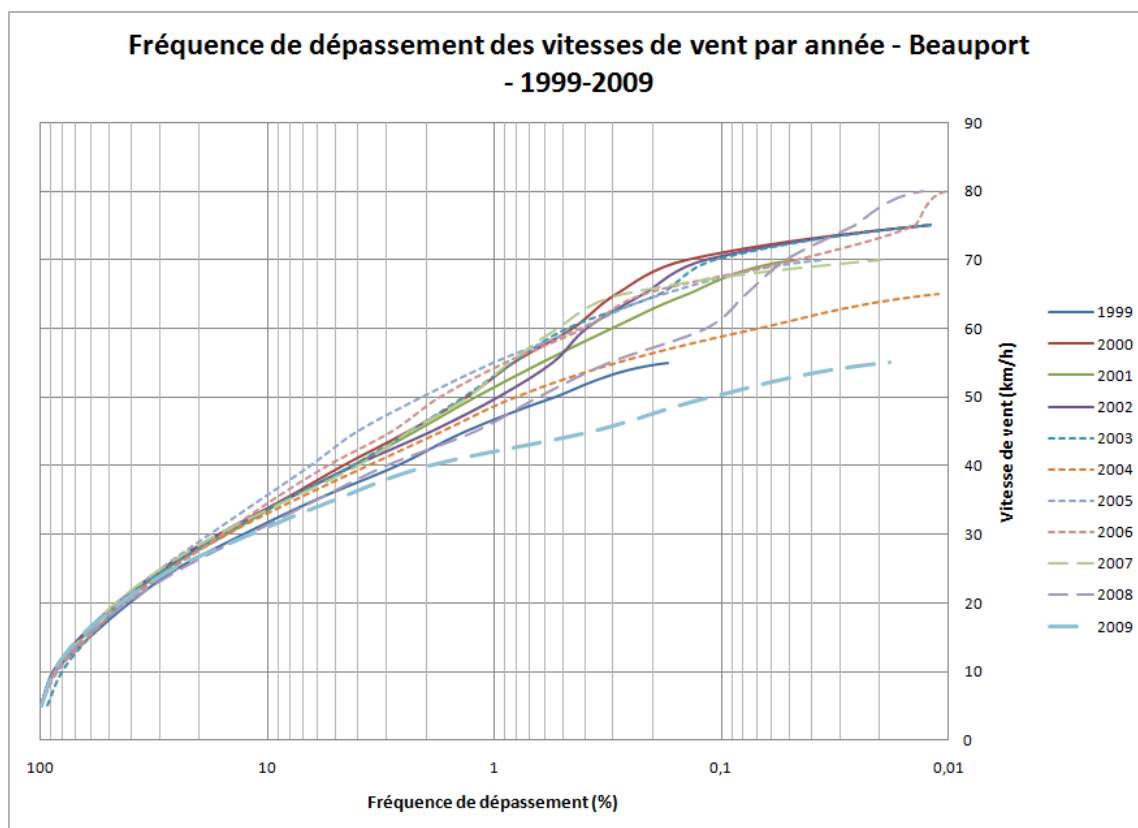


Figure 3.1 Station météo de BEAUPORT – Caractéristiques des vents par année

3.4 Évolution du climat

Afin de vérifier l'hypothèse selon laquelle l'érosion de la plage des battures de Beauport a accéléré au cours de la dernière décennie, il aurait été important de disposer de données de vents aux stations de Lauzon ou de Beauport depuis le début des années 1970. Malheureusement, de telles informations ne sont pas disponibles.

Avec les bases de données disponibles, aucune tendance n'a pu être dégagée en termes de vitesse ou de direction des vents. Il n'est donc pas possible de confirmer ou d'infirmer l'hypothèse de l'accélération de l'érosion de la plage des battures de Beauport avec cette information.

4 Prédications de vague

4.1 Contexte de l'étude de vagues

Une prédiction des vagues a été effectuée dans le cadre du dimensionnement préliminaire des ouvrages et d'évolution des sédiments dans la baie de Beauport. En l'absence de données de vagues appropriées, celles-ci sont établies à l'aide d'un modèle mathématique sur ordinateur, à partir des enregistrements de vent à une station météorologique avoisinante.

En utilisant le logiciel « Gener », les vagues ont été reconstituées devant la plage des battures de Beauport à partir des données de vent enregistrées aux stations météorologiques de Beauport et Lauzon.

4.2 Fetchs

Les fetchs sont les distances d'eau libre sur lesquelles les vents peuvent soulever les vagues dans une direction donnée. Les fetchs permettant de calculer la hauteur des vagues devant la plage ont été déterminés à partir de la carte marine.

La position d'origine du calcul des fetchs devant la plage des battures de Beauport est située par 46° 50' 20'' Nord et 71° 11' 24'' Ouest par environ 2 m d'eau à marée basse.

Les radiales et les fetchs utilisés dans les prévisions de vague suivant les directions d'intérêt sont calculés à l'aide de la méthode des fetchs effectifs et sont reproduits dans les tableaux 4.1 a et 4.1 b. À noter que le fetch utilisé correspond à la moyenne plus un demi-écart-type.

Les fetchs ont également été calculés pour vérifier le climat des vagues dans le rentrant sud-ouest. La position d'origine du calcul des fetchs à l'entrée du rentrant sud-ouest est située par 46° 50' 28'' Nord et 71° 11' 54'' Ouest près du zéro marégraphique.

Les radiales et les fetchs utilisés dans les prévisions de vague suivant les directions d'intérêt sont reproduits dans les tableaux 4.2 a et 4.2 b.

Tableau 4.1a Radiales selon les directions devant la plage des battures de Beauport

km	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
-42	1,5	1,4	1,5	1,7	13,8	4,0	10,4	2,1	1,9	2,1	4,7	0,5	0,4	0,4	1,2	1,1
-39	1,5	1,4	1,5	2,1	6,7	4,0	9,0	2,0	1,9	2,1	5,3	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1
-36	1,4	1,4	1,5	2,2	6,3	3,9	5,6	2,0	1,9	2,1	6,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1
-33	1,4	1,4	1,6	2,4	5,7	4,1	5,0	1,9	1,9	2,2	6,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1
-30	1,5	1,4	1,6	2,8	5,4	4,4	2,6	1,9	1,9	2,4	2,8	0,4	0,4	0,4	1,1	1,4
-27	1,4	1,4	1,7	8,8	5,0	18,3	2,1	1,9	2,0	2,8	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5
-24	1,4	1,4	1,7	10,0	4,4	17,0	2,0	1,9	2,0	2,9	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5
-21	1,4	1,4	1,7	13,5	4,0	15,7	2,1	1,9	2,1	4,1	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5
-18	1,4	1,5	2,1	13,8	4,0	10,4	2,0	1,9	2,1	4,7	0,4	0,4	0,4	1,2	1,1	1,5
-15	1,4	1,5	2,2	6,7	3,9	9,0	2,0	1,9	2,1	5,3	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1	1,5
-12	1,4	1,5	2,4	6,3	4,1	5,6	1,9	1,9	2,2	6,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1	1,4
-9	1,4	1,6	2,8	5,7	4,4	5,0	1,9	1,9	2,4	6,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,4	1,4
-6	1,4	1,6	8,8	5,4	18,3	2,6	1,9	1,9	2,8	2,8	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,5
-3	1,4	1,7	10,0	5,0	17,0	2,1	1,9	2,0	2,9	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,4
0	1,4	1,7	13,5	4,4	15,7	2,0	1,9	2,0	4,1	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,4
3	1,5	1,7	13,8	4,0	10,4	2,1	1,9	2,1	4,7	0,5	0,4	0,4	1,2	1,1	1,5	1,4
6	1,5	2,1	6,7	4,0	9,0	2,0	1,9	2,1	5,3	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1	1,5	1,4
9	1,5	2,2	6,3	3,9	5,6	2,0	1,9	2,1	6,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1	1,4	1,4
12	1,6	2,4	5,7	4,1	5,0	1,9	1,9	2,2	6,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1	1,4	1,4
15	1,6	2,8	5,4	4,4	2,6	1,9	1,9	2,4	2,8	0,4	0,4	0,4	1,1	1,4	1,5	1,4
18	1,7	8,8	5,0	18,3	2,1	1,9	2,0	2,8	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,4	1,4
21	1,7	10,0	4,4	17,0	2,0	1,9	2,0	2,9	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,4	1,4
24	1,7	13,5	4,0	15,7	2,1	1,9	2,1	4,1	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,4	1,4
27	2,1	13,8	4,0	10,4	2,0	1,9	2,1	4,7	0,4	0,4	0,4	1,2	1,1	1,5	1,4	1,5
30	2,2	6,7	3,9	9,0	2,0	1,9	2,1	5,3	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1	1,5	1,4	1,5
33	2,4	6,3	4,1	5,6	1,9	1,9	2,2	6,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,1	1,4	1,4	1,5
36	2,8	5,7	4,4	5,0	1,9	1,9	2,4	6,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,4	1,4	1,4	1,6
39	8,8	5,4	18,3	2,6	1,9	1,9	2,8	2,8	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,5	1,4	1,6
42	10,0	5,0	17,0	2,1	1,9	2,0	2,9	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,4	1,4	1,7

Tableau 4.1b Fetchs effectifs selon les directions devant la plage des battures de Beauport

km	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0	1,4	1,7	13,5	4,4	15,7	2,0	1,9	2,0	4,1	0,5	0,4	0,4	0,4	1,1	1,5	1,4
±3	1,4	1,7	12,4	4,5	14,4	2,1	1,9	2,0	3,9	0,5	0,4	0,4	0,7	1,1	1,5	1,4
±6	1,4	1,8	10,5	4,5	14,0	2,2	1,9	2,0	3,9	0,9	0,4	0,4	0,7	1,1	1,5	1,4
±9	1,4	1,8	8,8	4,6	11,4	2,5	1,9	2,0	4,1	1,6	0,4	0,4	0,7	1,1	1,4	1,4
±12	1,4	1,8	7,7	4,7	9,9	2,8	1,9	2,0	4,1	2,0	0,4	0,4	0,7	1,1	1,4	1,4
±15	1,4	1,9	7,0	4,8	8,7	3,2	1,9	2,0	3,8	2,2	0,4	0,4	0,7	1,1	1,4	1,4
±18	1,4	2,3	6,4	6,4	7,8	3,6	1,9	2,0	3,4	2,2	0,4	0,4	0,7	1,1	1,3	1,4
±21	1,4	2,7	6,0	7,5	7,1	4,2	1,9	2,1	3,1	2,2	0,4	0,4	0,7	1,1	1,3	1,4
±24	1,4	3,2	5,6	8,0	6,6	4,8	1,9	2,2	2,9	2,1	0,4	0,4	0,7	1,1	1,3	1,4
±27	1,4	3,6	5,2	8,0	6,3	5,2	1,9	2,2	2,7	2,0	0,4	0,4	0,7	1,0	1,3	1,4
±30	1,5	3,6	5,0	7,8	6,0	5,0	1,9	2,3	2,5	1,9	0,5	0,4	0,7	1,0	1,3	1,3
±33	1,5	3,5	4,7	7,4	5,7	4,8	2,0	2,4	2,4	1,9	0,7	0,4	0,7	1,0	1,2	1,3
±36	1,5	3,5	4,6	7,0	5,5	4,6	2,1	2,5	2,3	1,8	0,9	0,5	0,7	1,0	1,2	1,3
±39	1,7	3,4	4,8	6,6	5,4	4,4	2,3	2,5	2,2	1,7	1,0	0,5	0,7	1,0	1,2	1,3
±42	1,9	3,4	4,9	6,3	5,4	4,2	2,5	2,4	2,1	1,7	1,0	0,5	0,7	0,9	1,2	1,3
Moy.	1,5	2,7	7,1	6,2	8,7	3,7	2,0	2,2	3,2	1,7	0,5	0,4	0,7	1,1	1,3	1,4
Éc.-typ	0,1	0,8	2,9	1,4	3,6	1,1	0,2	0,2	0,8	0,6	0,2	0,0	0,1	0,1	0,1	0,0
Fetch	1,5	3,1	8,6	6,9	10,5	4,3	2,1	2,3	3,6	2,0	0,6	0,4	0,7	1,1	1,4	1,4

Tableau 4.2a Radiales selon les directions à l'entrée du rentrant sud-ouest

km	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
-42	0,4	1,0	1,1	1,2	2,7	5,3	11,1	2,8	2,5	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,5	0,4
-39	0,8	0,9	1,1	1,3	14,4	4,8	10,0	2,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,6	0,4	0,4
-36	0,8	0,9	1,1	1,4	9,6	4,5	6,5	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,5	0,4	0,4
-33	0,9	0,9	1,1	1,5	7,1	4,5	5,9	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4
-30	0,9	0,9	1,1	1,6	6,6	4,6	5,3	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4
-27	0,9	1,1	1,1	1,7	6,1	4,8	3,2	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4
-24	0,9	1,0	1,2	1,9	5,8	17,9	2,7	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4
-21	1,0	1,1	1,2	1,8	5,3	16,7	2,8	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4
-18	0,9	1,1	1,3	2,7	4,8	11,1	2,8	2,5	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4
-15	0,9	1,1	1,4	14,4	4,5	10,0	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,5	0,4	0,4	0,8
-12	0,9	1,1	1,5	9,6	4,5	6,5	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,8
-9	0,9	1,1	1,6	7,1	4,6	5,9	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9
-6	1,1	1,1	1,7	6,6	4,8	5,3	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9
-3	1,0	1,1	1,9	6,1	17,9	3,2	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9
0	1,1	1,2	1,8	5,8	16,7	2,7	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,9
3	1,1	1,2	2,7	5,3	11,1	2,8	2,5	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	1,0
6	1,1	1,3	14,4	4,8	10,0	2,8	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,6	0,4	0,4	0,8	0,9
9	1,1	1,4	9,6	4,5	6,5	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,5	0,4	0,4	0,8	0,9
12	1,1	1,5	7,1	4,5	5,9	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9	0,9
15	1,1	1,6	6,6	4,6	5,3	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9	0,9
18	1,1	1,7	6,1	4,8	3,2	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9	1,1
21	1,2	1,9	5,8	17,9	2,7	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,9	1,0
24	1,2	1,8	5,3	16,7	2,8	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	1,0	1,1
27	1,3	2,7	4,8	11,1	2,8	2,5	0,3	0,3	0,3	0,6	0,6	0,5	0,4	0,4	0,9	1,1
30	1,4	14,4	4,5	10,0	2,7	0,3	0,3	0,3	0,3	0,7	0,5	0,4	0,4	0,8	0,9	1,1
33	1,5	9,6	4,5	6,5	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,8	0,9	1,1
36	1,6	7,1	4,6	5,9	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9	0,9	1,1
39	1,7	6,6	4,8	5,3	2,6	0,3	0,3	0,3	0,4	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9	1,1	1,1
42	1,9	6,1	17,9	3,2	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,7	0,5	0,4	0,4	0,9	1,0	1,1

Tableau 4.2b Fetchs effectifs selon les directions à l'entrée du rentrant sud-ouest

km	N	NNE	NE	ENE	E	ESE	SE	SSE	S	SSW	SW	WSW	W	WNW	NW	NNW
0	1,1	1,2	1,8	5,8	16,7	2,7	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,9
±3	1,0	1,2	2,1	5,7	15,2	2,9	2,5	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,4	0,9
±6	1,1	1,2	4,5	5,7	12,1	3,3	2,1	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,9
±9	1,0	1,2	4,8	5,7	10,2	3,6	1,9	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,9
±12	1,0	1,2	4,6	6,0	9,1	3,8	1,8	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,9
±15	1,0	1,2	4,5	6,6	8,3	4,2	1,7	0,3	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,6	0,9
±18	1,0	1,2	4,4	6,1	7,6	4,6	1,7	0,5	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,6	0,9
±21	1,0	1,3	4,2	6,5	7,1	5,2	1,7	0,6	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,6	0,8
±24	1,0	1,3	4,1	6,7	6,7	5,6	1,6	0,6	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,6	0,8
±27	1,0	1,3	3,9	6,6	6,4	5,4	1,6	0,7	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,8
±30	1,0	1,8	3,8	6,5	6,2	5,1	1,7	0,8	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,8
±33	1,0	2,0	3,6	6,2	6,0	4,8	1,8	0,8	0,3	0,3	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,8
±36	1,0	2,1	3,5	5,9	5,9	4,6	1,8	0,8	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,4	0,6	0,8
±39	1,0	2,2	3,4	5,7	6,0	4,4	2,0	0,9	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7
±42	1,0	2,2	3,7	5,4	5,7	4,2	2,2	0,9	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,7
Moy.	1,0	1,5	3,8	6,1	8,6	4,3	1,9	0,6	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,5	0,8
Éc.-typ	0,0	0,4	0,8	0,4	3,5	0,9	0,3	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0	0,0	0,1	0,1
Fetch	1,0	1,7	4,2	6,3	10,4	4,7	2,1	0,7	0,3	0,3	0,5	0,6	0,5	0,4	0,6	0,9

4.3 Vagues

À l'aide d'un modèle paramétrique sur ordinateur, les données de vent des deux stations météorologiques considérées (Beauport et Lauzon) ont été utilisées pour la reconstitution des vagues devant la plage de la baie de Beauport. Seules les données de Beauport ont été utilisées pour la reconstitution des vagues à l'entrée du rentrant sud-ouest. Le modèle applique la méthode S.M.B. (Shore Protection Manual, 1984) de façon séquentielle aux données horaires du vent pour obtenir les statistiques des vagues en un point de la baie de Beauport.

