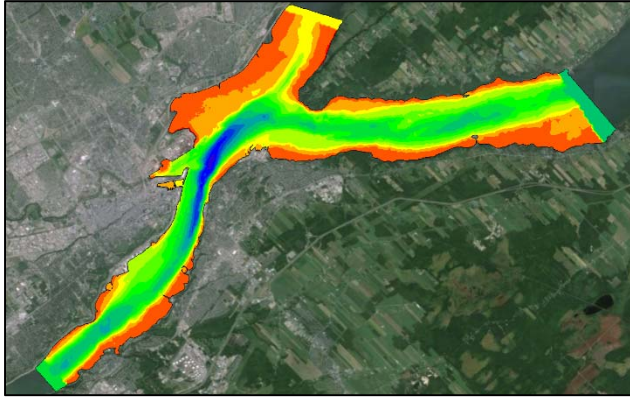


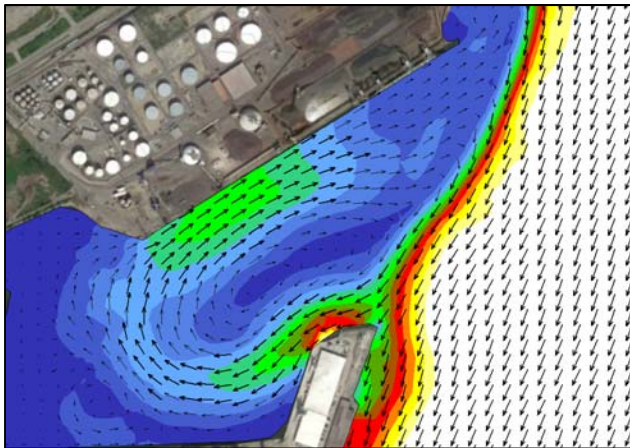


**PORT DE QUÉBEC
PROJET D'AMÉNAGEMENT D'UN QUAI
MULTIFONCTIONNEL EN EAU PROFONDE
SECTEUR BEAUPORT**

**VALIDATION DES HYPOTHÈSES DE
MODÉLISATION 2D**

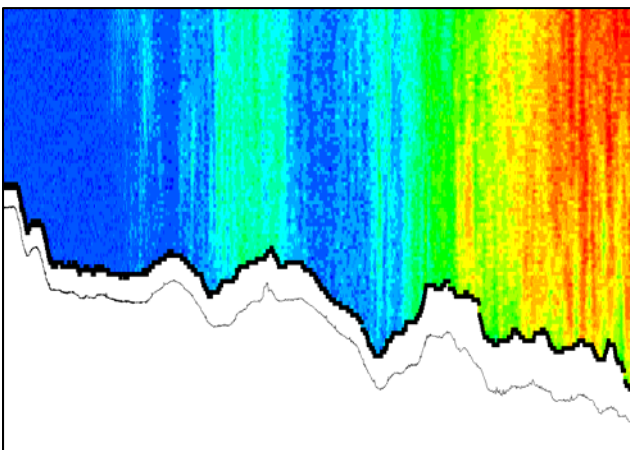
**VOLUME 2 : BAIE DE BEAUPORT ET
ESTUAIRE DE LA RIVIÈRE SAINT-CHARLES**

RAPPORT 0089 (VOL. 2)



Préparé pour :

Administration portuaire de Québec



12 septembre 2016

**PORT DE QUÉBEC – PROJET D’AMÉNAGEMENT D’UN QUAI
MULTIFONCTIONNEL EN EAU PROFONDE – SECTEUR BEAUPORT
VALIDATION DES HYPOTHÈSES DE MODÉLISATION 2D**
Volume 2 – Baie de Beauport et estuaire de la rivière Saint-Charles

RAPPORT TECHNIQUE

R.0089 (Vol. 2)

Préparé pour:

Administration portuaire de Québec
Québec

Préparé par:

Lasalle | NHC
Québec

12 septembre 2016

Préparé par:

<Originale signée par>

<Originale signée par>

Marc Villeneuve, ing., M. ing. OIQ 46139

Nicolas Gallant, ing. Jr., M. ing. OIQ 5047189

Président Lasalle|NHC

Ingénieur junior Lasalle|NHC

CLAUSE DE LIMITATION DE RESPONSABILITÉ.

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

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

TABLE DES MATIÈRES

1. INTRODUCTION	1
2. ANALYSE DES MESURES DE TERRAIN	2
2.1 Méthodologie	2
2.2 Analyse des résultats	4
2.2.1 Baie de Beauport	4
2.2.2 Estuaire Saint-Charles.....	5
3. VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE BIDIMENSIONNEL	6
3.1 Description sommaire du modèle numérique	6
3.2 Validation des niveaux d'eau.....	8
3.3 Validation des courants	9
3.3.1 Baie de Beauport	9
3.3.2 Estuaire Saint-Charles.....	10
4. CONCLUSION	12

Annexe A – Analyse des mesures de terrain

Annexe B – Validation du modèle bidimensionnel

Annexe C - Validation du modèle bidimensionnel – Vues en plan

LISTE DES FIGURES

Figure 2.1: Position des relevés (transects) de vitesses à l'ADCP d'août 2016.....	2
Figure 2.2: Carte des vitesses relevées dans le profil ADCP (exemple)	3
Figure 2.3: Écart-type et moyenne des vitesses et des directions sur la verticale (exemple).....	3
Figure 2.4: Profils verticaux de la vitesse et de la direction des courants (exemple).....	4
Figure 3.1 : Emprise et bathymétrie du modèle numérique	7
Figure 3.2: Validation des niveaux d'eau du modèle numérique à la station Vieux-Québec.....	8

1. INTRODUCTION

L'Administration portuaire de Québec (APQ) poursuit actuellement son projet d'aménagement d'un quai multifonctionnel en eau profonde dans le secteur Beauport, qui implique notamment la mise en place de deux nouveaux postes à quai.

Au cours des dernières années, Lasalle | NHC a réalisé plusieurs études portant sur l'impact hydraulique du nouveau projet et sur les conditions hydro-sédimentaires qui prévaudront le long de la plage bordant la nouvelle zone récréotouristique adossée aux installations portuaires. Ces études s'appuyaient sur l'utilisation de modèles numériques bidimensionnels supposant, en tout point de la zone d'étude, une vitesse d'écoulement intégrée sur la verticale (i.e. ne variant pas avec la profondeur). Cette hypothèse est courante pour la modélisation des écoulements qui ne sont pas stratifiés par des effets densimétriques et où les variations de la bathymétrie sont trop faibles pour induire des gradients de vitesse sur la verticale.

Suite au dépôt par l'APQ de ses études portant sur le nouvel aménagement, les diverses agences gouvernementales concernées par l'impact environnemental du projet ont posé des questions liées à la validité de l'hypothèse d'un écoulement bidimensionnel. En effet, Environnement et Changement climatique Canada (ECCC), Pêches et Océans Canada (MPO) et le Ministère du Développement durable, Environnement et Lutte contre les changements climatiques du Québec (MDDELCC) désiraient « connaître les risques de modifications des courants observés dans la colonne d'eau » et les écarts potentiels entre les « courants de surface et de fond ». Ces agences soulignaient que ces écarts pouvaient avoir leur importance, notamment pour évaluer l'impact du projet sur « les patrons d'utilisation des habitats par les poissons » et « la dynamique hydro-sédimentaire ».

Pour répondre à ces questions, l'APQ désire aujourd'hui confirmer la validité de cette hypothèse d'un écoulement bidimensionnel pour la zone à l'étude. Pour ce faire, l'APQ a mis à la disposition de Lasalle | NHC des relevés de vitesses effectués par la firme Englobe à l'aide d'un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) dans le secteur Beauport, en juin 2015 ainsi qu'en août 2016. Le présent rapport porte sur l'analyse des relevés les plus récents, qui ont été effectués dans la baie de Beauport et l'estuaire de la rivière Saint-Charles. Les relevés de juin 2015, effectués au large du quai 53 et de la pointe de Beauport, ont déjà été présentés dans le Volume 1 de ce rapport.

Les résultats de l'analyse des relevés de 2016 sont présentés dans deux sections. La section 2 traite d'abord de la variabilité de la vitesse et de la direction de l'écoulement sur l'axe vertical, en présentant une analyse détaillée des courants relevés à l'ADCP. La section 3 utilise ensuite ces données de courantométrie en vue de valider les résultats fournis par le modèle numérique 2D.

2. ANALYSE DES MESURES DE TERRAIN

2.1 Méthodologie

Les relevés de vitesses à l'ADCP effectués durant la campagne de mesure d'août 2016 ont été analysés afin de caractériser la variabilité de la vitesse et de la direction des courants en fonction de la profondeur. Les profils relevés le long de circuits rectangulaires dans la baie de Beauport (près du rentrant sud-ouest) et dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles ont d'abord été divisés en quatre transects (T1 à T4), et ce pour chacun des deux sites (figure 2.1). Conformément aux données fournies, l'analyse a été effectuée pour deux états de la marée, soit le flot et le jusant¹.