Les données du vent sont préalablement lissées pour éliminer le plus possible les irrégularités présentes dans les données de ce genre.

Un facteur d'amplification de 110 % a été appliqué aux vitesses du vent (stations terrestres) pour ramener les vitesses sur terre à des vitesses sur l'eau.

À partir des résultats de ces calculs, on a tracé sur les figure 4.1, 4.2 et 4.3 les roses des vagues (échelle de 0 à 3,0 m) pour les trois cas sélectionnés. L'échelle logarithmique permet de mettre en évidence les fortes vagues.

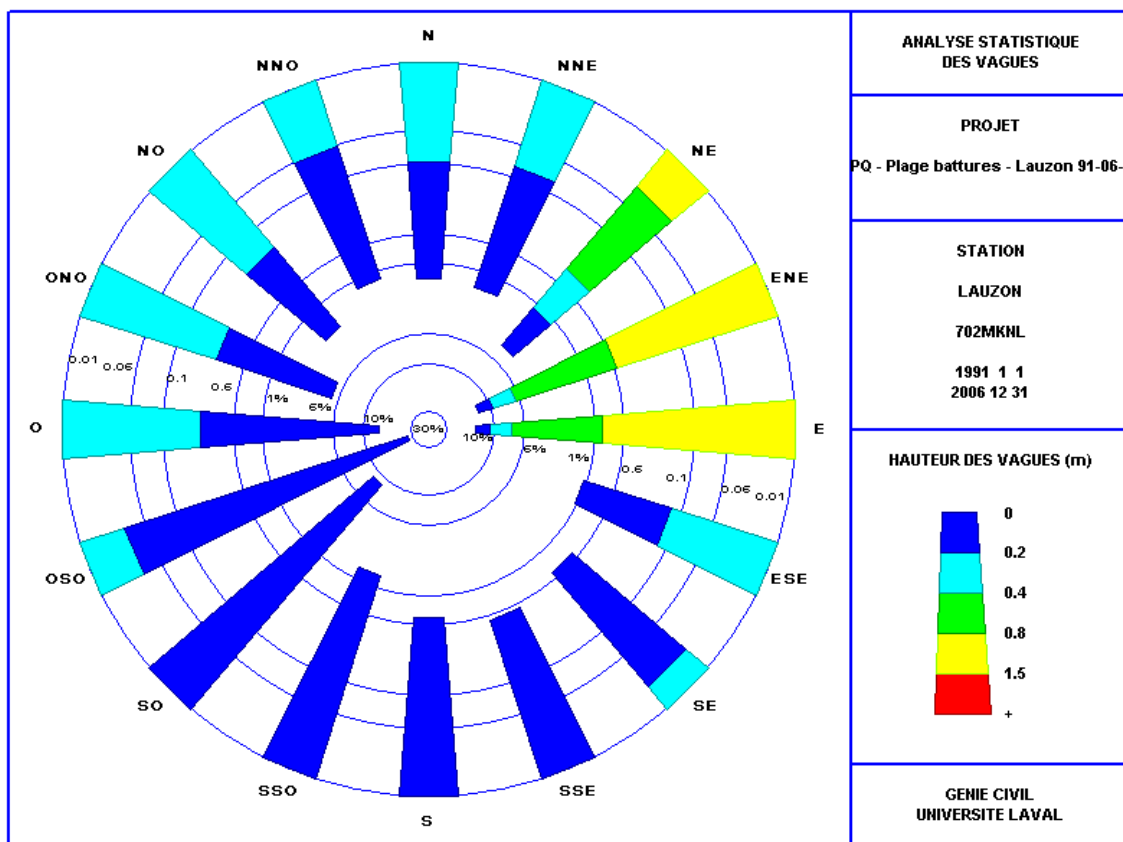


Figure 4.1 Rose des vagues devant la plage des battures de Beauport – Lauzon 1991-2006 – facteur d'amplification des vitesses de vent de 1,1

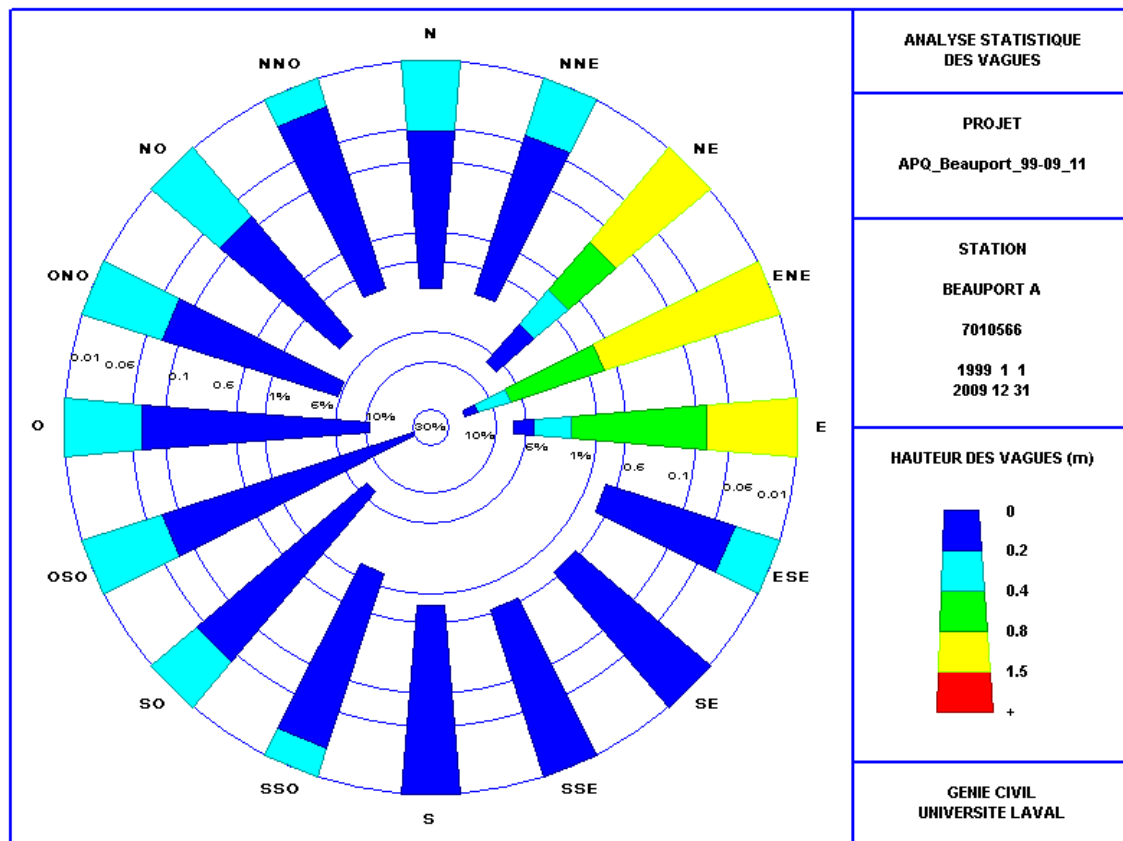


Figure 4.2 Rose des vagues devant la plage des battures de Beauport – Beauport 1999-2009 – facteur d’amplification des vitesses de vent de 1,1

L’ensemble des roses de vagues apparaît à l’annexe C pour les données obtenues avec la station de vent de Lauzon et à l’annexe D pour les données obtenues avec la station de vent de Beauport.

L’analyse des figures indique une prédominance des secteurs est et est-nord-est lorsqu’on prend les vents de Lauzon et une prédominance du secteur est-nord-est lorsqu’on prend les vents de Beauport.

Dans les deux cas, toutes les vagues qui comptent en termes de dimensionnement de la plage du point de vue sédimentologique ou de dimensionnement des protections en enrochement viennent exclusivement des secteurs est à nord-est.

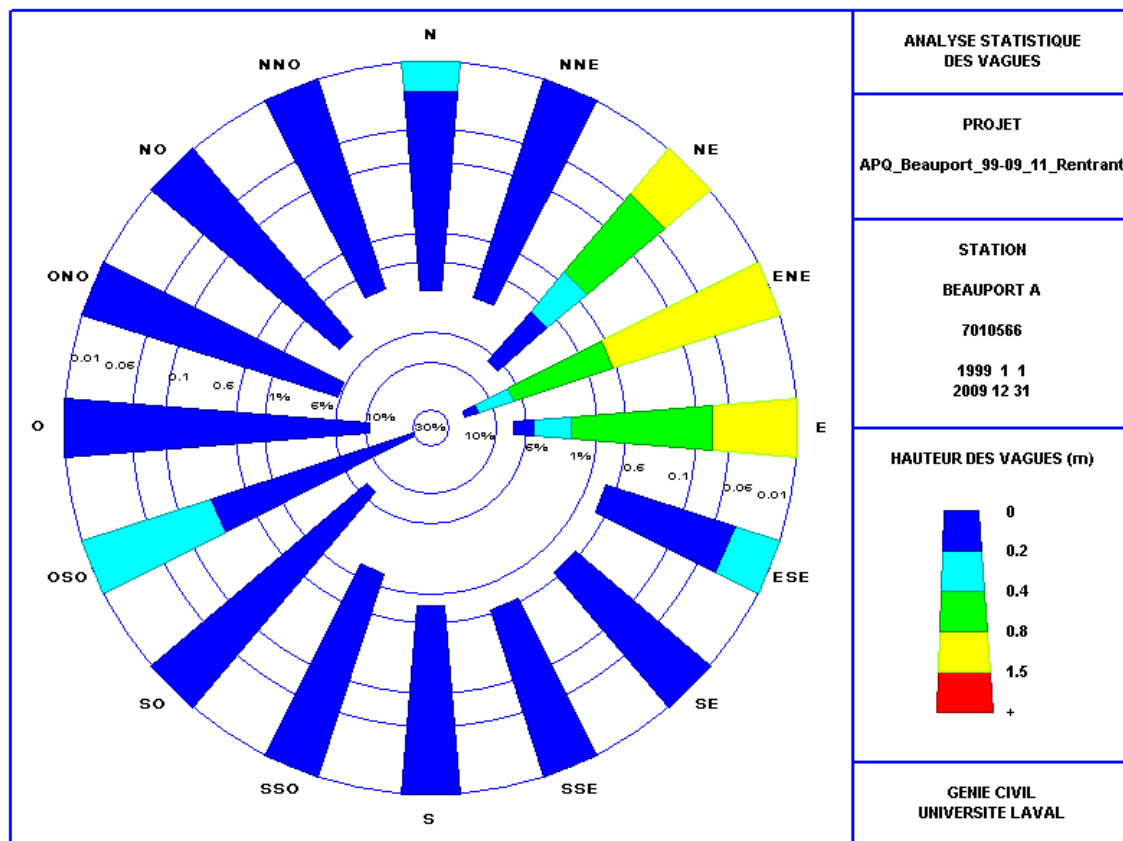


Figure 4.3 Rose des vagues à l'entrée du rentrant sud-ouest – Beauport 1999-2009 – facteur d'amplification des vitesses de vent de 1,1

L'analyse des résultats concernant le rentrant sud-ouest indique une diminution des vagues de pratiquement tous les secteurs (sauf le secteur ouest-sud-ouest) par rapport aux résultats concernant la plage des battures.

4.4 Vagues caractéristiques

Une analyse des vagues caractéristiques a été faite à partir des calculs précédents.

Une première analyse a consisté à évaluer la fréquence de dépassement des hauteurs de vagues prédites en fonction des deux séries de données de vent utilisées (Beauport 1999-2009 et Lauzon 1991-2006). La figure suivante illustre les courbes obtenues pour ces deux séries de données de vent.

Cette figure indique que les hauteurs significatives suivantes seraient dépassées :

- Une heure par année : 1,3 m
- Douze heures par année : 1,1 m
- Une journée par année : 1,0 m

La hauteur significative de vague de 0,6 m serait dépassée 300 heures par année selon les données de vent de Beauport et 450 heures par année selon les données de vent de Lauzon.

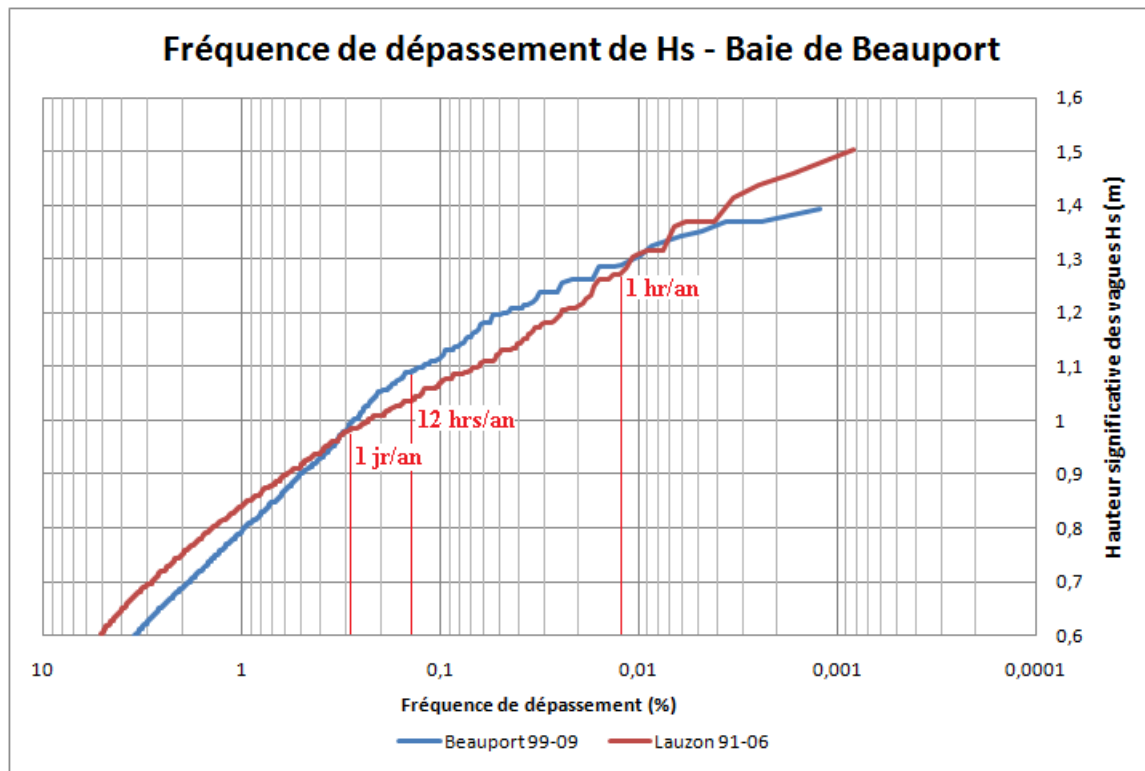


Figure 4.4 Fréquence de dépassement des hauteurs de vague

Les relations entre les hauteurs de vague significatives et la période de pointe des vagues ont été évaluées pour les deux séries de données de vent. Les deux figures suivantes illustrent ces relations.

Les périodes de pointe maximales sont de l'ordre de 4,7 secondes dans les deux cas, la limitation provenant surtout des fetchs.

Dans les fourchettes de hauteurs de vagues significatives qui intéressent particulièrement les mouvements sédimentaires ($0,6 \text{ m} < H_s < 1,0 \text{ m}$) à cause de leur fréquence, les périodes de pointe seraient de l'ordre de 3,5 à 4,1 secondes.

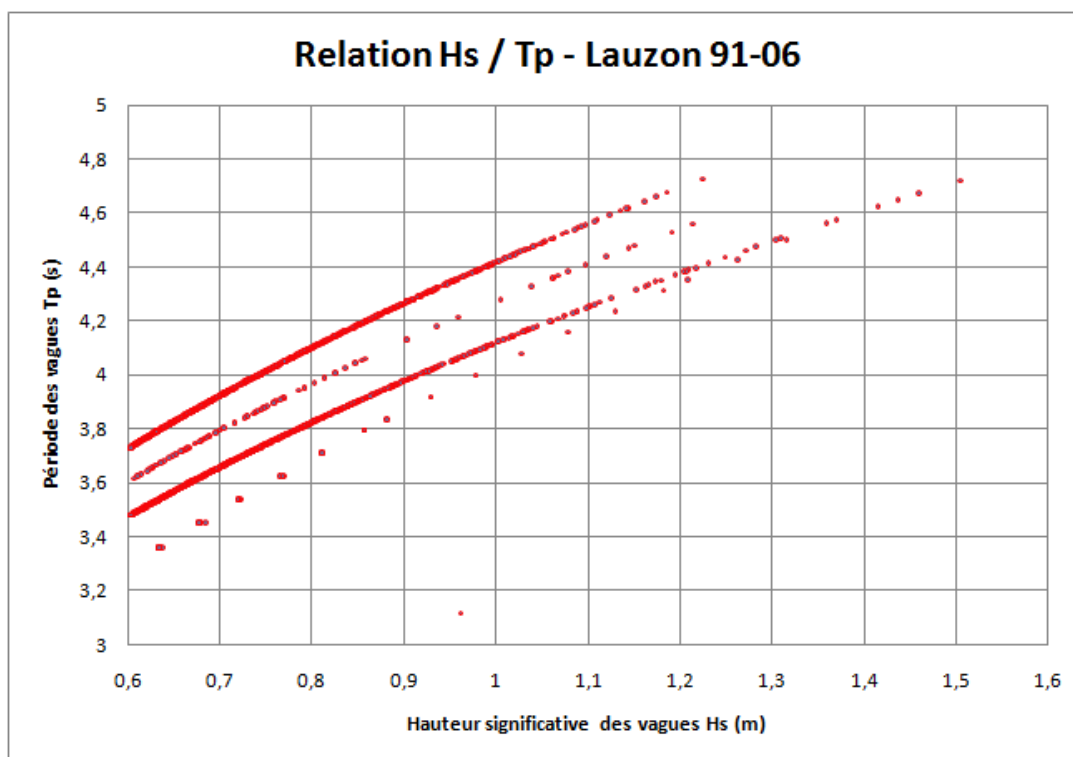


Figure 4.5 Relation Hauteur significative / Période des vagues pour Lauzon

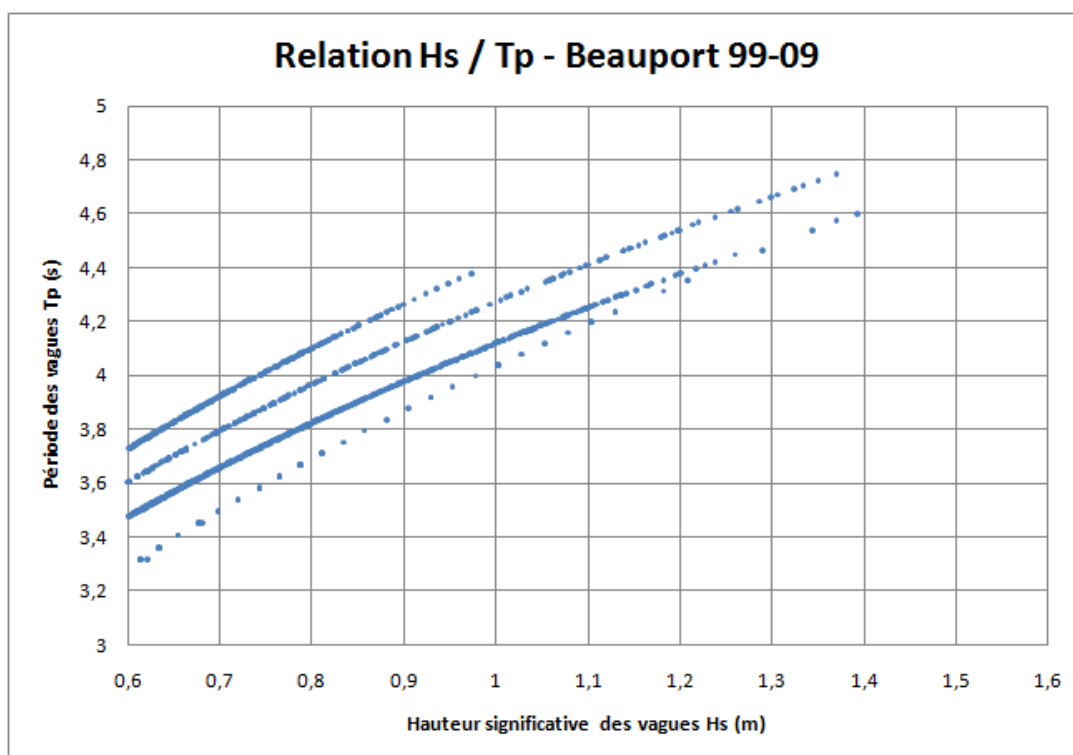


Figure 4.6 Relation Hauteur significative / Période des vagues pour Beauport

L'évaluation de la relation entre les hauteurs significatives de vagues et les directions de ces vagues a enfin été faite.

La correspondance entre les chiffres de direction (décomposition de la rose en 16 cadrans) apparaissant dans le graphique et les directions géographiques est la suivante :

Tableau 4.3 Correspondance des directions de vague

Direction dans le graphique	Direction géographique
1	NNE
2	NE
3	ENE
4	E
5	ESE
6	SE
7	SSE
8	S
9	SSW
10	SW
11	WSW
12	W
13	WNW
14	NW
15	NNW
16	N

Les figures suivantes indiquent la direction presque exclusive des fortes vagues des directions comprises entre le nord-est et l'est, avec une légère dominance de la direction est pour les données provenant de la station de Beauport et une légère dominance de la direction est-nord-est pour les données provenant de la station de Lauzon.

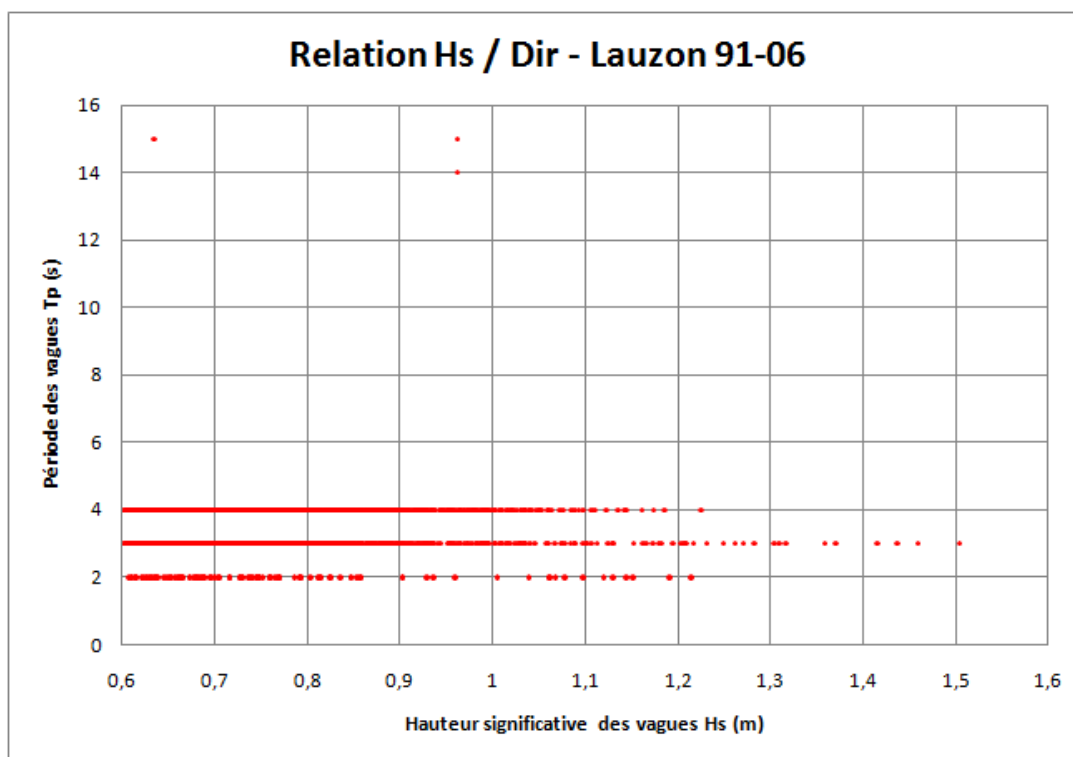


Figure 4.7 Relation Hauteur significative / Direction des vagues pour Lauzon

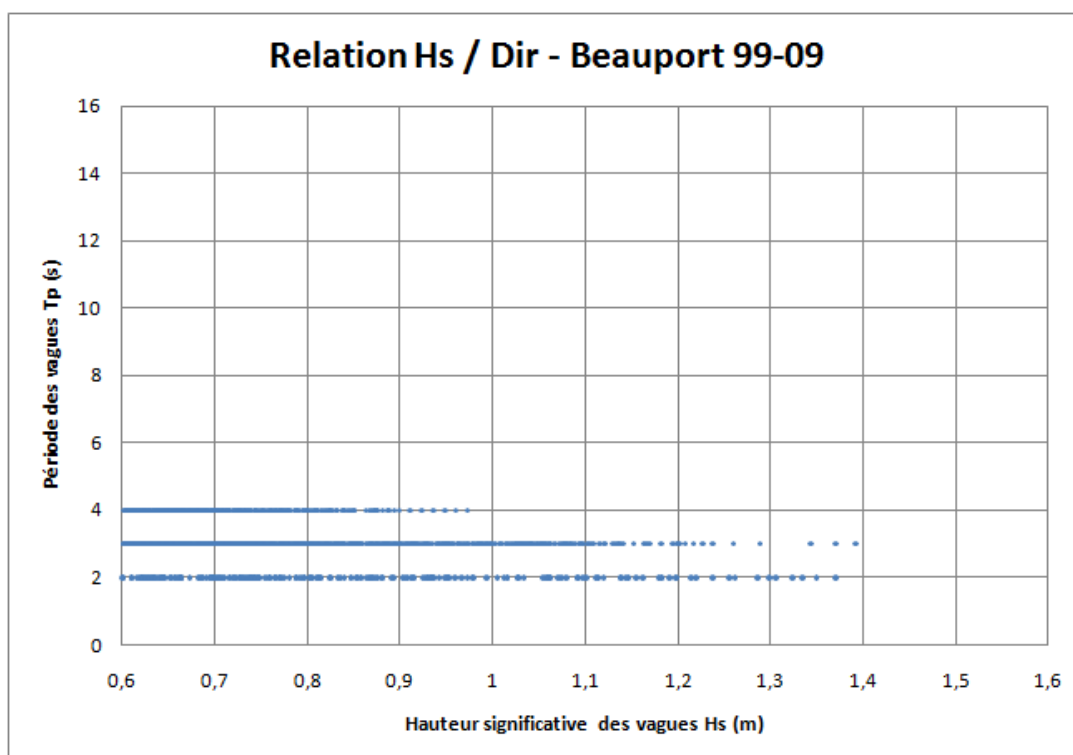


Figure 4.8 Relation Hauteur significative / Direction des vagues pour Beauport

Une analyse des vagues caractéristiques a également été faite. Cette analyse consiste à déterminer les vagues les plus représentatives des conditions d'agitation prédites à partir des différentes conditions de vent. Les tableaux suivants présentent cette analyse complète devant la plage des battures pour les données de vents de Lauzon et de Beauport.

Tableau 4.4 Vagues caractéristiques devant la plage – Lauzon 1991-2006

Direction	Période (s)	Direction (degrés)	Hauteur Hs (m)	Fréquence	
				(%)	(heures)
N	2	0	0,1	9,623E-03	84,3
NNE	2	22,5	0,09	1,118E-02	97,92
NE	2	45	0,15	2,492E-02	218,28
NE	4	45	0,52	4,807E-03	42,11
ENE	2	67,5	0,22	7,372E-02	645,81
ENE	4	67,5	0,59	5,744E-02	503,16
E	2	90	0,18	5,955E-02	521,66
E	4	90	0,55	8,758E-02	767,19
ESE	2	112,5	0,12	7,394E-03	64,77
ESE	4	112,5	0,55	3,327E-05	0,29
SE	2	135	0,08	3,161E-03	27,69
SSE	2	157,5	0,07	2,420E-03	21,2
S	2	180	0,08	3,377E-03	29,58
SSW	2	202,5	0,07	8,483E-03	74,32
SW	2	225	0,07	3,507E-02	307,24
WSW	2	247,5	0,08	1,274E-01	1115,82
W	2	270	0,1	1,107E-01	969,96
WNW	2	292,5	0,12	3,403E-02	298,06
NW	2	315	0,12	1,538E-02	134,71
NW	4	315	0,95	8,317E-06	0,07
NNW	2	337,5	0,1	8,026E-03	70,31
NNW	4	337,5	0,95	1,663E-05	0,15

Tableau 4.5 Vagues caractéristiques devant la plage – Beauport 1999-2009

Direction	Période (s)	Direction (degrés)	Hauteur Hs (m)	Fréquence	
				(%)	(heures)
N	2	0	0,08	1,215E-02	106,39
NNE	2	22,5	0,07	1,296E-02	113,54
NE	2	45	0,15	4,536E-02	397,4
NE	4	45	0,59	9,234E-03	80,89
ENE	2	67,5	0,23	1,231E-01	1078,75
ENE	4	67,5	0,58	7,165E-02	627,68
E	2	90	0,18	3,617E-02	316,83
E	4	90	0,48	2,823E-02	247,25
ESE	2	112,5	0,09	4,300E-03	37,67
SE	2	135	0,07	3,447E-03	30,2
SSE	2	157,5	0,07	3,764E-03	32,97
S	2	180	0,08	5,323E-03	46,63
SSW	2	202,5	0,08	9,538E-03	83,56
SW	2	225	0,09	3,405E-02	298,26
WSW	2	247,5	0,09	1,320E-01	1156,44
W	2	270	0,09	6,931E-02	607,19
WNW	2	292,5	0,1	3,278E-02	287,16
NW	2	315	0,1	2,103E-02	184,19
NNW	2	337,5	0,08	9,477E-03	83,02
NW	4	315	0,95	8,317E-06	0,07
NNW	2	337,5	0,1	8,026E-03	70,31
NNW	4	337,5	0,95	1,663E-05	0,15

Si on ne retient que les directions critiques (NE, ENE et E) et les vagues d’au moins 4 secondes de période, les deux sources d’information de vent donnent les résultats suivants :

Tableau 4.6 Comparaison des résultats de vagues caractéristiques selon la station météorologique retenue

Direction	Lauzon 1991-2006		Beauport 1999-2009	
	Hs (m)	Fréq. (heures)	Hs (m)	Fréq. (heures)
NE - 4s	0,52	42	0,59	81
ENE - 4s	0,59	503	0,58	628
E - 4s	0,55	767	0,48	247

4.5 Vagues extrêmes prédites dans la baie de Beauport

L'évaluation de la hauteur des vagues ayant une période de retour de 25 à 100 ans a été faite à partir des résultats des calculs précédents selon les méthodes statistiques de Gumbel et de Weibull pour l'année entière. Les figures 4.8 et 4.9 suivantes présentent les résultats pour la plage des battures en fonction des stations de vent de Lauzon et de Beauport et les résultats pour l'entrée du rentrant en fonction de la station de Beauport. Les figures 4.10, 4.11 et 4.12 présentent les résultats pour ces trois cas.

L'analyse des résultats indique qu'il faudrait s'attendre à des vagues extrêmes dans la baie de Beauport de l'ordre de 1,6 m pour une récurrence de 50 ans et de l'ordre de 1,7 m pour une récurrence de 100 ans.