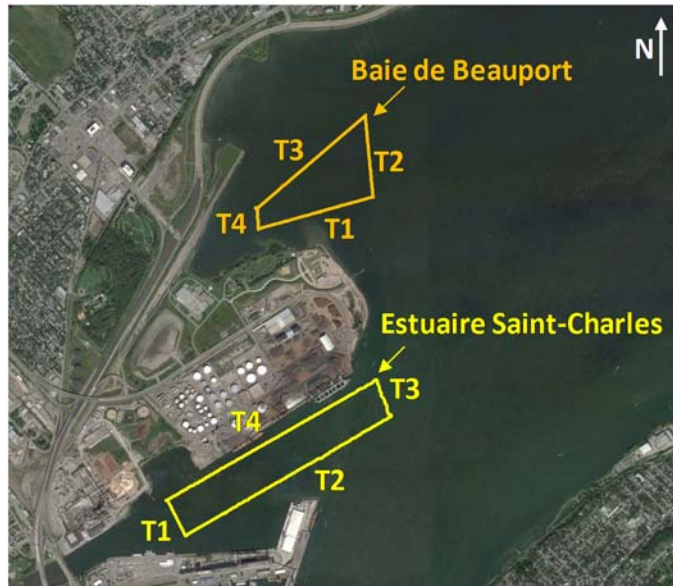


Figure 2.1: Position des relevés (transects) de vitesses à l'ADCP d'août 2016

L'analyse détaillée des mesures de terrain est présentée aux figures de l'annexe A. La documentation des vitesses dans quatre transects pour deux états de la marée conduit à un total de 8 figures par secteur (16 figures au total). Sur chacune des figures, la variabilité verticale de la vitesse et de la direction des courants est analysée de trois façons :

- Carte couleur des vitesses du profil (transect) relevé à l'ADCP ;
- Écarts-type des vitesses et des directions des courants obtenus sur la verticale le long du profil ADCP, comparés à la vitesse et la direction moyennes, aussi calculées sur l'axe vertical ;
- Deux profils verticaux de la vitesse et de la direction des courants obtenus à chacune des extrémités du transect considéré.

¹ Le *flot* est un terme maritime qualifiant la période pendant laquelle la marée est montante. Le *jusant* correspond plutôt à la période pendant laquelle la marée est descendante. Le courant de marée généré par la marée montante est appelé le courant de *flot*. Le courant de *jusant* est le courant créé par la marée descendante.

Les figures 2.2 à 2.4 présentent un exemple de chacun de ces types de résultats pour les mesures effectuées au flot, dans le transect 2 (T2) de l'estuaire de la Saint-Charles.

Il est à noter que pour l'ensemble de ces résultats, les vitesses sont considérées en valeurs absolues, c'est-à-dire qu'elles sont toujours positives indépendamment de la direction de l'écoulement. Notons également que seules les vitesses horizontales (x,y) fournies par l'ADCP sont considérées dans l'analyse, les vitesses verticales (en z) étant négligeables.

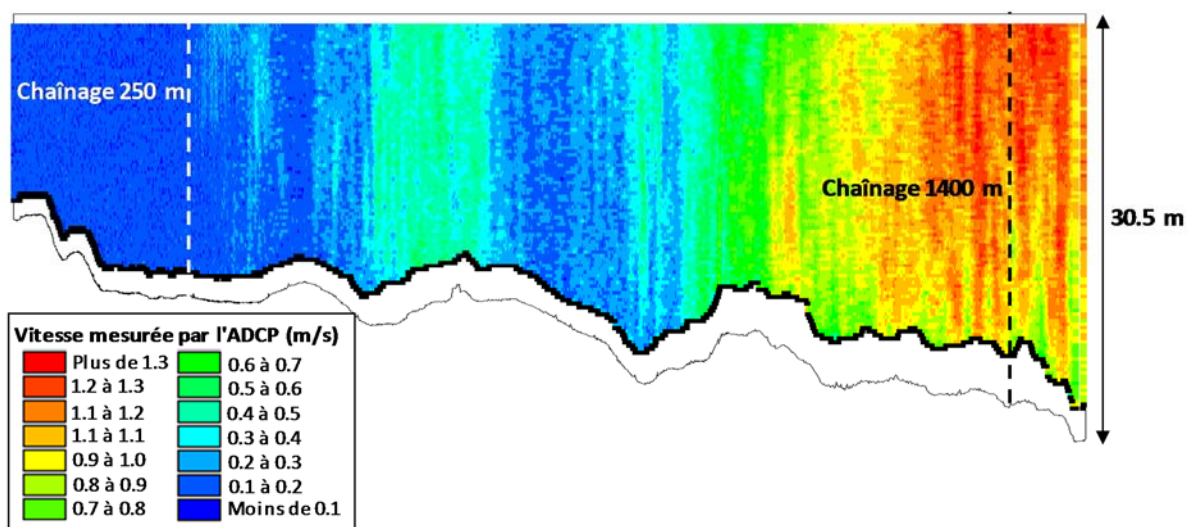


Figure 2.2: Carte des vitesses relevées dans le profil ADCP (exemple)
Courants de marée au flot – Estuaire de la Saint-Charles - Transect 2

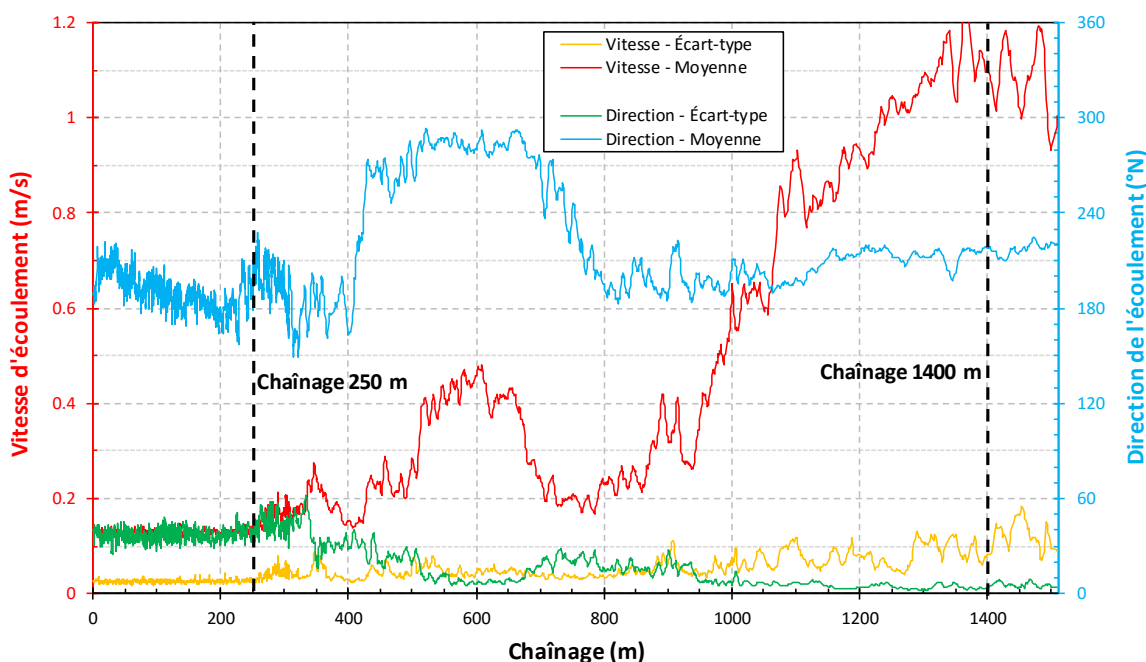


Figure 2.3: Écart-type et moyennes des vitesses et des directions sur la verticale (exemple)
Courants de marée au flot – Estuaire de la Saint-Charles - Transect 2

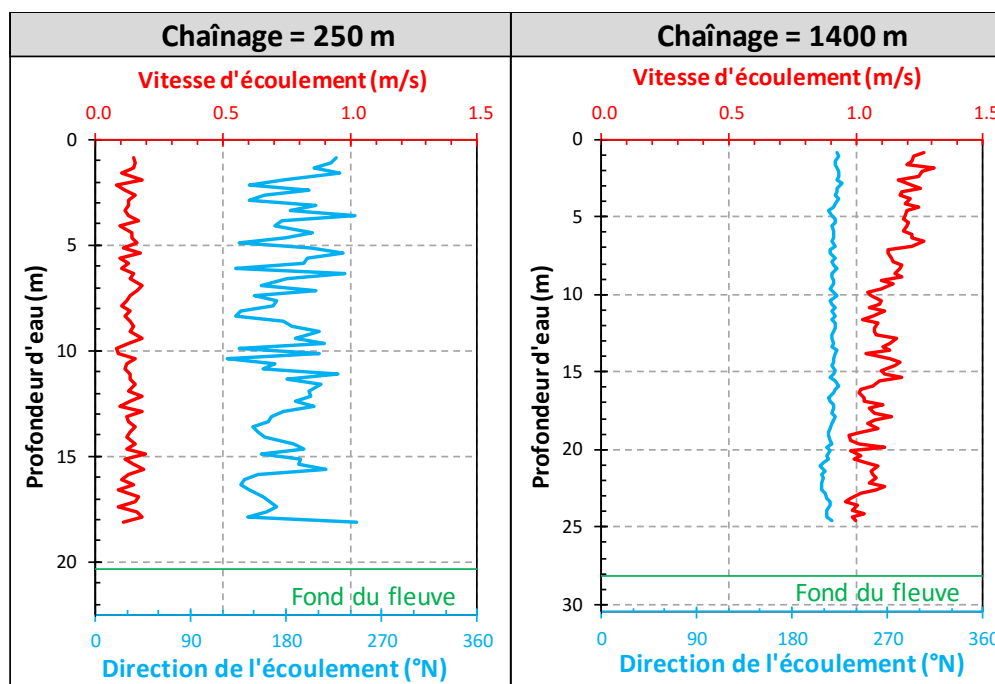


Figure 2.4: Profils verticaux de la vitesse et de la direction des courants (exemple)
Courants de marée au flot – Estuaire Saint-Charles Transect 2

2.2 Analyse des résultats

2.2.1 Baie de Beauport

Les figures A-1.1 à A-2.4 de l'annexe A présentent l'analyse des données relevées par ADCP dans la baie de Beauport pour la campagne de mesure d'août 2016, et ce pour les courants de marée au flot (figures A-1.1 à A-1.4) et au jusant (figures A-2.1 à A-2.4).

Ces figures révèlent des vitesses de courant relativement faibles dans la baie de Beauport, avec des valeurs demeurant généralement entre 0,2 et 0,3 m/s (voir graphique (a) de chacune des figures). Pour des courants aussi faibles, il devient difficile de mesurer avec précision la vitesse et, surtout, la direction de l'écoulement. L'écart-type des directions (graphique (b)) et les profils verticaux de la direction extraits à chacune des extrémités des transects (graphiques (c) de chacune des figures) révèlent ainsi des fluctuations relativement importantes de la direction des courants, et également de légères fluctuations des vitesses, mais il est clair que ces variations résultent de la précision des mesures et de la turbulence intrinsèque de l'écoulement plutôt que d'une quelconque stratification de la colonne d'eau.