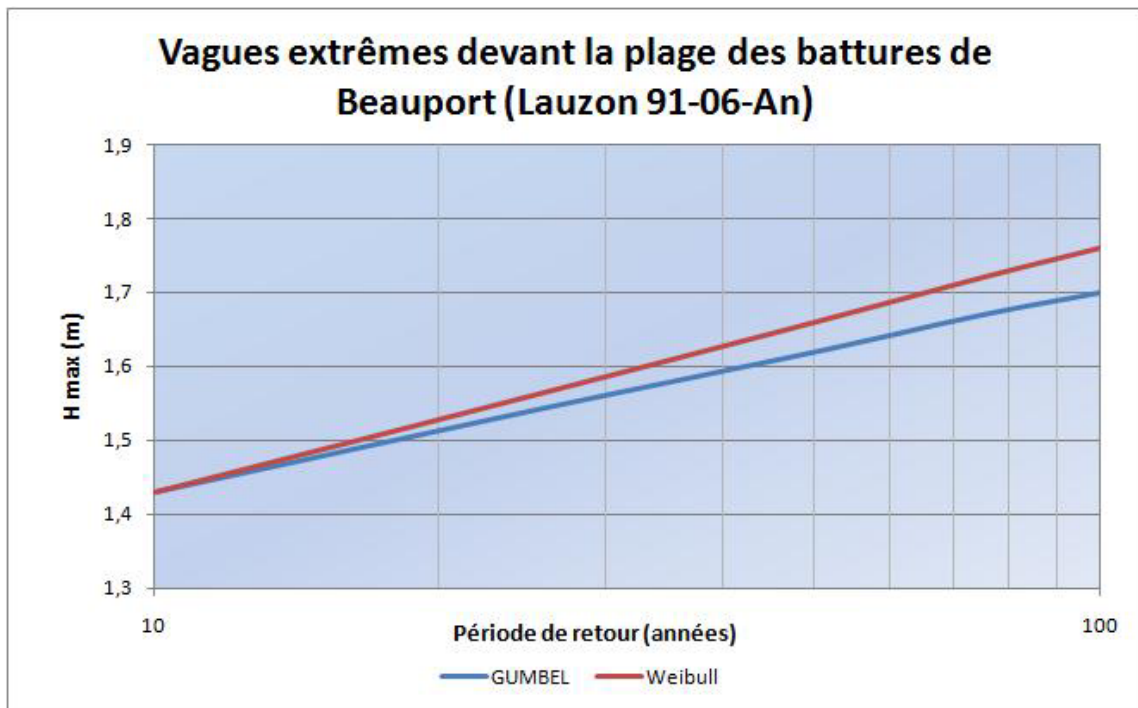
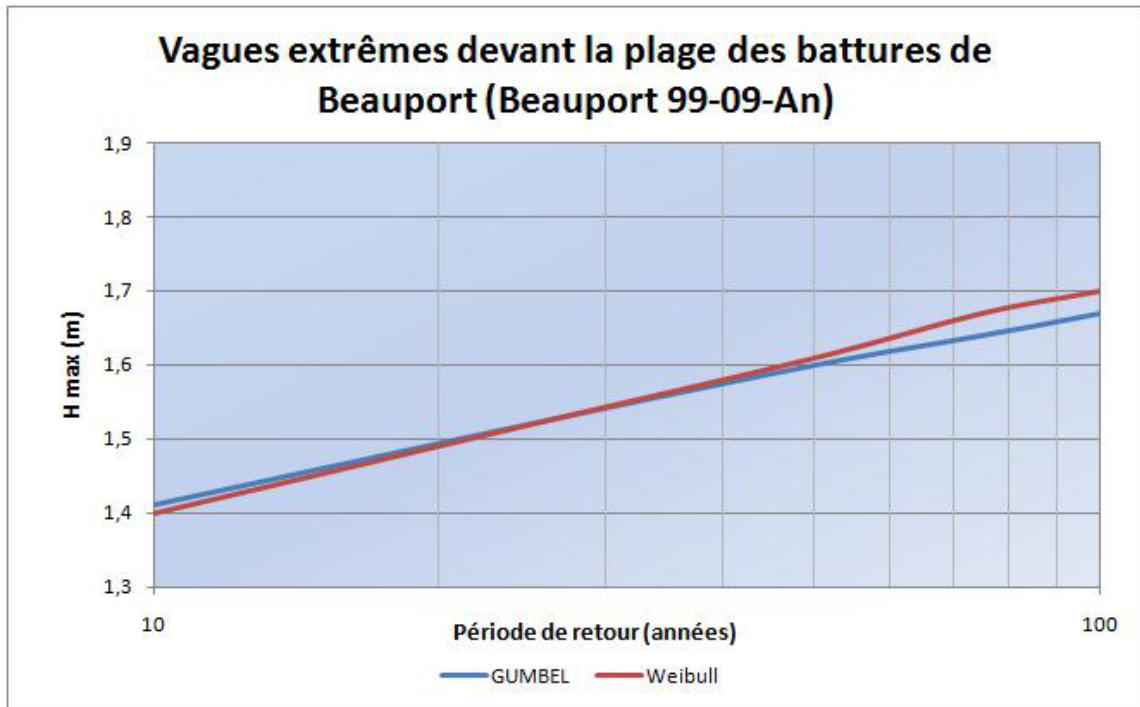
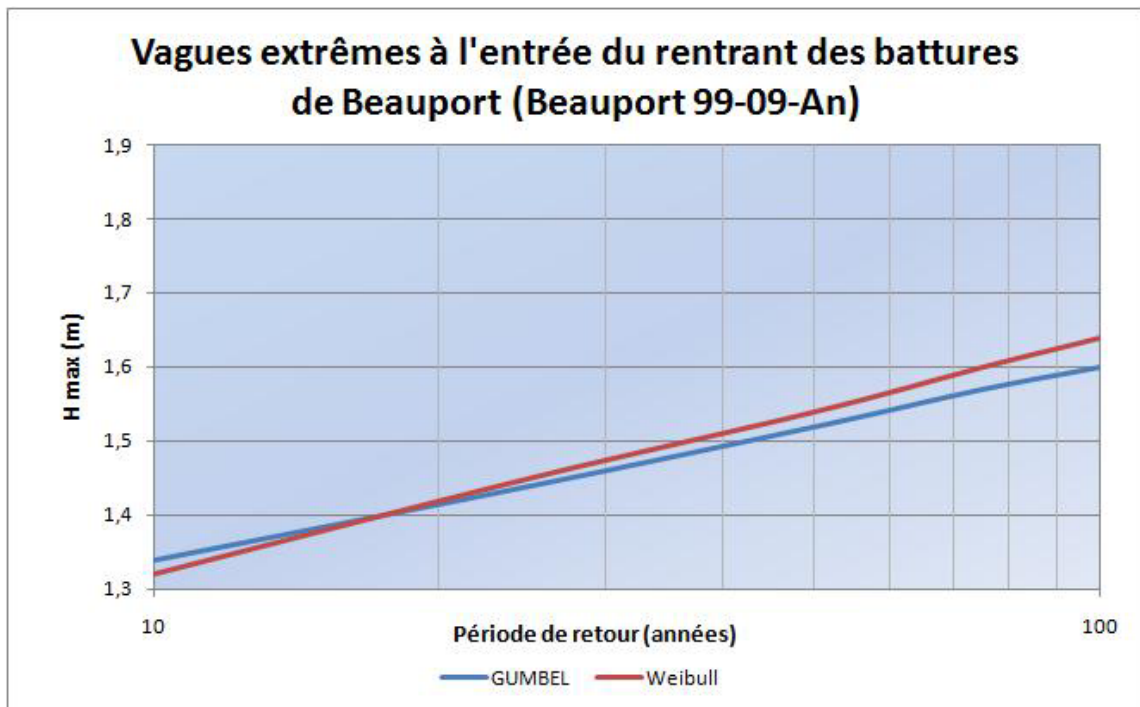


Figure 4.9 Prédiction Hs extrême devant la plage des battures de Beauport – Lauzon - F=1,1



**Figure 4.10 Prédiction Hs extrême devant la plage des battures de Beauport –
Beauport - F=1,1**



**Figure 4.11 Prédiction de Hs extrême à l'entrée du rentrant sud-ouest – Beauport
- F=1,1**

4.6 Recommandation concernant les vagues

L'étude de la hauteur des vagues au large a permis de fixer à environ 1,6 m la hauteur significative des vagues se produisant dans la baie de Beauport une fois tous les 35 à 50 ans (vie utile standard des ouvrages côtiers).

Les conditions retenues lors de la précédente analyse en 2007 étaient :

ENE 3,9 s $H_s = 0,76$ m

E 3,9 s $H_s = 0,71$ m

Ces vagues se produisent en gros une trentaine d'heures et une cinquantaine d'heures par année respectivement et semblent représentatives des conditions hydrodynamiques qui feraient évoluer la plage des battures de Beauport, surtout dans le cadre d'une comparaison entre les conditions actuelles et les conditions futures.

Il faudrait disposer d'enregistrements de vagues sur de longues périodes pour pouvoir confirmer cet ordre de grandeur des hauteurs de vagues se produisant dans la baie de Beauport.

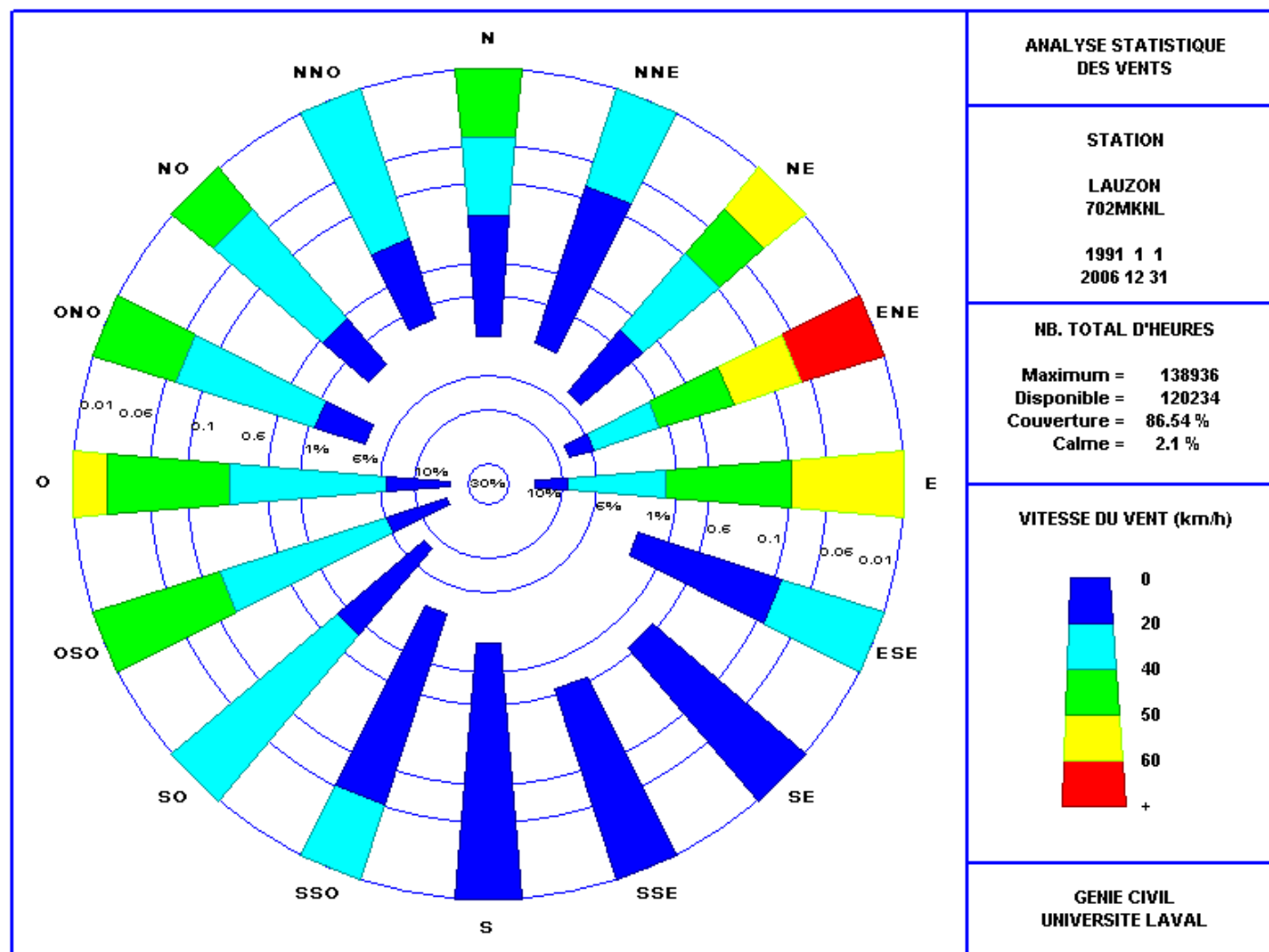
Yann Ropars, ing., M.Sc.

ANNEXE A

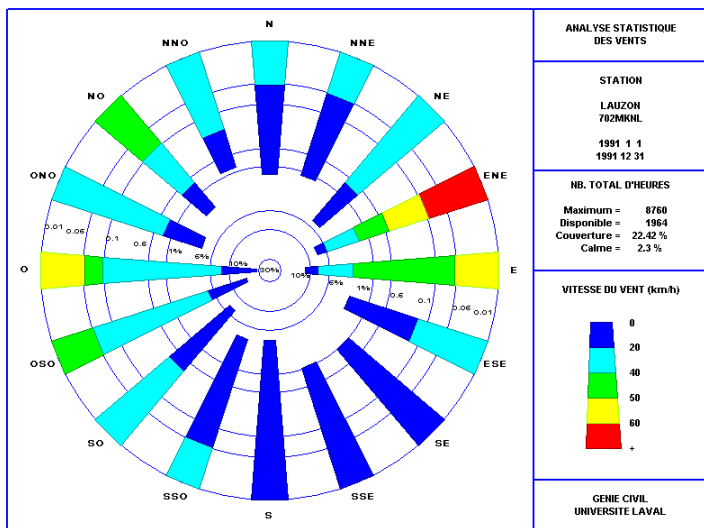
Vents de la station météorologique de LAUZON