Les relevés ADCP obtenus en août 2016 dans la baie de Beauport sont ainsi tout à fait compatibles avec l'hypothèse d'un écoulement bidimensionnel, intégré sur la verticale.

2.2.2 Estuaire Saint-Charles

Les figures A-3.1 à A-4.4 de l'annexe A présentent l'analyse des données relevées par ADCP dans l'estuaire de la Saint-Charles pour la campagne de mesure d'août 2016, et ce pour les courants de marée au flot (figures A-3.1 à A-3.4) et au jusant (figures A-4.1 à A-4.4).

Ces figures révèlent des vitesses variant entre 0,1 et 1,2 m/s, les vitesses les plus élevées étant évidemment observées dans la portion externe (aval) de l'estuaire de la Saint-Charles : dans le transect T3, dans la portion aval du transect T2 et à l'extrémité aval du Transect T4. Il est à noter que les relevés effectués au flot coïncidaient avec des vitesses maximales plus importantes que ceux effectués au jusant (1,2 m/s contre 0,4 m/s à l'extrémité au large du transect 2).

Le transect 1, situé dans la portion interne (amont) de l'estuaire donne évidemment lieu aux vitesses les moins importantes, avec des valeurs de l'ordre de 0,15 à 0,2 m/s au flot et au jusant.

Tel qu'observé pour les relevés de la baie de Beauport, les zones de vitesses faibles (transect 1 et portions internes des transects 2 et 4) donnent lieu à une variabilité notable de la direction des courants sur l'axe vertical. Encore une fois, ces fluctuations de la direction ne révèlent pas une stratification de la colonne d'eau mais dénotent plutôt la difficulté de mesurer et de définir avec précision une direction de l'écoulement en présence de faibles courants.

Au jusant, l'analyse des relevés ADCP des figures A-4.1 à A-4.4 ne révèle aucune variabilité notable des vitesses sur la verticale. Dans tous les cas, l'hypothèse d'un écoulement bidimensionnel est donc totalement justifiée.

Au flot toutefois, une certaine variabilité des vitesses sur la verticale est observée à l'extrémité aval du transect 2 (figure A-3.2) et le long du transect 3 (figure A-3.3). Les mesures à l'ADCP révèlent en effet des vitesses un peu moins rapides sur le fond qu'en surface. Comme l'indiquent les profils verticaux (graphique (c) de chacune de ces figures), les écarts sont toutefois faibles : 1 m/s sur le fond contre 1,2 m/s en surface au transect 2 et 0,7 m/s sur le fond contre 1,0 m/s en surface dans le transect 3. Ces écarts découlent essentiellement de la réduction notable des profondeurs d'écoulement rencontrés par les courants de flot à l'entrée de l'estuaire de la Saint-Charles. En effet, alors que le chenal principal du fleuve montre des profondeurs de plus de 50 m au droit de l'estuaire, les fonds remontent assez abruptement à une profondeur d'environ 15 à 20 m dans l'estuaire (voir figure 3.1). Ce gradient de bathymétrie, combiné au frottement sur les fonds, conduit à la légère variabilité des vitesses sur la verticale montrée par les relevés.

Ces écarts de vitesses sur la verticale demeurent toutefois faibles et ne révèlent aucunement une véritable stratification des courants. L'hypothèse d'un écoulement bidimensionnel demeure encore une fois tout à fait valable, malgré ces légères variations².

² Il importe de noter que dans des zones d'écoulement peu profondes, l'effet du frottement sur les fonds exerce une influence plus notable sur le profil vertical des vitesses. Cette évidence (prédite par la théorie) n'est toutefois pas incompatible avec l'utilisation de modèles numériques bidimensionnels.

3. VALIDATION DU MODÈLE NUMÉRIQUE BIDIMENSIONNEL

3.1 Description sommaire du modèle numérique

Les travaux de modélisation numérique hydro-sédimentaire effectués par Lasalle|NHC pour le Port de Québec reposent sur l'utilisation du logiciel commercial Mike 21 de la firme danoise DHI Water & Environment. Pour fin de comparaison avec les données mesurées par l'ADCP, une nouvelle simulation des courants de marée a été lancée pour la période d'août 2016 coïncidant avec les relevés.

Tel qu'illustrée sur la figure 3.1, le modèle numérique s'étend de la station marégraphique Irving en amont jusqu'aux stations Montmorency et Saint-Laurent en aval. Le modèle est ainsi assez étendu pour minimiser dans la zone d'étude (secteur Beauport) les imprécisions liées à la schématisation des courants aux limites du modèle et ces dernières correspondent à des emplacements pour lesquels des données sont disponibles pour les niveaux de marée.

Les niveaux d'eau imposés aux limites du modèle correspondent aux prédictions fournies par Pêches et Océans Canada aux stations marégraphiques correspondantes.

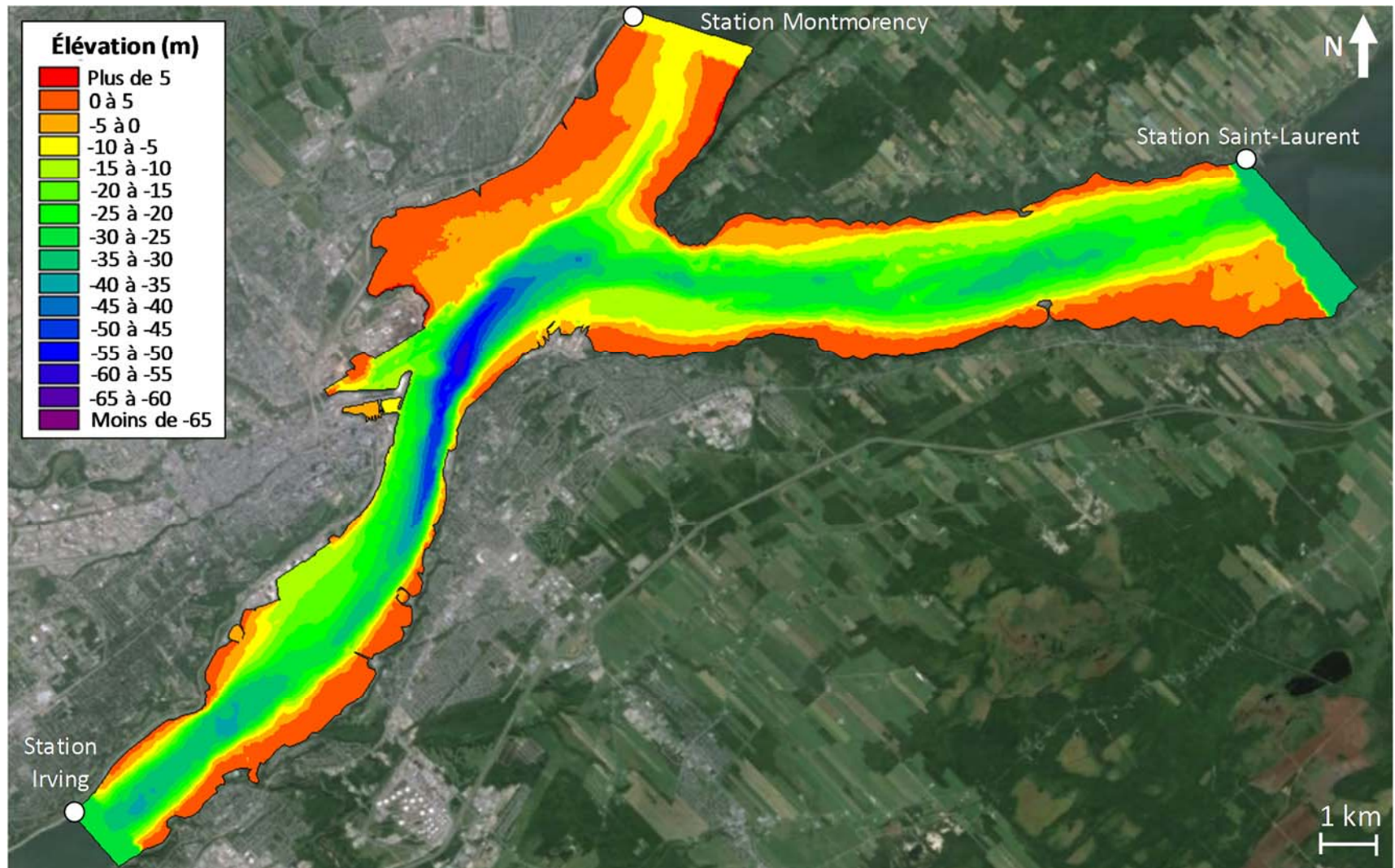


Figure 3.1 : Emprise et bathymétrie du modèle numérique

3.2 Validation des niveaux d'eau

Pour la période des relevés ADCP d'août 2016, la figure 3.2 illustre la comparaison des niveaux d'eau prédits par Pêches et Océans Canada à la station du Vieux-Québec avec les valeurs calculées au même endroit par le modèle numérique. La concordance des valeurs est excellente.

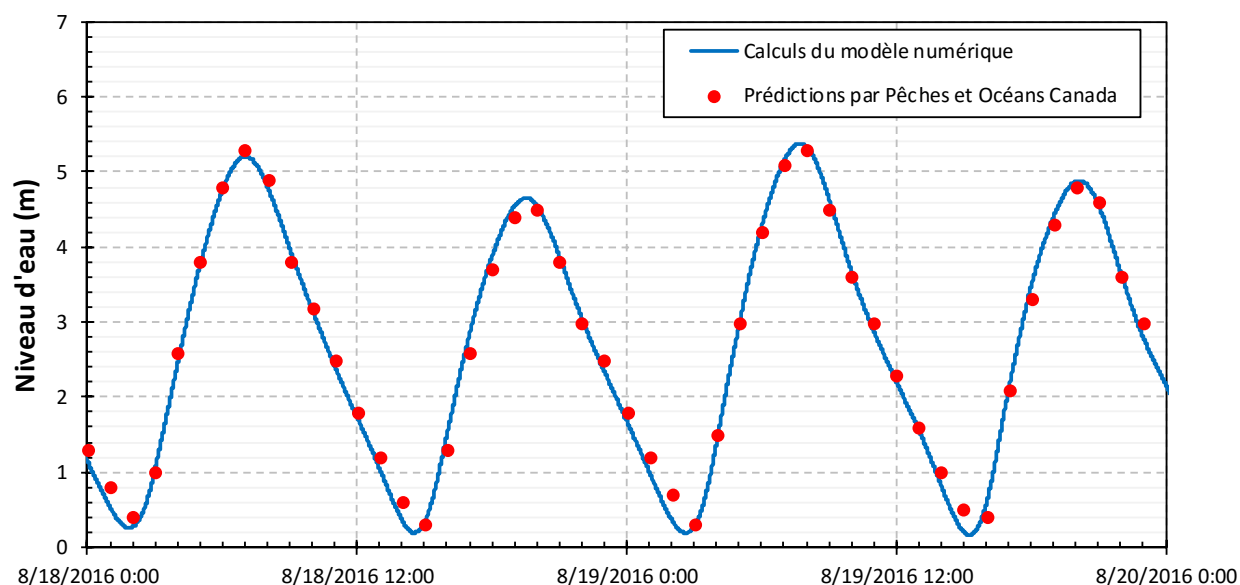


Figure 3.2: Validation des niveaux d'eau du modèle numérique à la station Vieux-Québec

3.3 Validation des courants

Les courants calculés par le modèle numérique ont été comparés avec ceux mesurés par l'ADCP durant la campagne de mesure d'août 2016. L'analyse de la section 2 ayant clairement démontré une variabilité négligeable des courants sur la verticale, les vitesses et directions recueillies par l'ADCP en un point et un instant donnés ont été moyennées sur la verticale.

Conformément aux relevés de terrain, deux états de la marée sont considérés pour la comparaison des courants : flot et jusant. Pour chacun de ces cas, les quatre transects mesurés par l'ADCP ont été comparés avec les résultats prédits par le modèle numérique. Les comparaisons de la vitesse et de la direction des courants mesurés et calculés sont présentées à l'annexe B de ce rapport. L'annexe C présente aussi une comparaison de la direction des courants mesurée et calculée dans l'estuaire Saint-Charles par le biais d'une vue en plan.

3.3.1 Baie de Beauport

Les figures B-1.0 à B-2.4 présentent les comparaisons des courants prédits par le modèle et ceux mesurés sur le site de la baie de Beauport. Cette comparaison est effectuée pour la vitesse ainsi que la direction de l'écoulement.

Au flot (figures B-1.0 à B-1.4), la concordance entre les résultats calculés et ceux mesurés sur le site est excellente aux transects T1, T2 et T3 mais se dégrade à la section T4, qui est la plus proche du rentrant sud-ouest.

Au jusant³ (figures B-2.0 à B-2.4), une concordance acceptable est obtenue aux transects 1 et 2 mais la correspondance entre les résultats calculés et les mesures se dégradent pour les profils T3 et T4, qui sont situés les plus près de la rive.

En regard des très faibles courants généralement observés dans ce secteur, la validité des résultats du modèle numérique demeure toutefois satisfaisante.

Notons également que les courants prédits par le modèle numérique dans ce secteur avaient déjà été validés d'après les données extraites du modèle réduit du port de Québec, qui était exploité par Lasalle|NHC dans les années soixante-dix⁴.

³ L'examen de la figure B-2.0 montre que les relevés effectués « au jusant » par Englobe se situaient en fait que peu de temps après la marée haute, soit avant la véritable renverse des courants de flot vers le jusant.

⁴ VILLENEUVE, M. ET N. HOSSAINI (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 Groupe-Conseil LaSalle no 1605, avril 2006, préparé pour l'Administration portuaire de Québec.

3.3.2 Estuaire Saint-Charles

Les figures B-3.0 à B-4.4 présentent les comparaisons des courants prédits par le modèle et ceux mesurés dans l'estuaire de la Saint-Charles. Cette comparaison est effectuée pour la vitesse ainsi que la direction de l'écoulement.

Il est à souligner que les résultats de modélisation numérique prévoyaient la formation de courants de retour (gyres) relativement importants dans l'estuaire de la Saint-Charles, pendant une bonne portion du cycle de marée. Faut de données, ces résultats n'avaient toutefois pas pu faire l'objet de validation.

Les données recueillies en août 2016 confirment d'abord la présence de courants de retour importants dans l'estuaire de la Saint-Charles, comme en témoignent les changements importants de la direction des courants observés sur le site, tant au flot qu'au jusant.

Les relevés effectués au flot (figures B-3.1 à B-3.4), qui indiquent des vitesses maximales de 1,1 m/s, montrent que le modèle numérique offre généralement une bonne représentation des vitesses d'écoulement. Toutefois, des déphasages importants entre les directions de courants mesurées et calculées indiquent que le modèle ne parvient pas à bien définir le nombre et l'étendue des courants de retour.

Au jusant (figures B-4.1 à B-4.4), les relevés montrent des vitesses maximales ne dépassant pas 0,4 m/s, et la correspondance des vitesses mesurées et calculées est moins bonne. Comme au flot, on observe des écarts importants dans les directions des courants.

Ces résultats indiquent que, bien qu'il prédise la formation de gyres dans l'estuaire de la Saint-Charles, le modèle numérique n'offre pas une précision optimale dans la représentation de la configuration de ces courants de retour.

Les relevés ADCP effectués en août 2016 se prêtent bien à une confirmation de l'hypothèse d'un écoulement bidimensionnel mais, à cause de la variabilité spatiale et temporelle de ces relevés, leur utilisation à des fins de validation et de calibrage du modèle numérique est plus difficile. Afin de mieux comprendre la configuration des courants de retour mesurés dans l'estuaire, on a comparé les directions moyennes des courants obtenues dans des segments spécifiques des transects ADCP avec les cartes des courants de marée prédites par le modèle numérique pour les intervalles de temps correspondants.

Les résultats de cette comparaison sont présentés à l'annexe C. Comme on l'a mentionné précédemment, les relevés ADCP confirment clairement la présence de courants de retour dans l'estuaire, et ce pour l'ensemble des conditions documentées. Toutefois, alors que le modèle numérique ne prévoit au flot qu'un seul courant de retour tournant dans le sens des aiguilles d'une montre, les relevés ADCP⁵ semblent plutôt indiquer la présence d'au moins deux gyres tournant dans des directions opposées.

⁵ Tel que mentionné précédemment, il faut noter que les relevés ADCP de « flot » et de « jusant » fournis par Englobe correspondent en fait tous les deux à des courants de flot dans la zone à l'étude.

La configuration des courants de retour prédits au modèle numérique dépend étroitement du paramètre de viscosité turbulente choisie pour les simulations. Des travaux supplémentaires seraient requis en vue d'ajuster ce paramètre de manière à mieux représenter les courants de retour observés dans l'estuaire de la Saint-Charles. Pour simplifier cet exercice et le rendre plus concluant, des relevés en continu en des points donnés pourraient également s'avérer nécessaires dans l'estuaire. Des relevés avec traceurs de surface (drogues) géo-référencés pourraient aussi représenter une alternative moins coûteuse et plus avantageuse d'un point de vue technique.

Mentionnons toutefois que ce manque de précision du modèle ne met aucunement en cause l'hypothèse de courants uniformes sur la verticale, qui a déjà été confirmée à la section 2.

Soulignons également que l'objectif des travaux de modélisation effectués ces dernières années par Lasalle|NHC pour le compte de l'APQ n'était pas d'atteindre une précision absolue dans la reproduction des conditions d'écoulement mais bien d'évaluer l'impact relatif des nouveaux aménagements projetés par l'APQ sur ces conditions.

En d'autres mots, même en raffinant la modélisation de l'estuaire de la Saint-Charles, les conclusions déjà formulées quant à l'impact minimal du nouvel aménagement sur les conditions d'écoulement locales demeurerait fort probablement les mêmes.

4. CONCLUSION

Afin de valider l'utilisation d'un modèle numérique bidimensionnel dans l'ensemble de ses études des dernières années pour le Port de Québec, Lasalle | NHC a d'abord utilisé une série de relevés ADCP des courants de marée pour démontrer que la variabilité verticale des courants était négligeable et que l'utilisation d'un modèle 2D était tout à fait justifiée dans les secteurs de la baie de Beauport et de l'estuaire de la rivière Saint-Charles.

Les variations les plus fortes des vitesses sur la verticale sont observées au flot, à la limite entre l'estuaire de la rivière Saint-Charles et le chenal plus profond du fleuve, mais les écarts observés demeurent tout à fait compatibles avec l'utilisation d'un modèle hydraulique bidimensionnel.

Les prédictions des niveaux de marée émises par Pêches et Océans Canada ont permis de confirmer l'excellente représentativité des niveaux d'eau simulés par le modèle numérique. Par rapport aux données de courantométrie recueillies par ADCP dans la baie de Beauport en août 2016, les résultats prédits par le modèle numérique offrent une concordance satisfaisante, et ce malgré les très faibles courants caractérisant cette zone.

Dans l'estuaire de la Saint-Charles, les vitesses mesurées et calculées sont assez proches au flot, mais des écarts plus notables sont observés au jusant (très peu de temps après la marée haute), alors que les vitesses en jeu sont moins élevées qu'au flot. Pour toute la gamme des conditions documentées, les relevés de terrain confirment, comme le modèle numérique, la présence de courants de retour importants dans l'estuaire de la rivière. Toutefois, les écarts notables entre la direction des courants mesurée et calculée le long des transects de l'ADCP indiquent que le modèle numérique n'offre pas une représentation optimale de ces courants de retour (gyres).