1991 à 2006

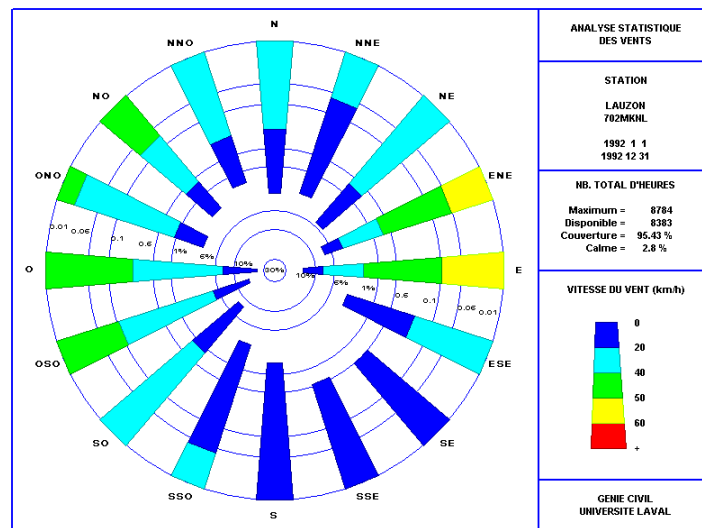
Roses des vents



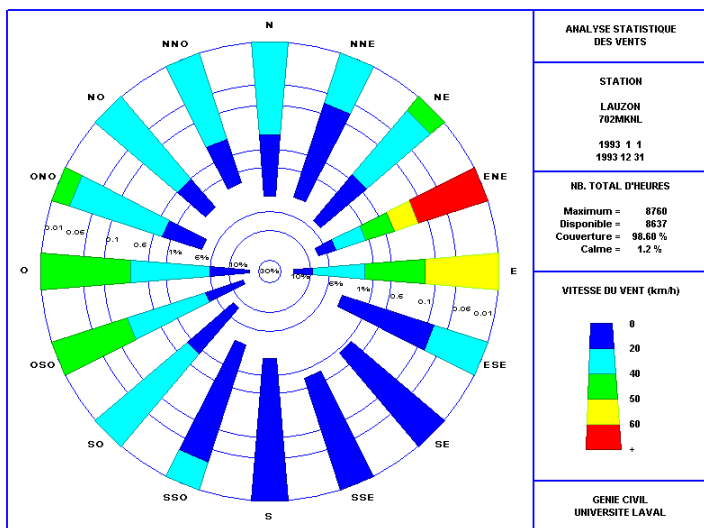
LAUZON 1991-2006



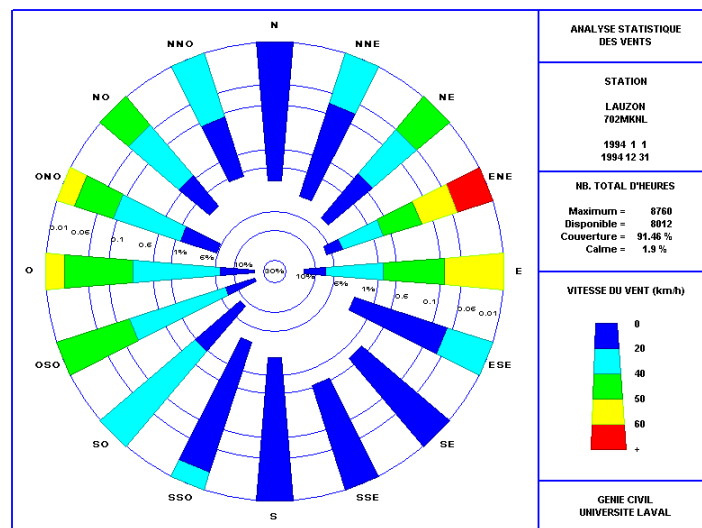
1991



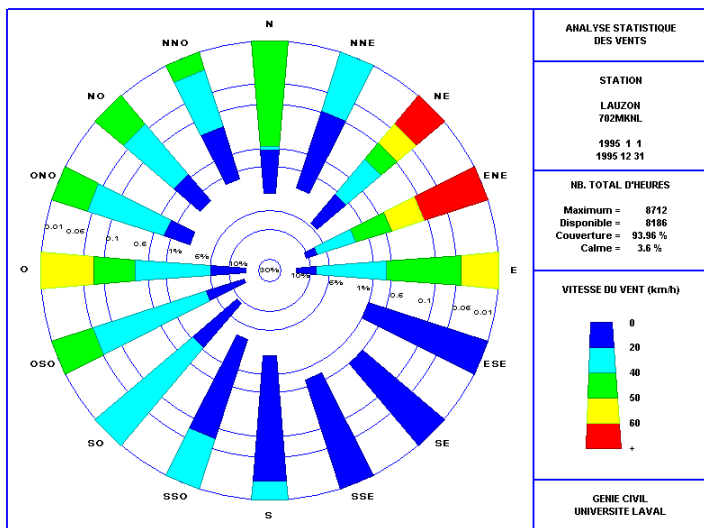
1992



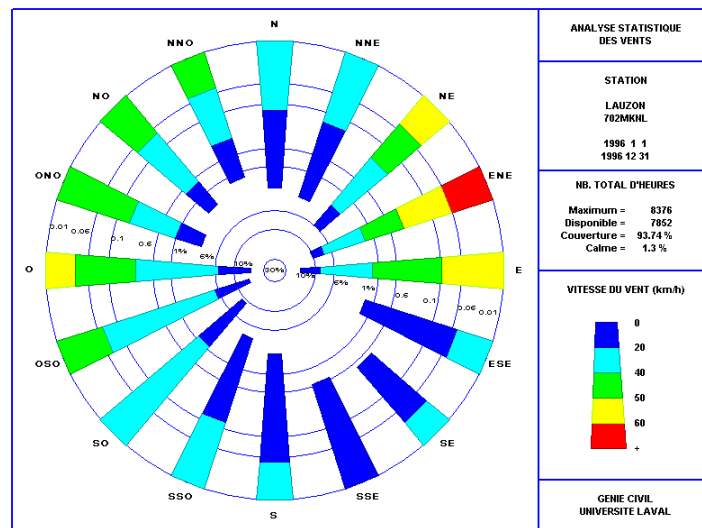
1993



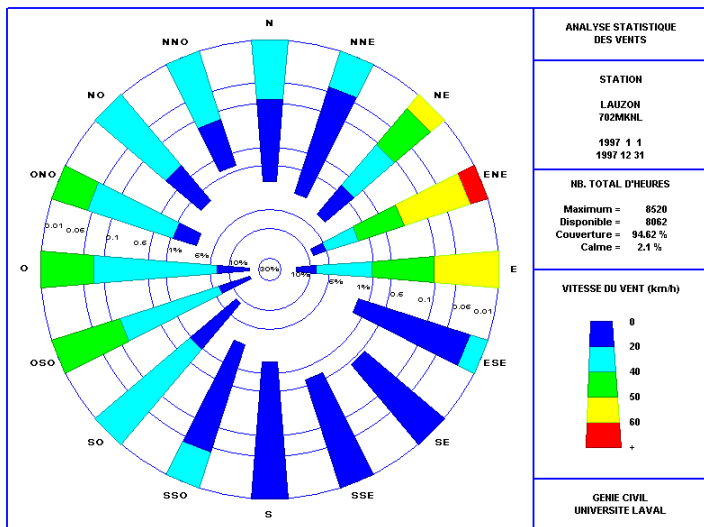
1994



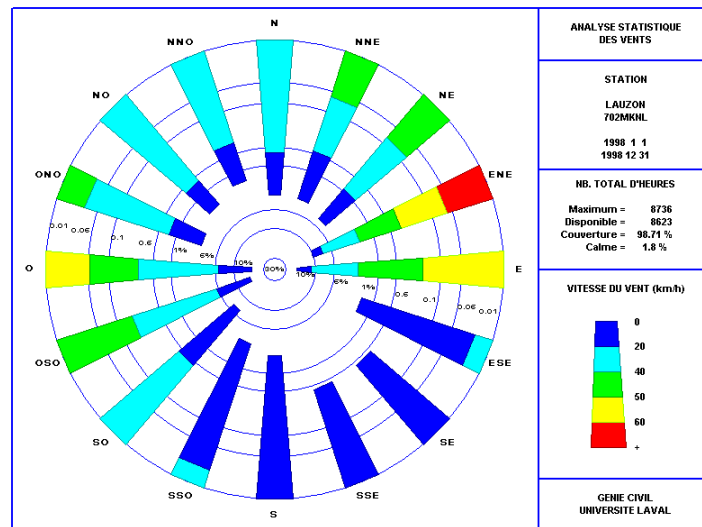
1995



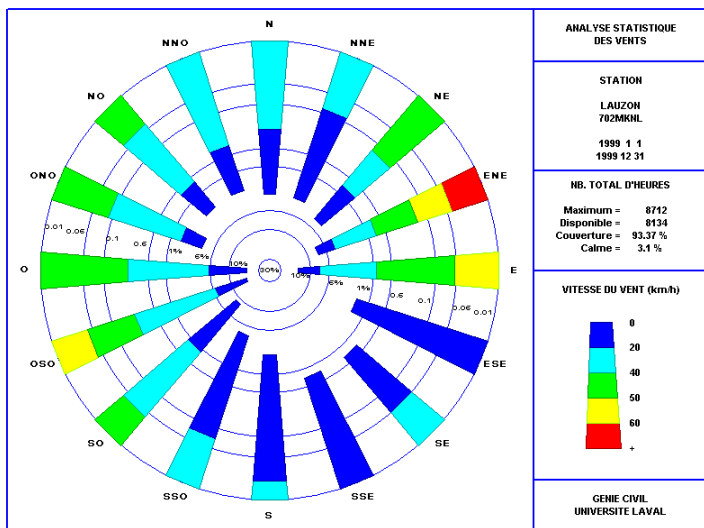
1996



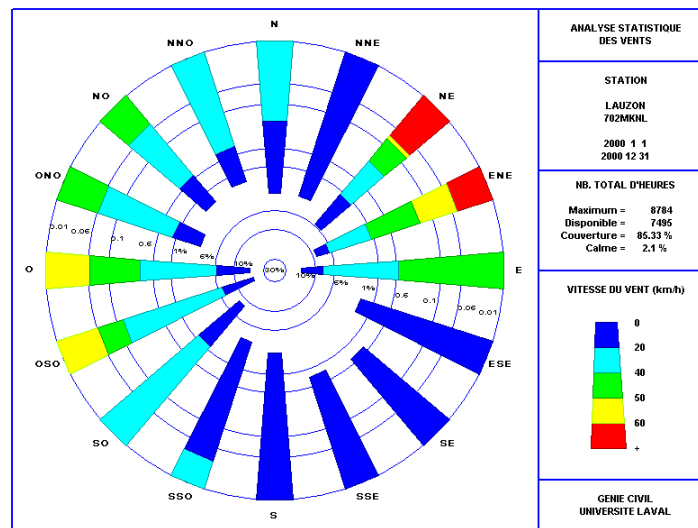
1997



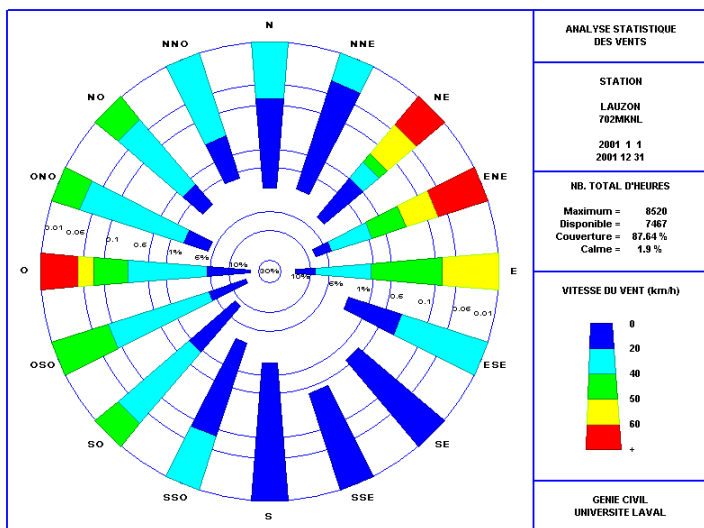
1998



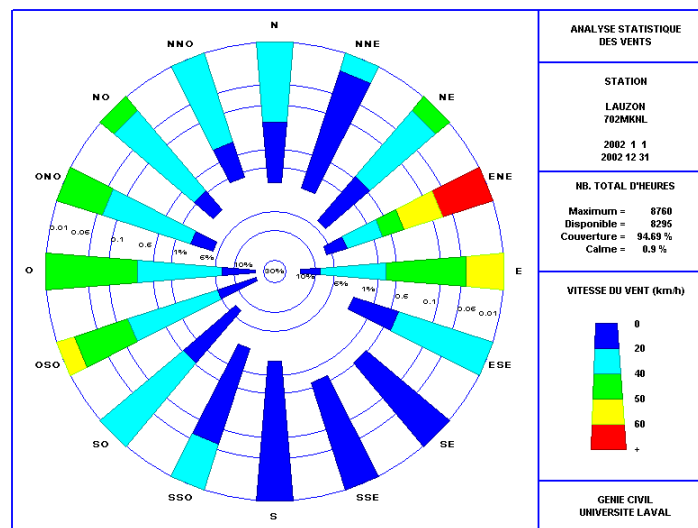
1999



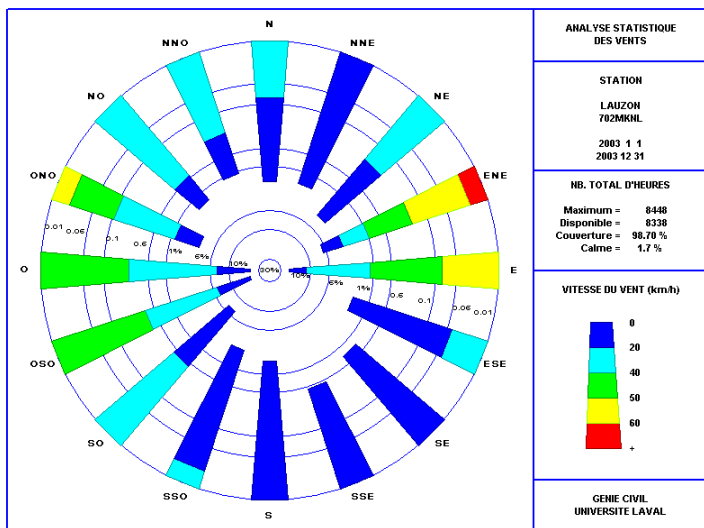
2000



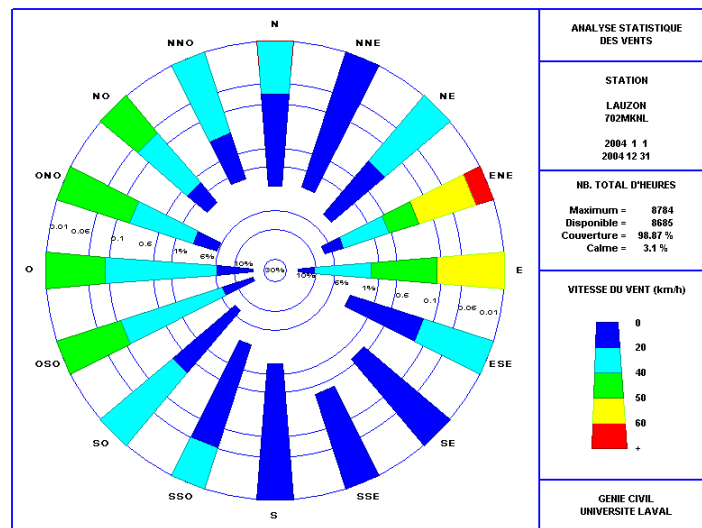
2001



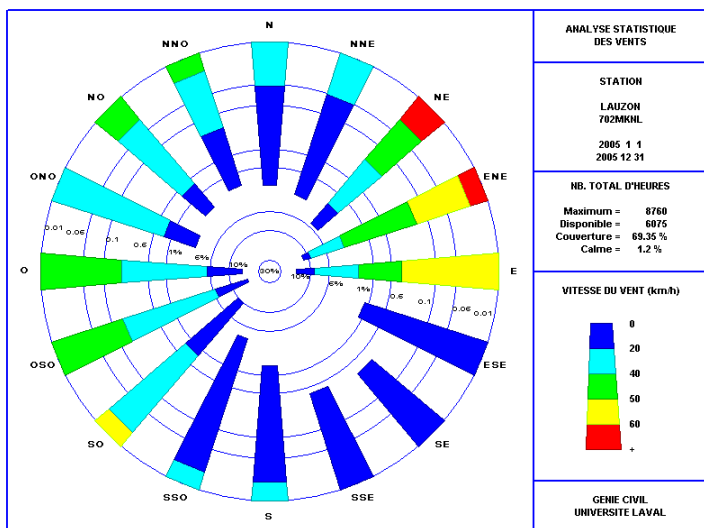
2002



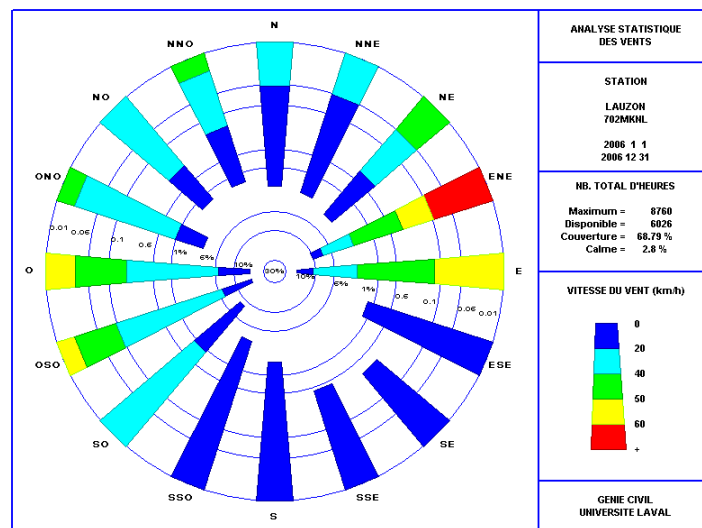
2003



2004



2005



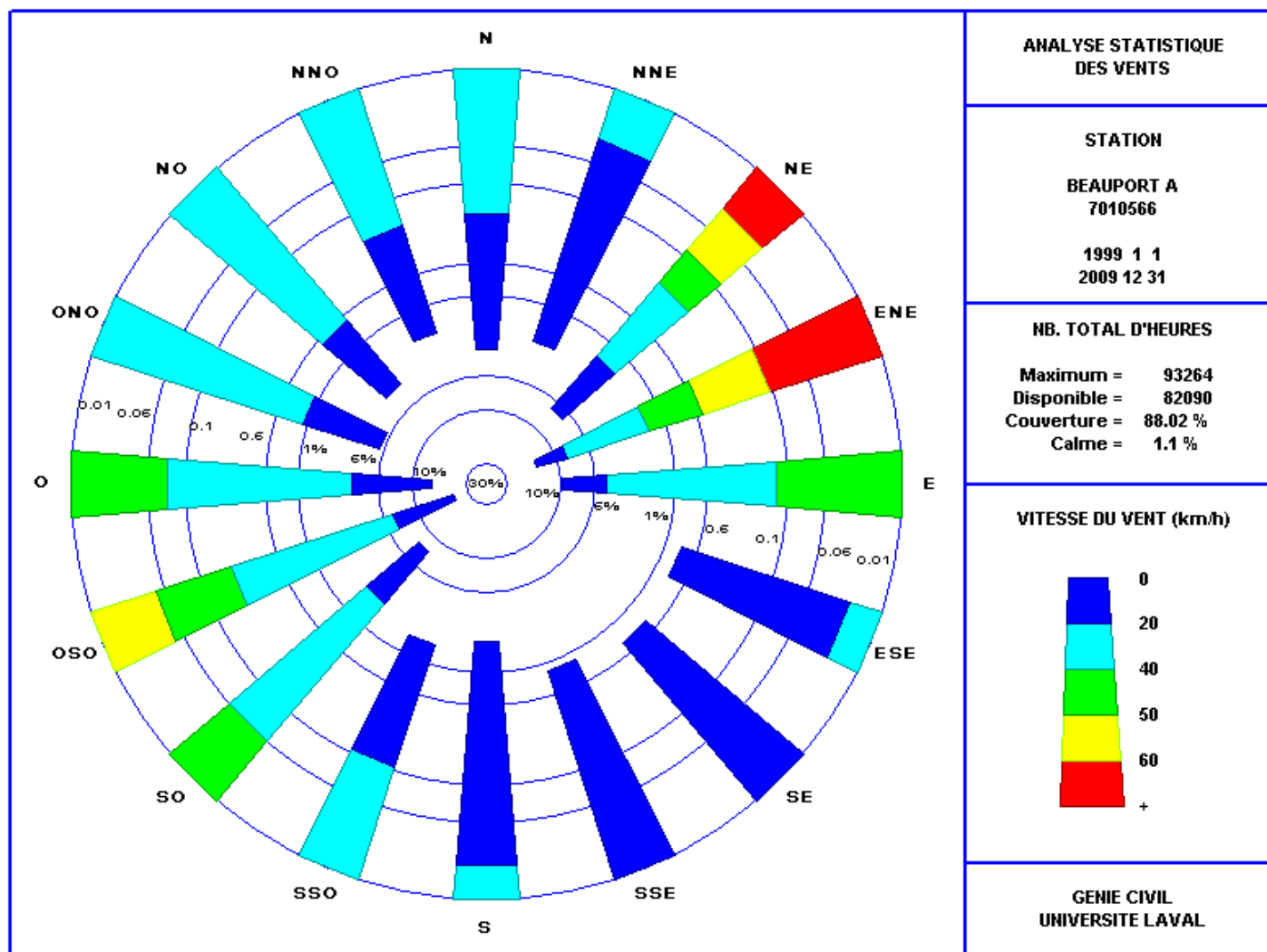
2006

ANNEXE B

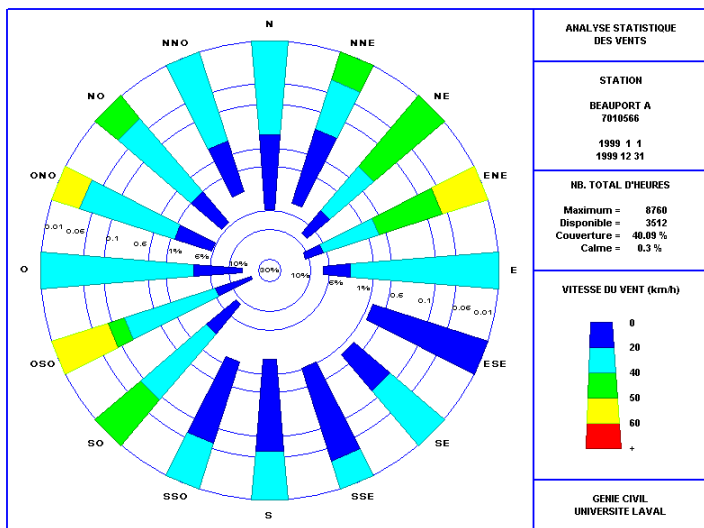
Vents de la station météorologique de BEAUPORT