Des travaux supplémentaires de calibrage du modèle numérique, et idéalement de nouveaux relevés de terrain, seraient requis pour augmenter la précision du modèle numérique dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles. Il faut toutefois souligner que même en raffinant la modélisation dans ce secteur, les conclusions déjà obtenues quant à l'impact de l'extension portuaire demeurerait fort probablement valides.

ANNEXE A

ANALYSE DES MESURES DE TERRAIN

Annexe A – Analyse des mesures de terrain

Figure A-1.1 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot - Baie de Beauport - Transect 1

Figure A-1.2 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot - Baie de Beauport - Transect 2

Figure A-1.3 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot - Baie de Beauport - Transect 3

Figure A-1.4 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot - Baie de Beauport - Transect 4

Figure A-2.1 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant - Baie de Beauport - Transect 1

Figure A-2.2 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant - Baie de Beauport - Transect 2

Figure A-2.3 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant - Baie de Beauport - Transect 3

Figure A-2.4 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant - Baie de Beauport - Transect 4

Figure A-3.1 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot - Estuaire Saint-Charles - Transect 1

Figure A-3.2 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot - Estuaire Saint-Charles - Transect 2

Figure A-3.3 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot - Estuaire Saint-Charles - Transect 3

Figure A-3.4 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot - Estuaire Saint-Charles - Transect 4

Figure A-4.1 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant - Estuaire Saint-Charles - Transect 1

Figure A-4.2 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant - Estuaire Saint-Charles - Transect 2

Figure A-4.3 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant - Estuaire Saint-Charles - Transect 3

Figure A-4.4 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant - Estuaire Saint-Charles - Transect 4

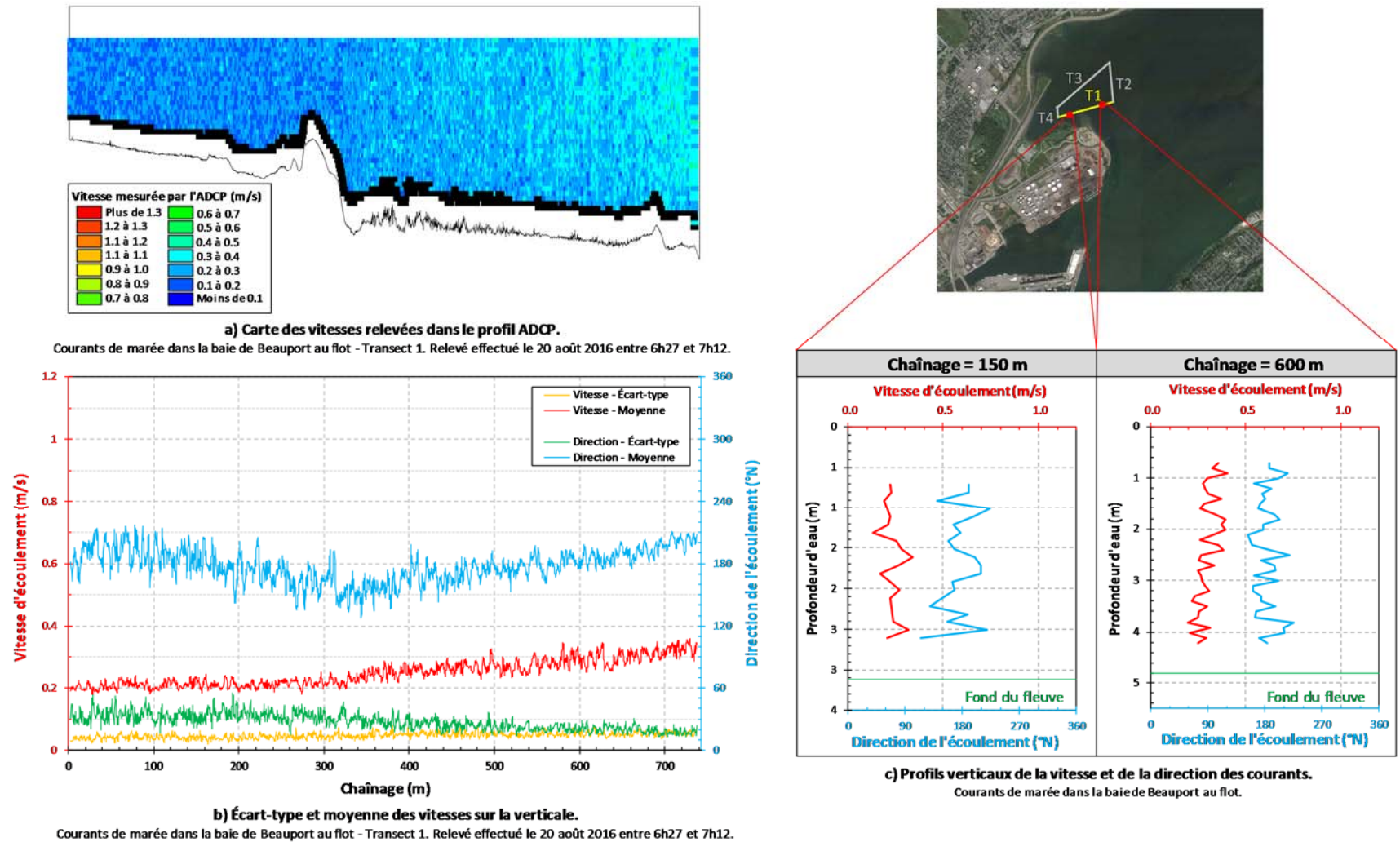


Figure A-1.1 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot
Baie de Beauport - Transect 1

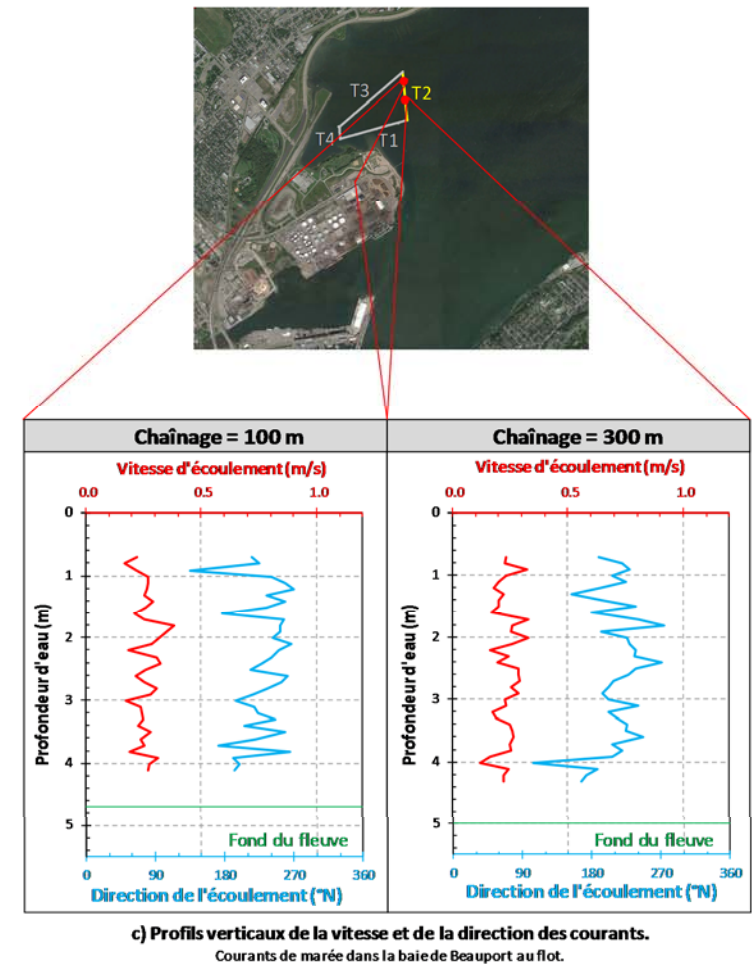
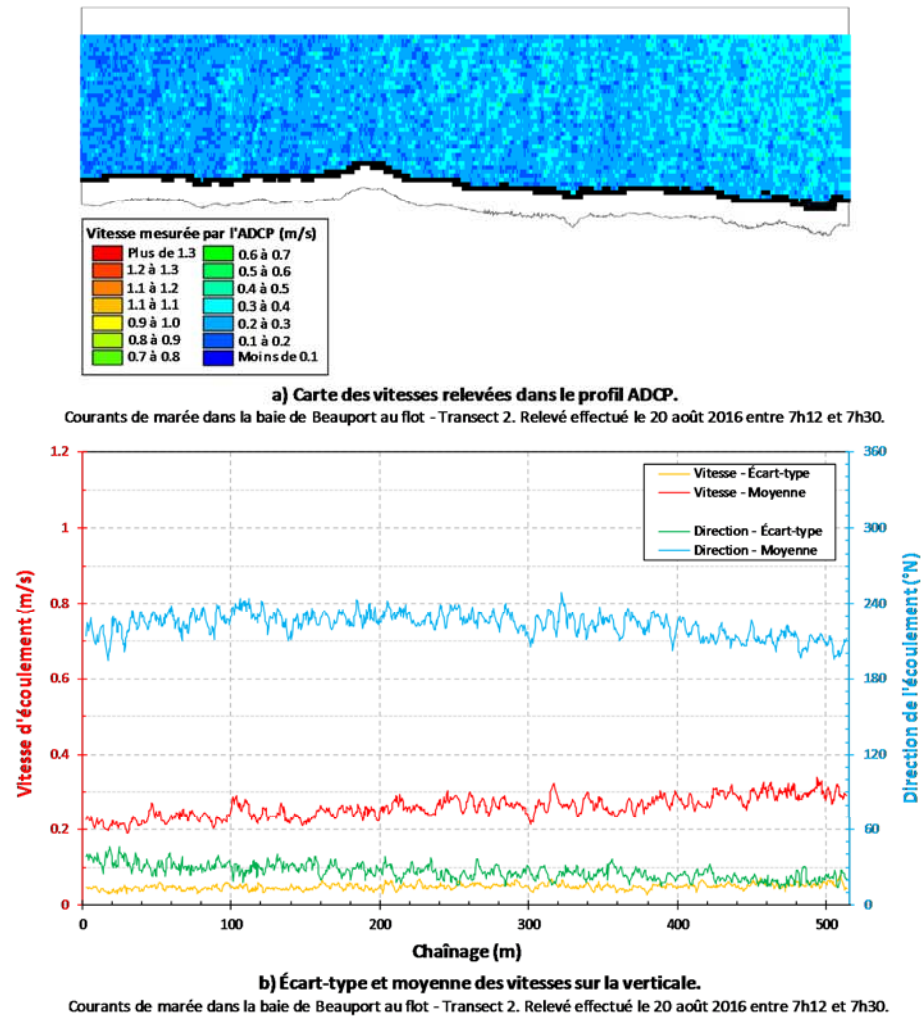


Figure A-1.2 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot
Baie de Beauport - Transect 2

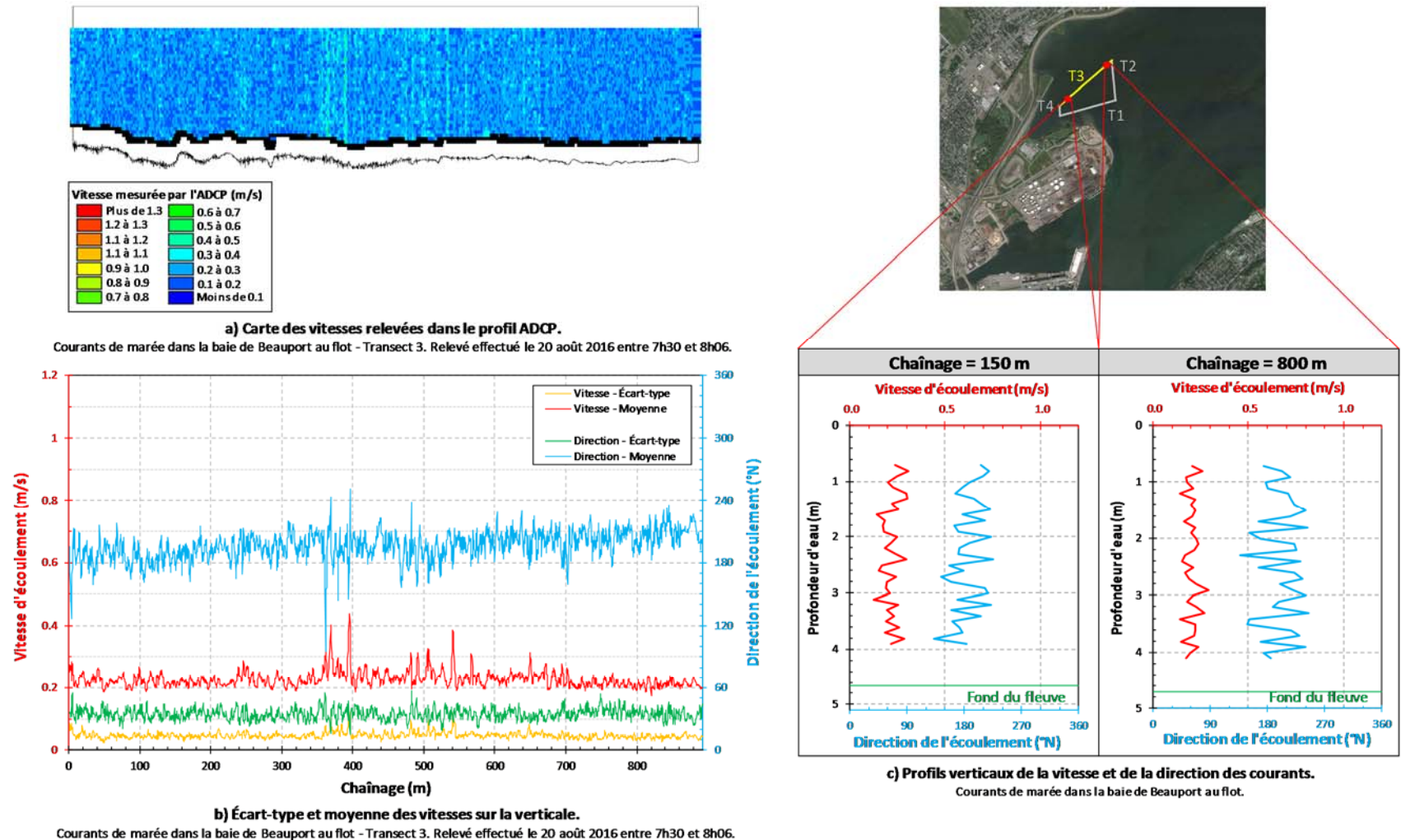


Figure A-1.3 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot
Baie de Beauport - Transect 3

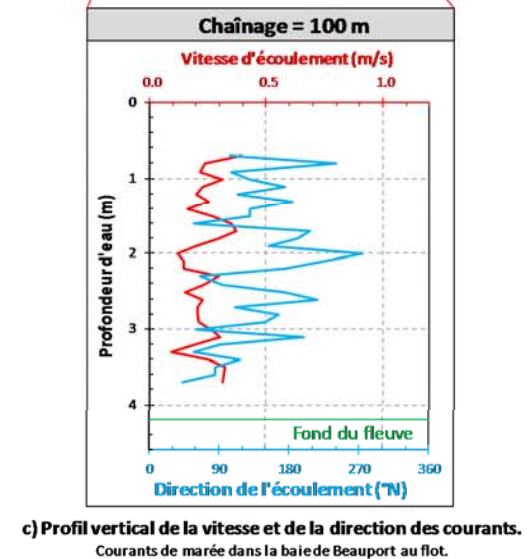
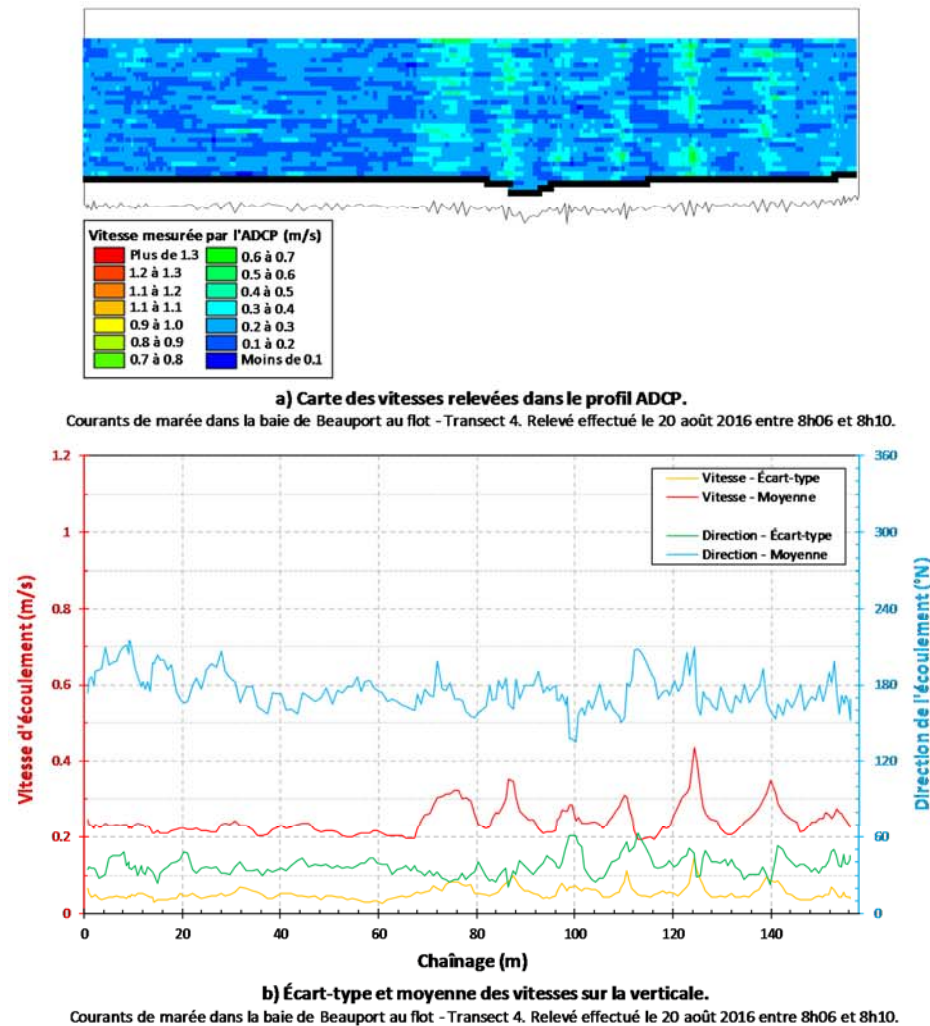
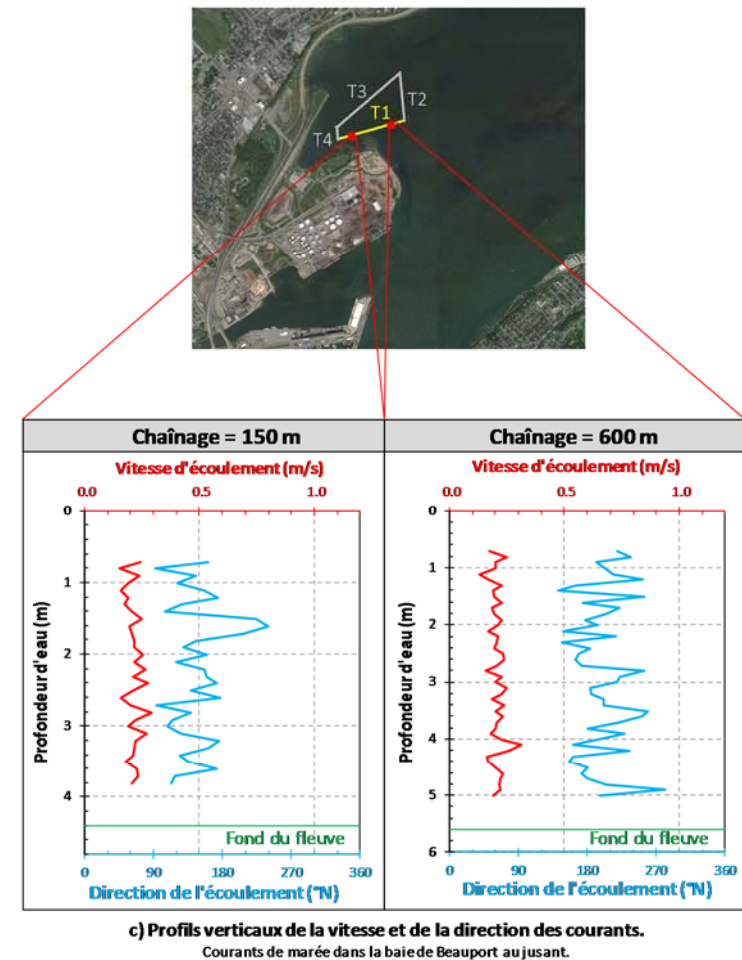
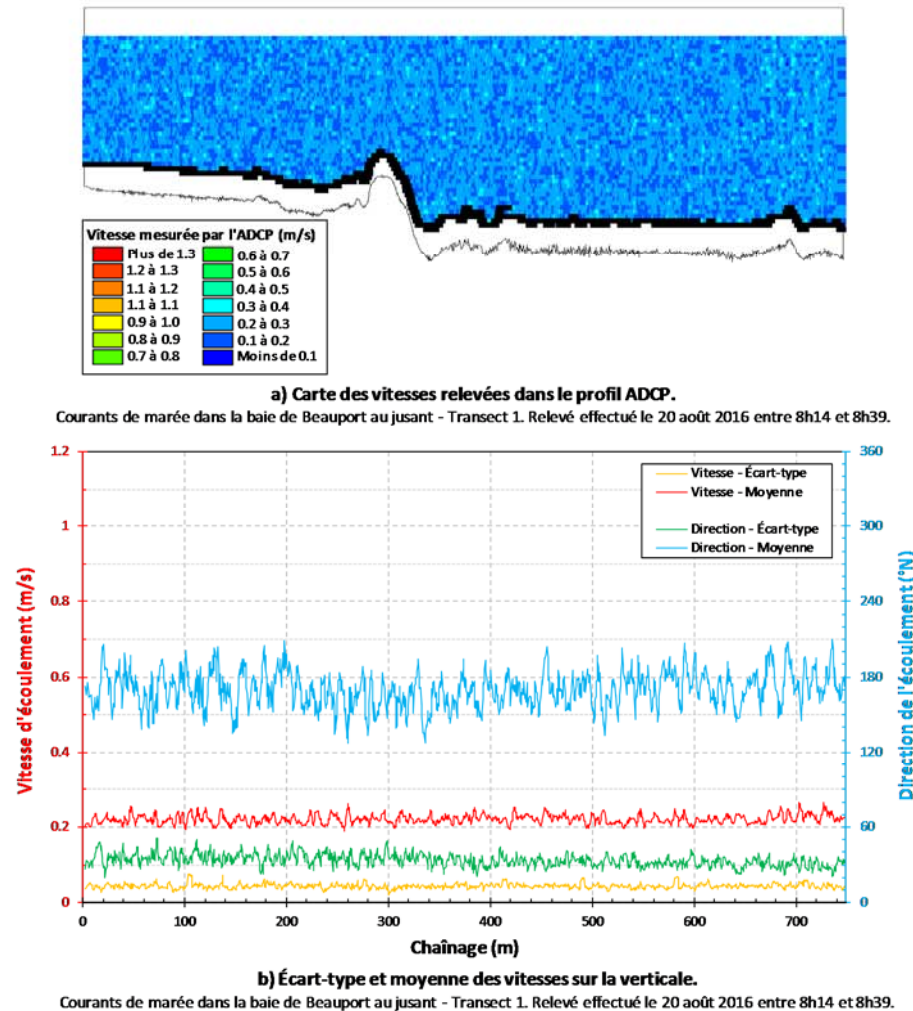