1999 à 2009

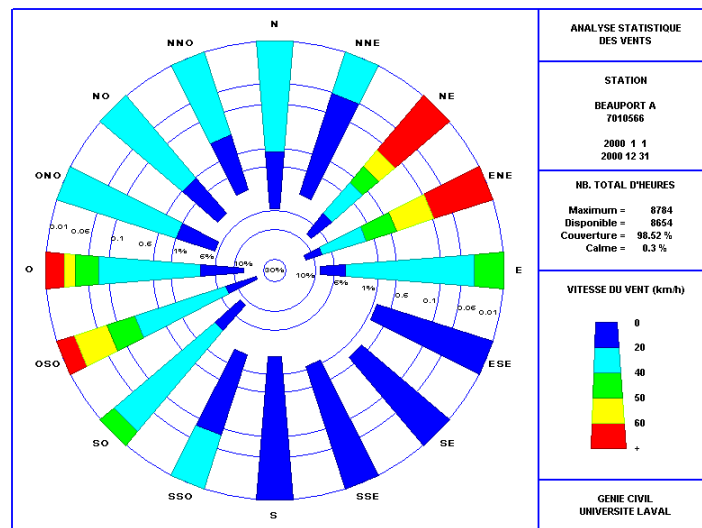
Roses des vents



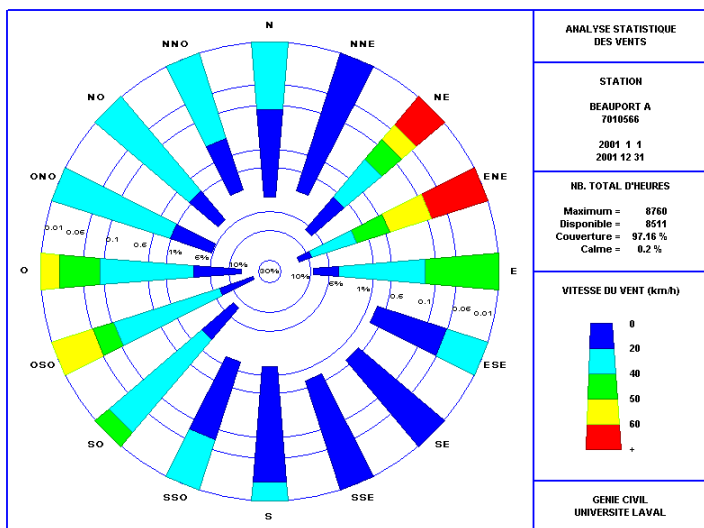
BEAUPORT 1999-2009



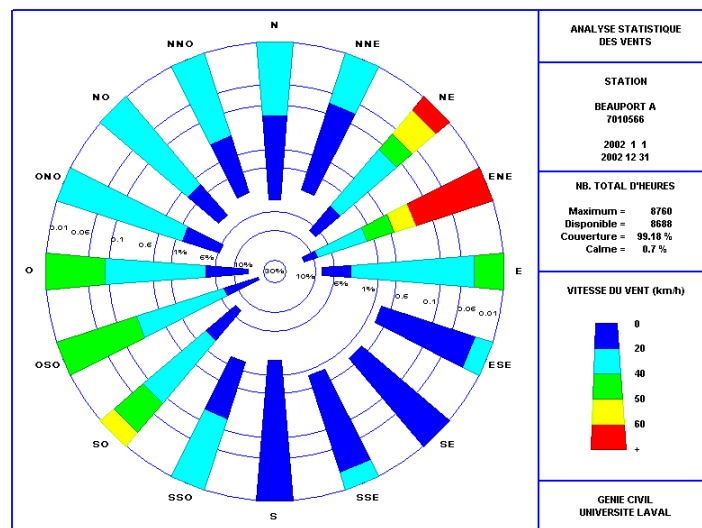
1999



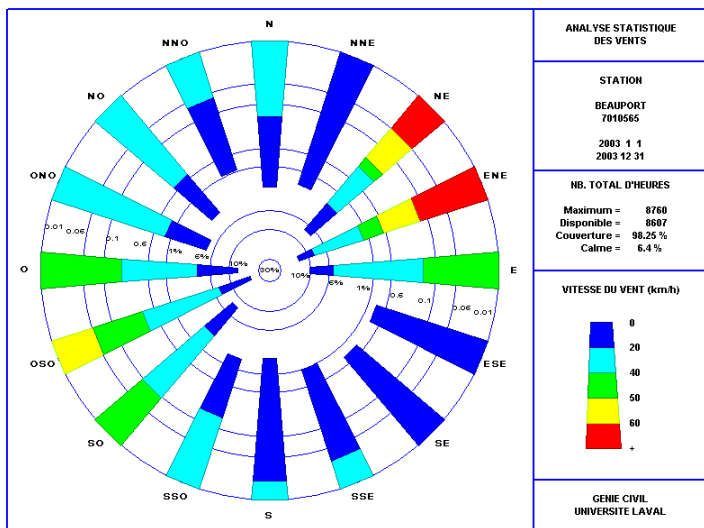
2000



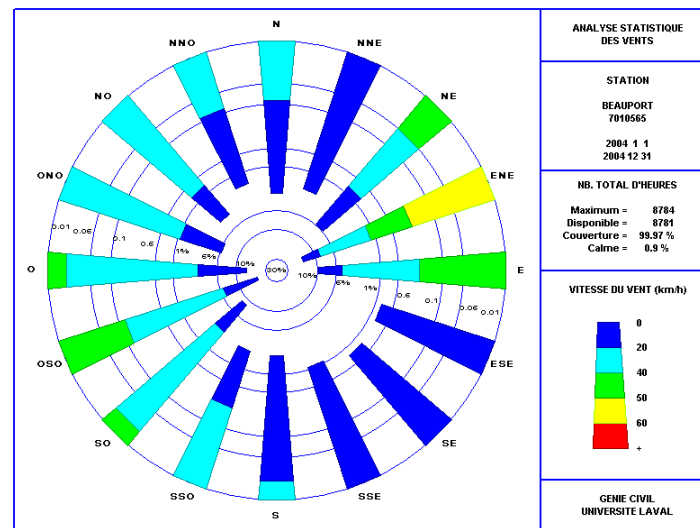
2001



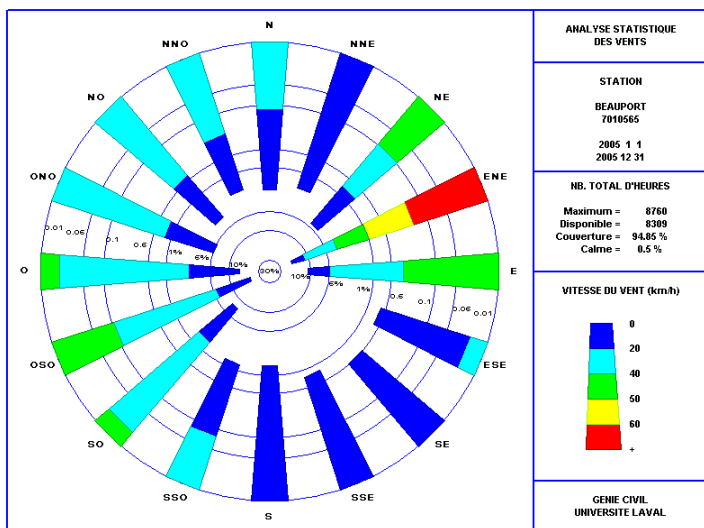
2002



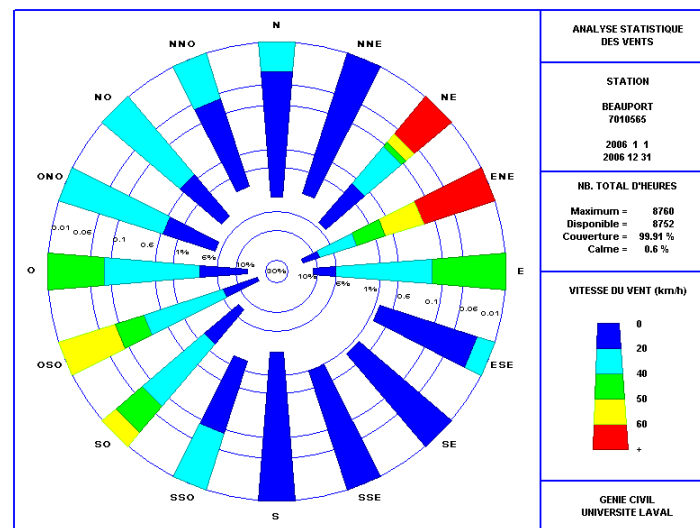
2003



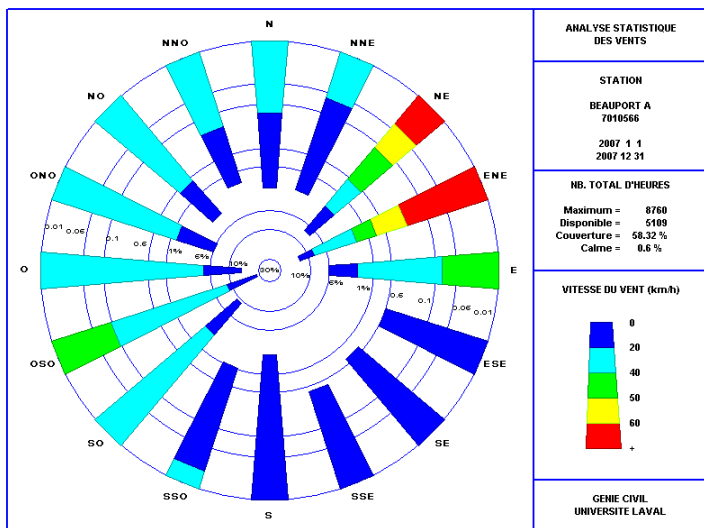
2004



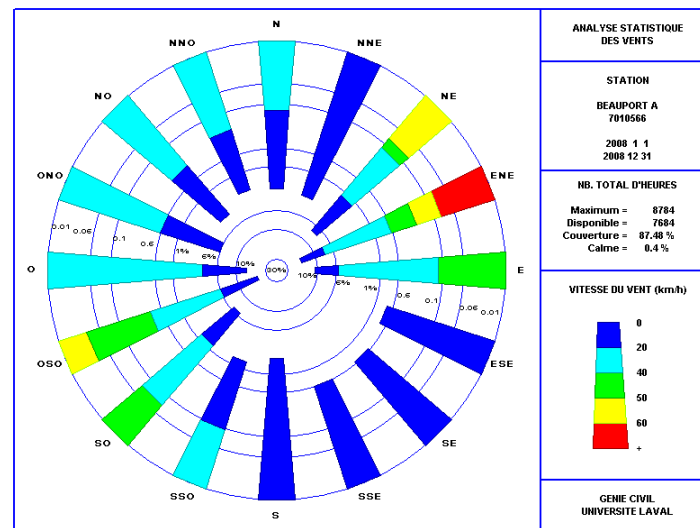
2005



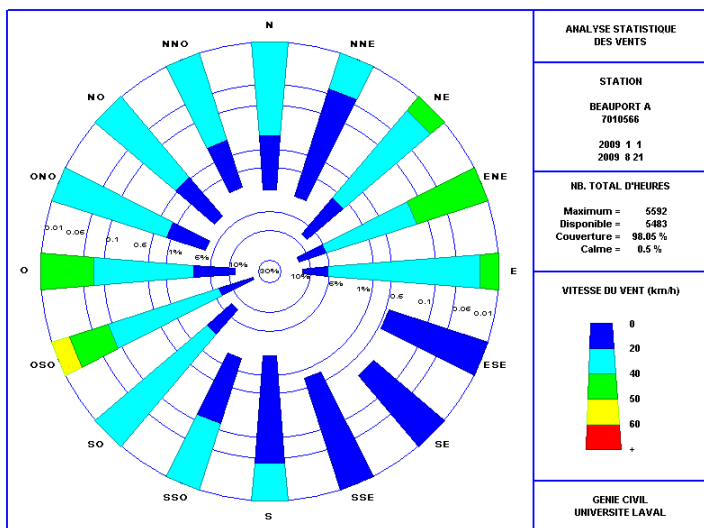
2006



2007



2008



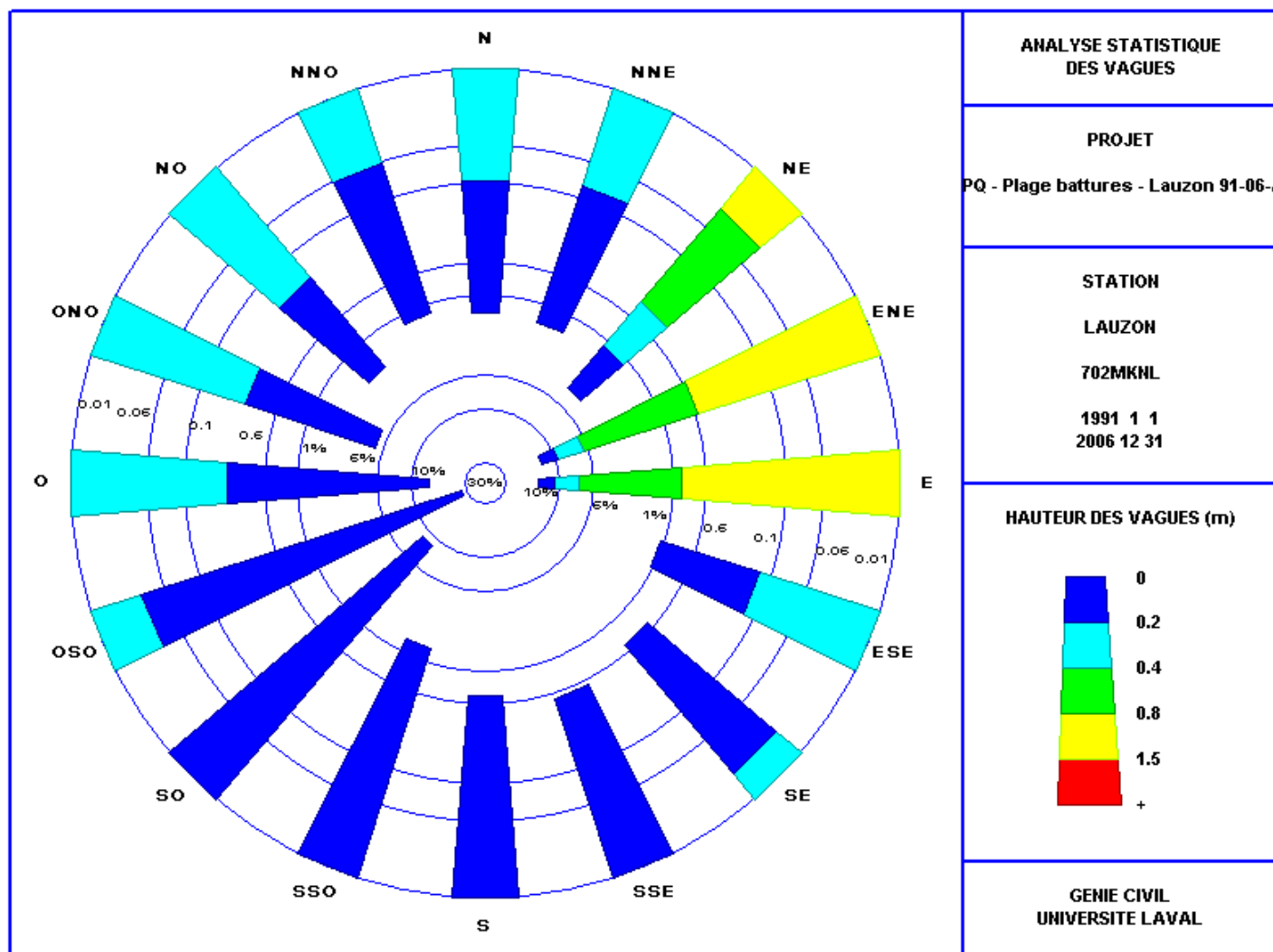
2009

ANNEXE C

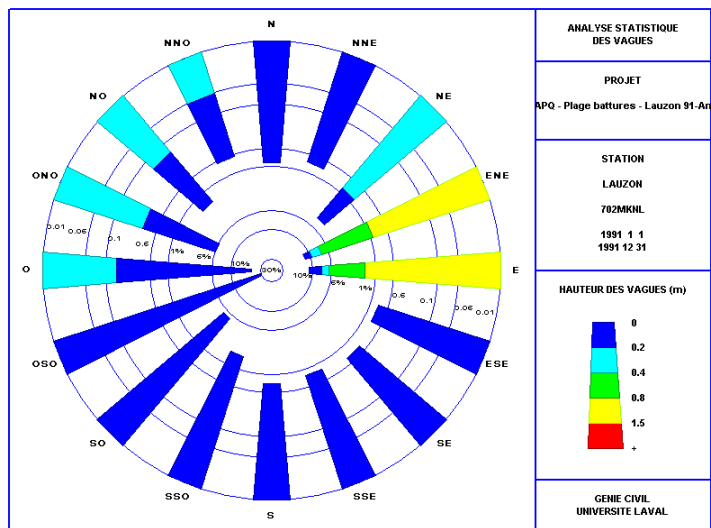
Vagues prédites devant la plage de Beauport
à partir des vents de la station météorologique de LAUZON