Figure A-1.4 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot
Baie de Beauport - Transect 4



**Figure A-2.1 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant
Baie de Beauport - Transect 1**

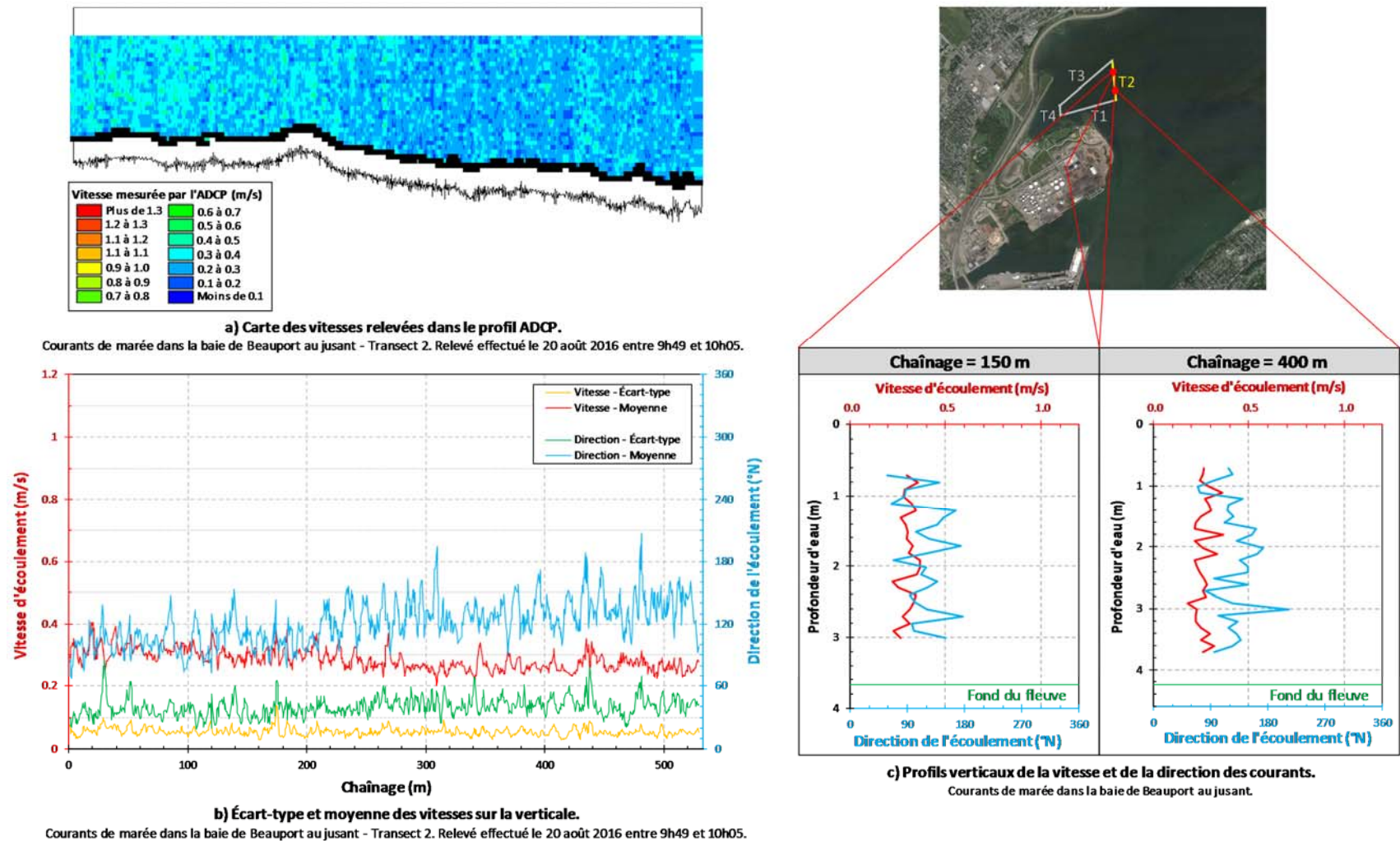


Figure A-2.2 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant
Baie de Beauport - Transect 2