1991 à 2006

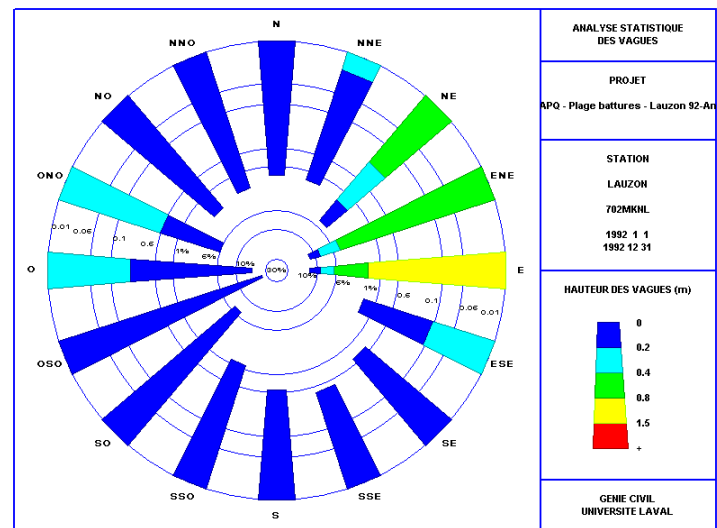
Roses des vagues



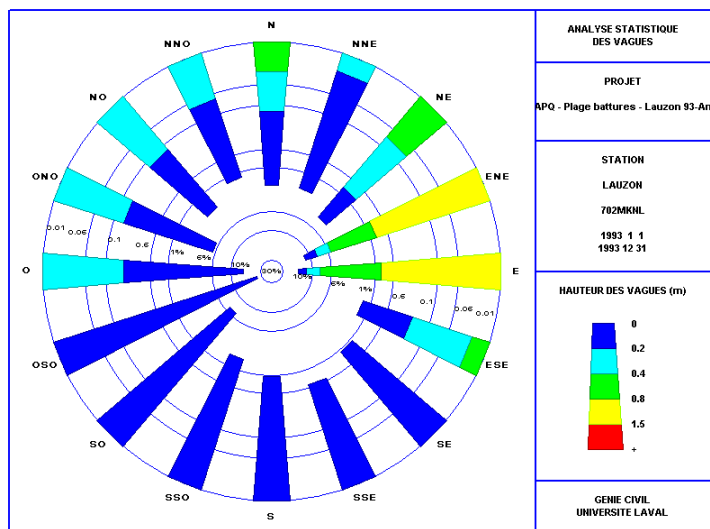
LAUZON 1991-2006



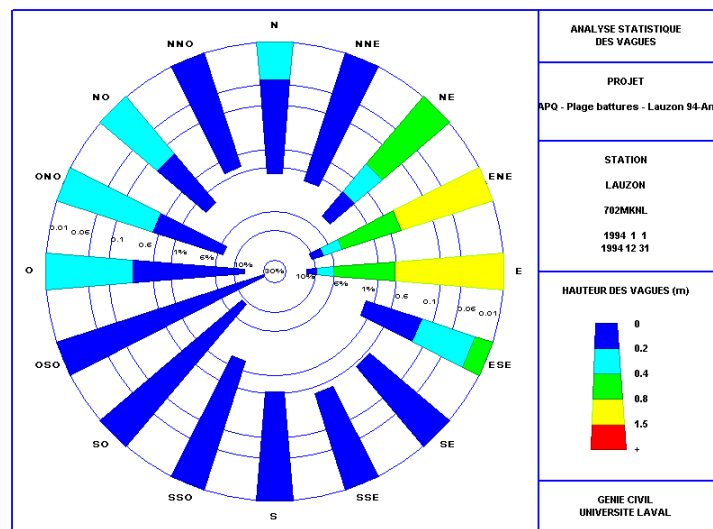
1991



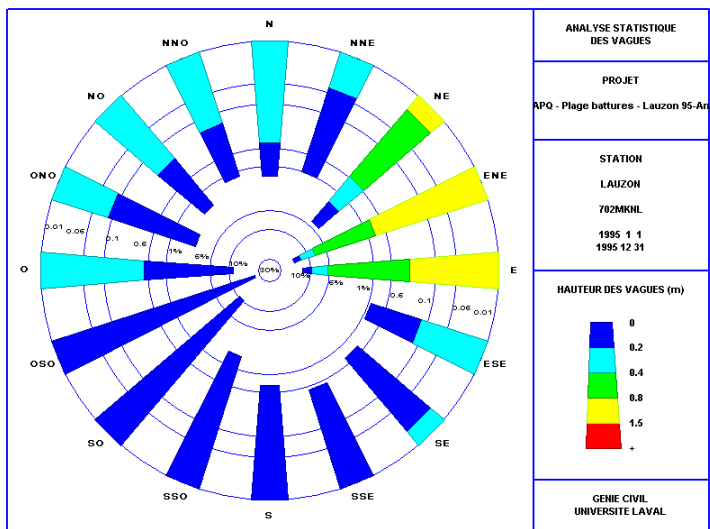
1992



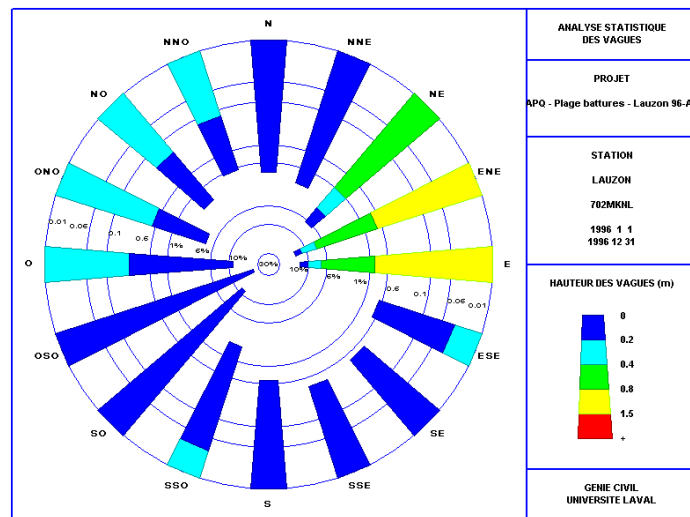
1993



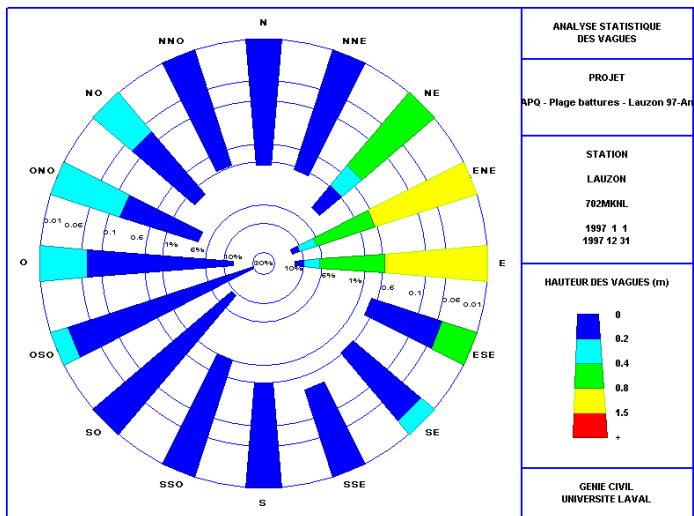
1994



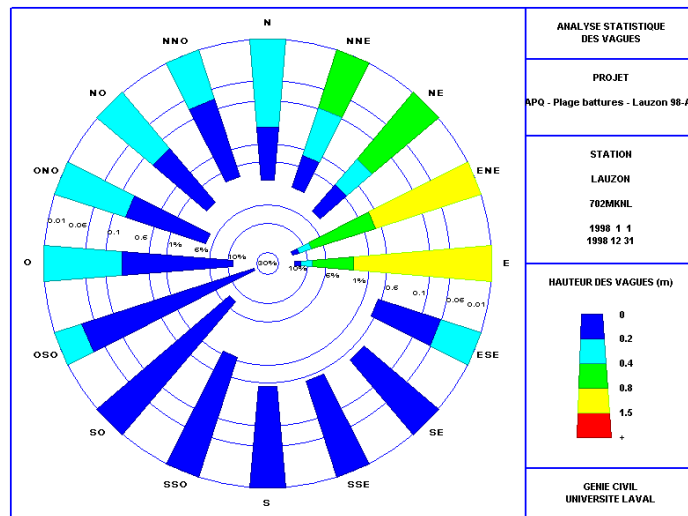
1995



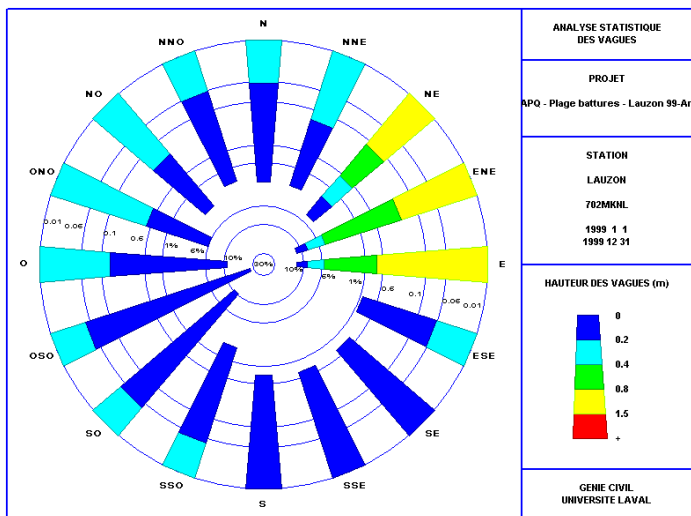
1996



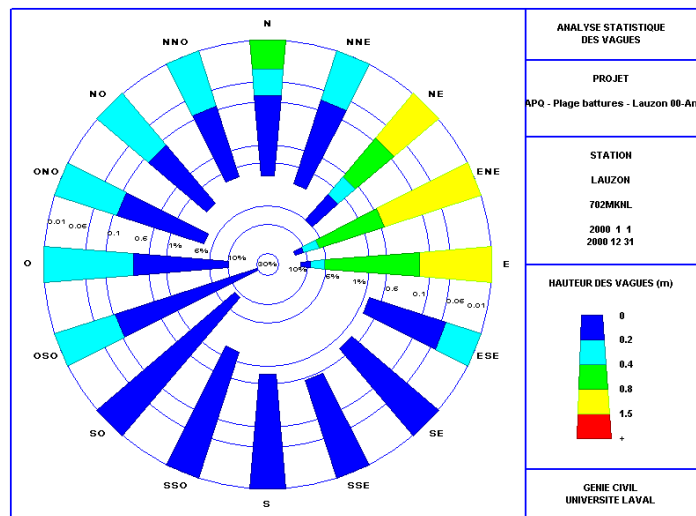
1997



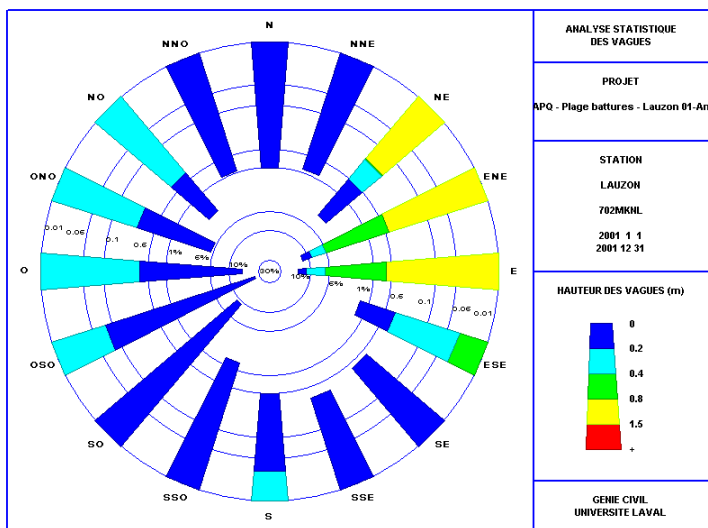
1998



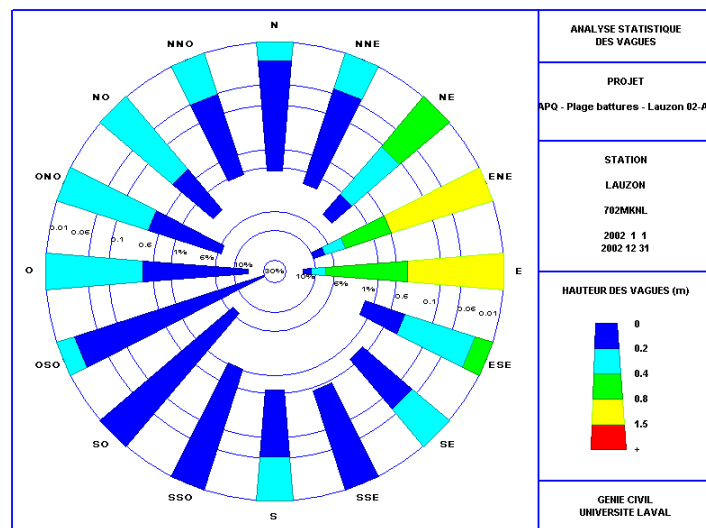
1999



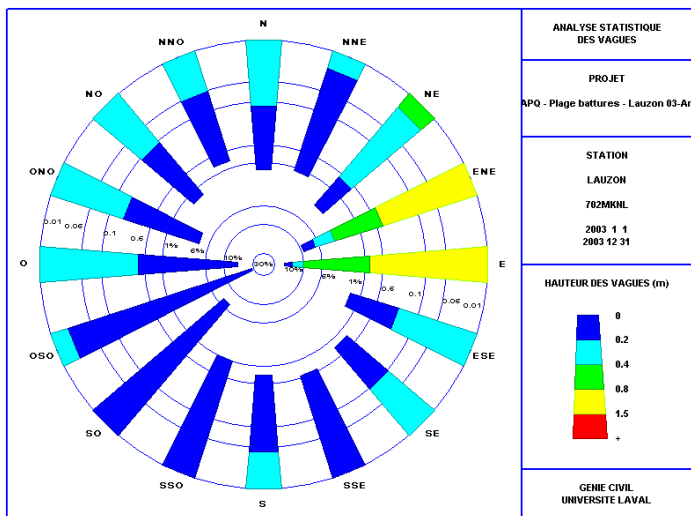
2000



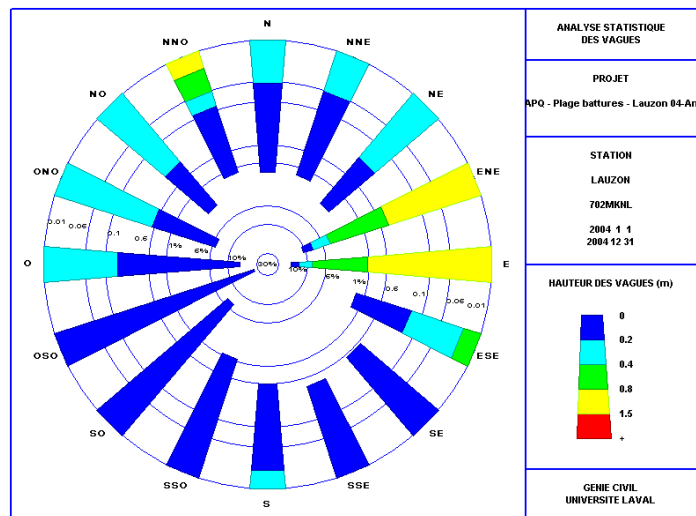
2001



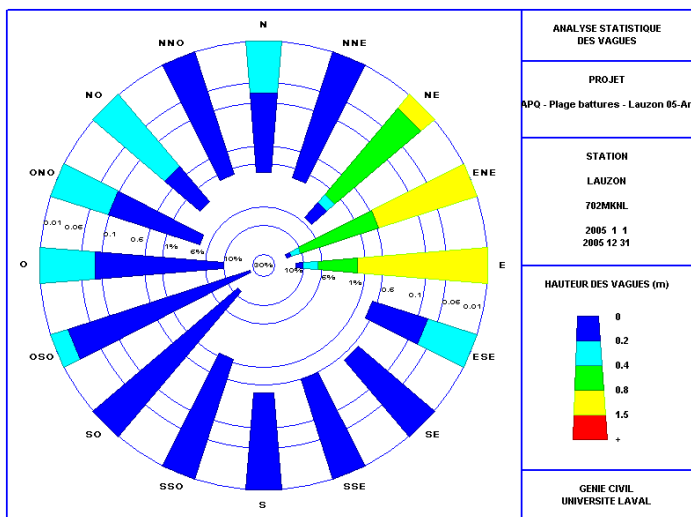
2002



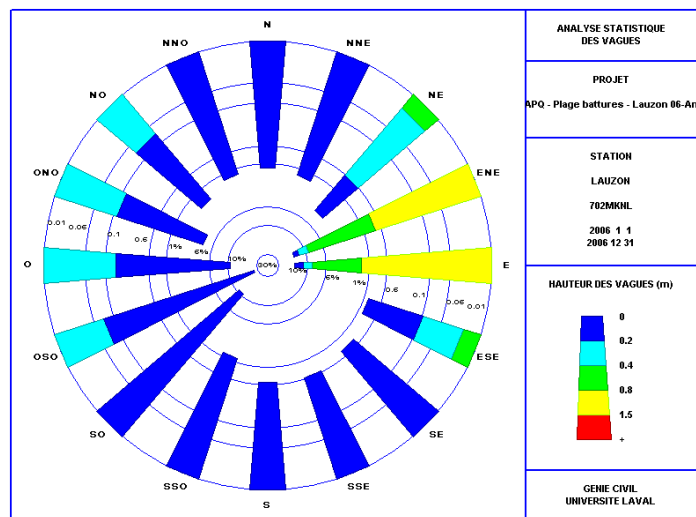
2003



2004



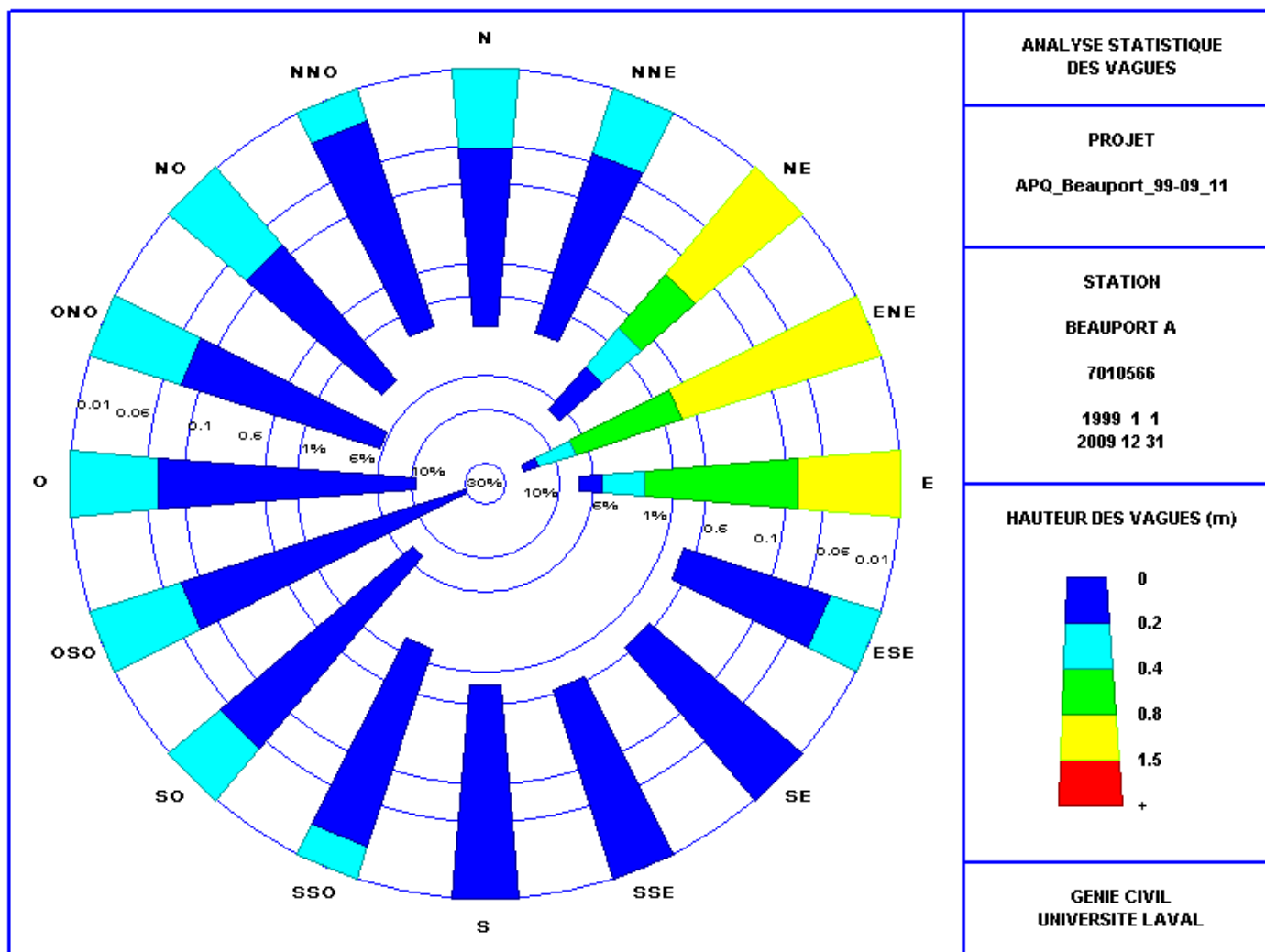
2005



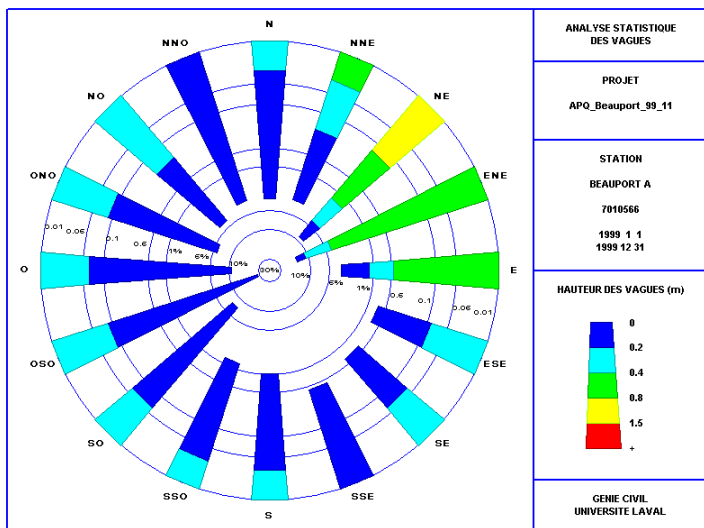
2006

ANNEXE D

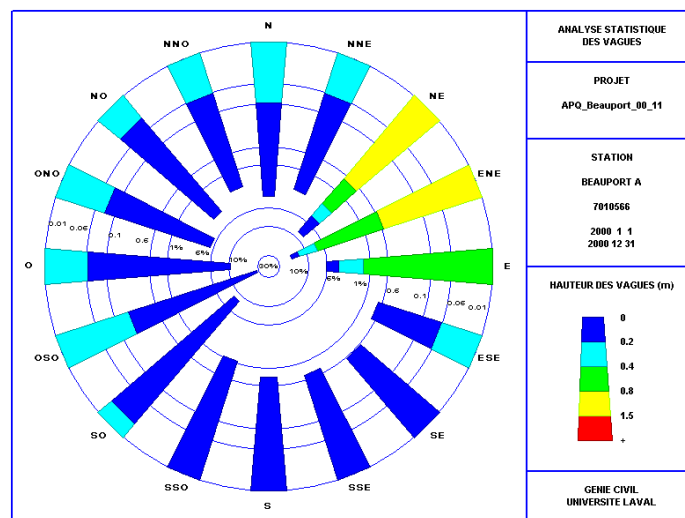
Vagues prédites devant la plage de Beauport
à partir des vents de la station météorologique de BEAUPORT
1999 à 2009
Roses des vagues



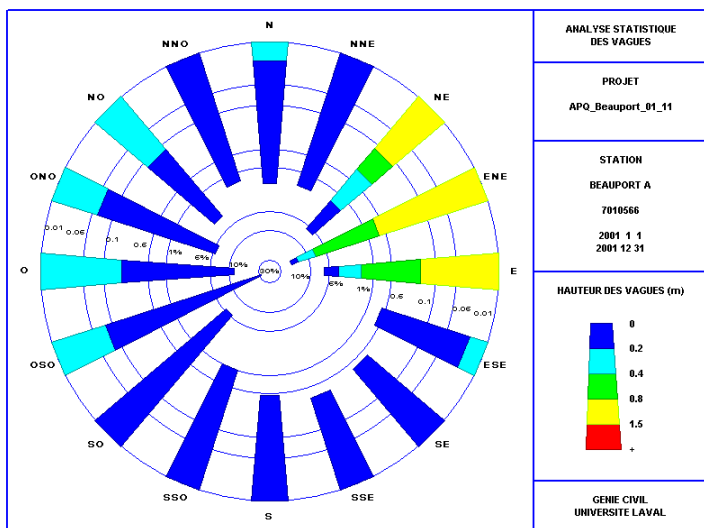
BEAUPORT 1999-2009



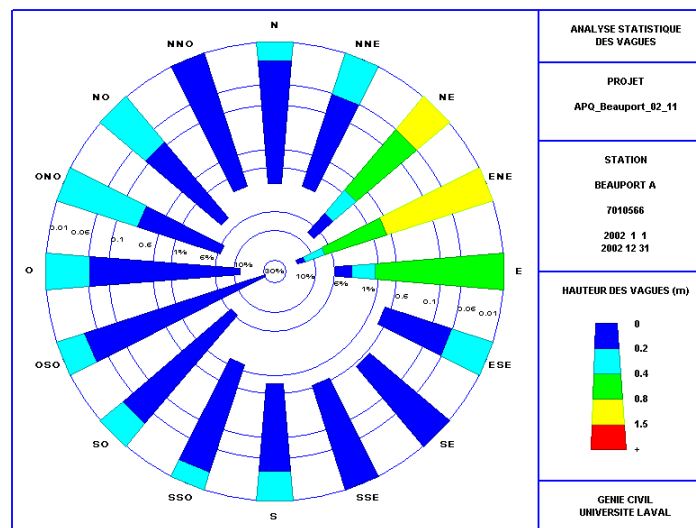
1999



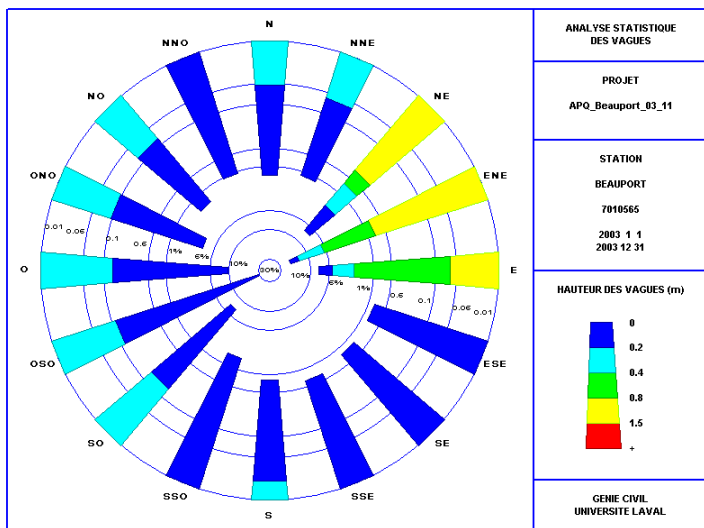
2000



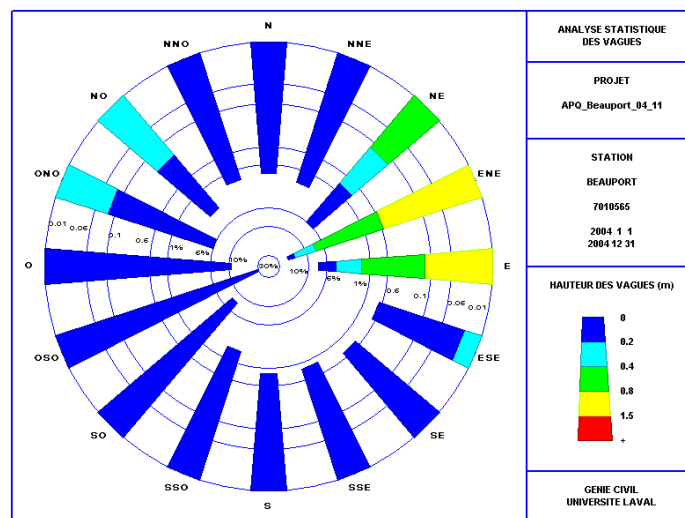
2001



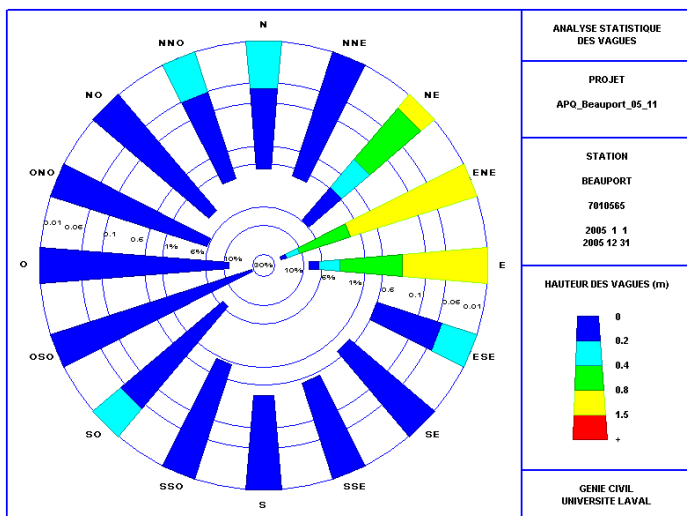
2002



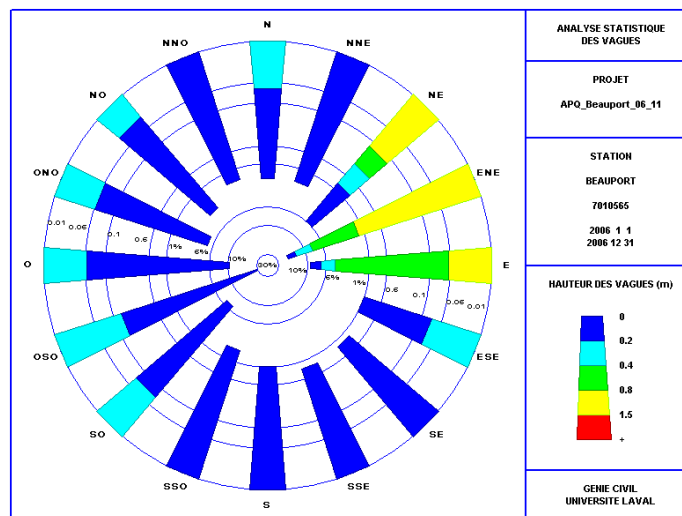
2003



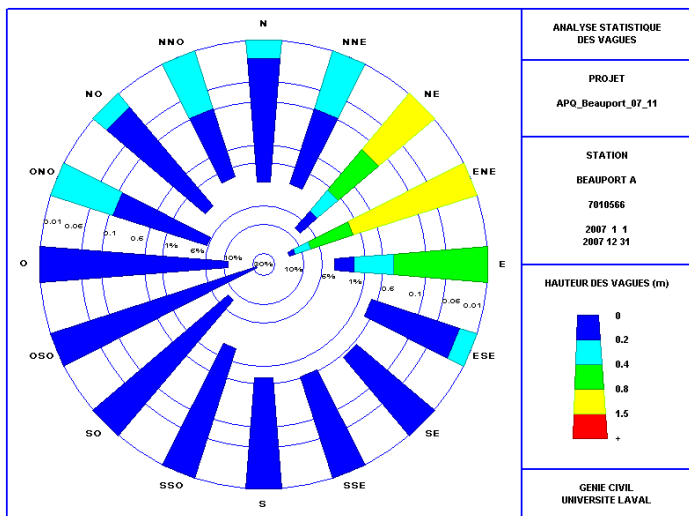
2004



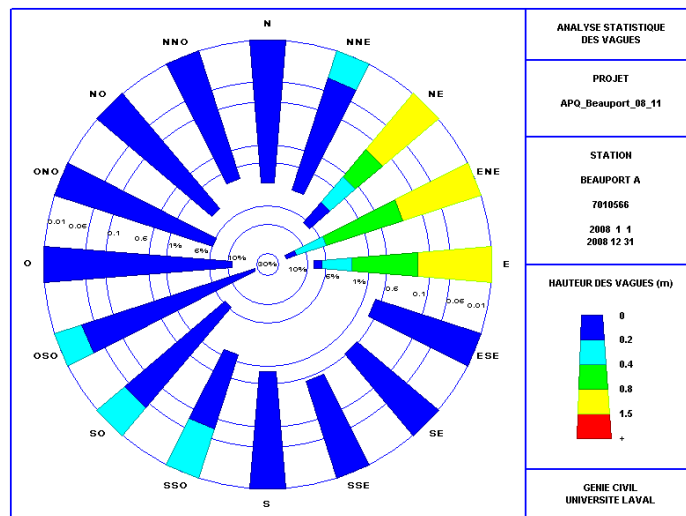
2005



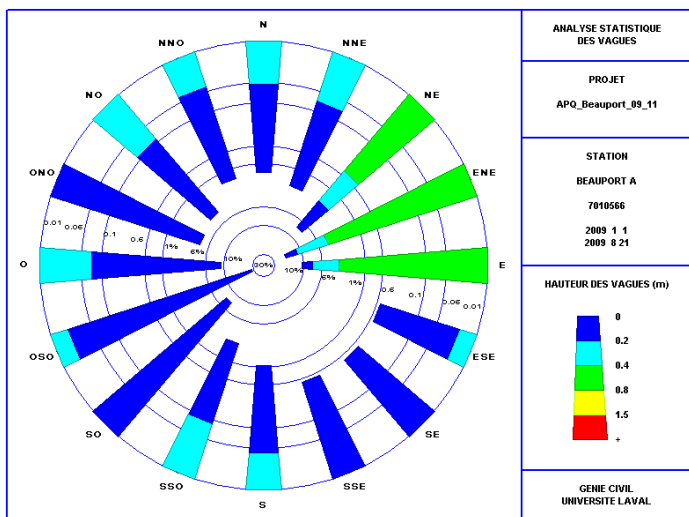
2006



2007



2008



2009