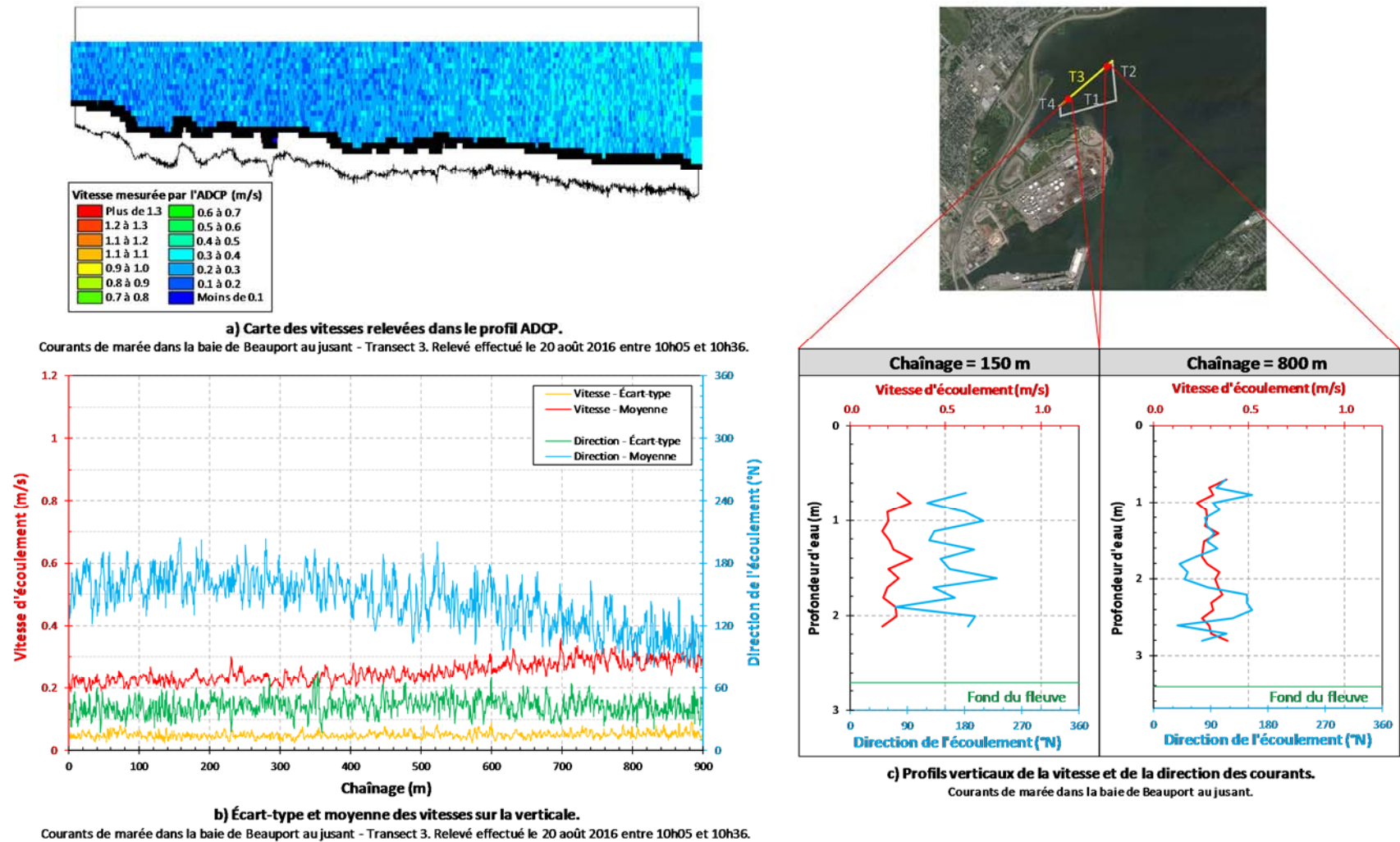


Figure A-2.3 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant
Baie de Beauport - Transect 3

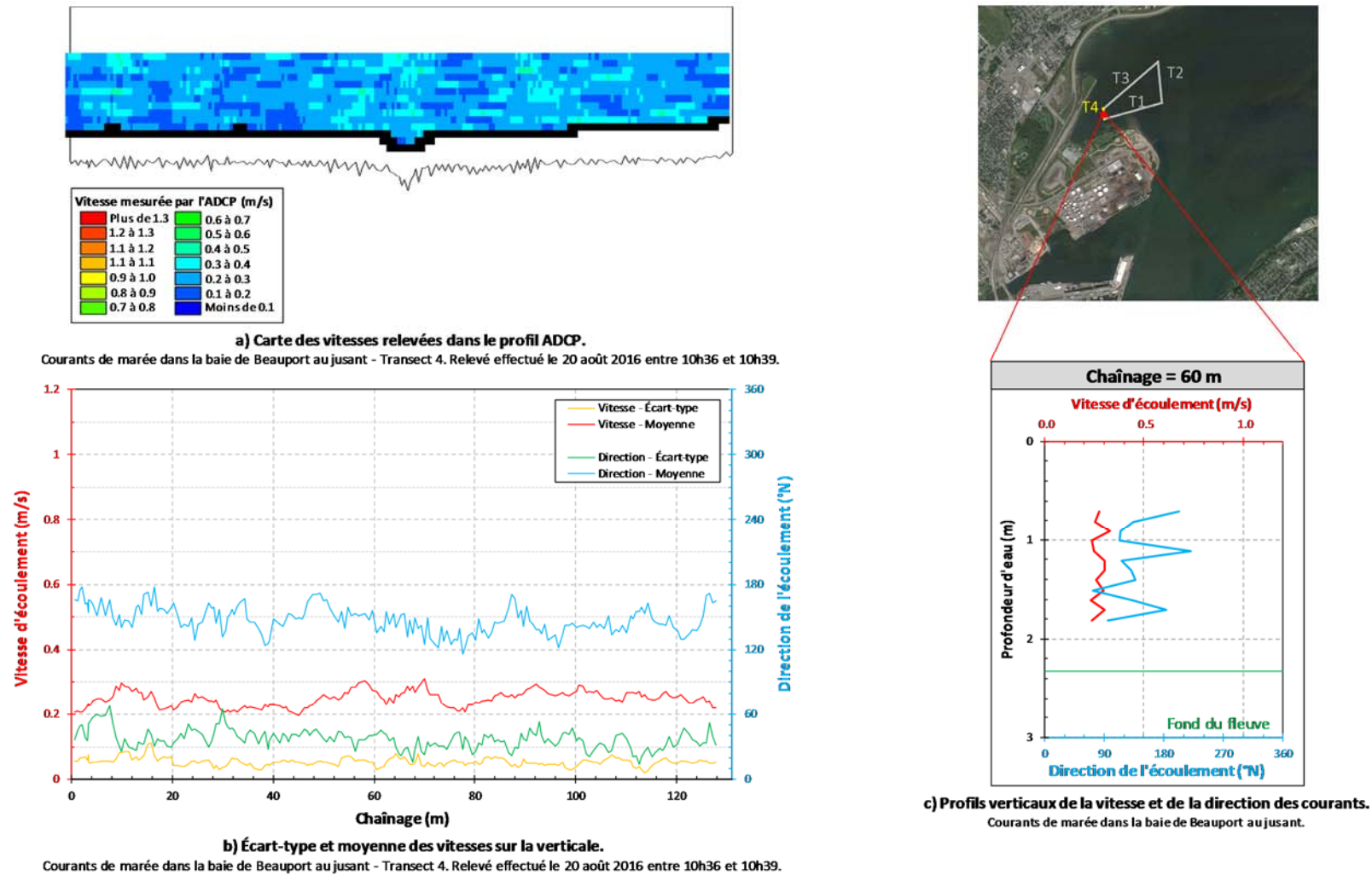
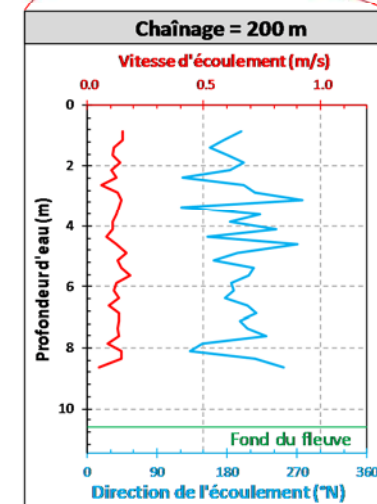
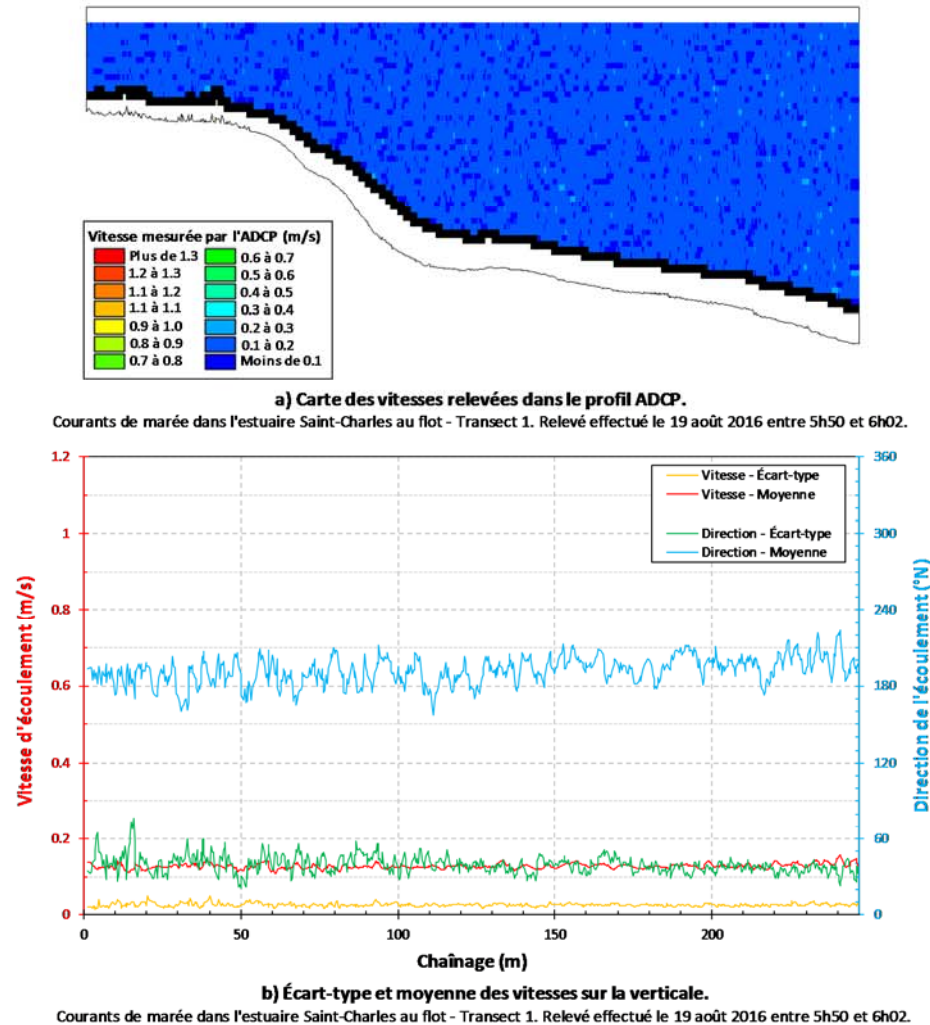


Figure A-2.4 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant
Baie de Beauport - Transect 4



c) Profils verticaux de la vitesse et de la direction des courants.
Courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot.

Figure A-3.1 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot
Estuaire Saint-Charles - Transect 1

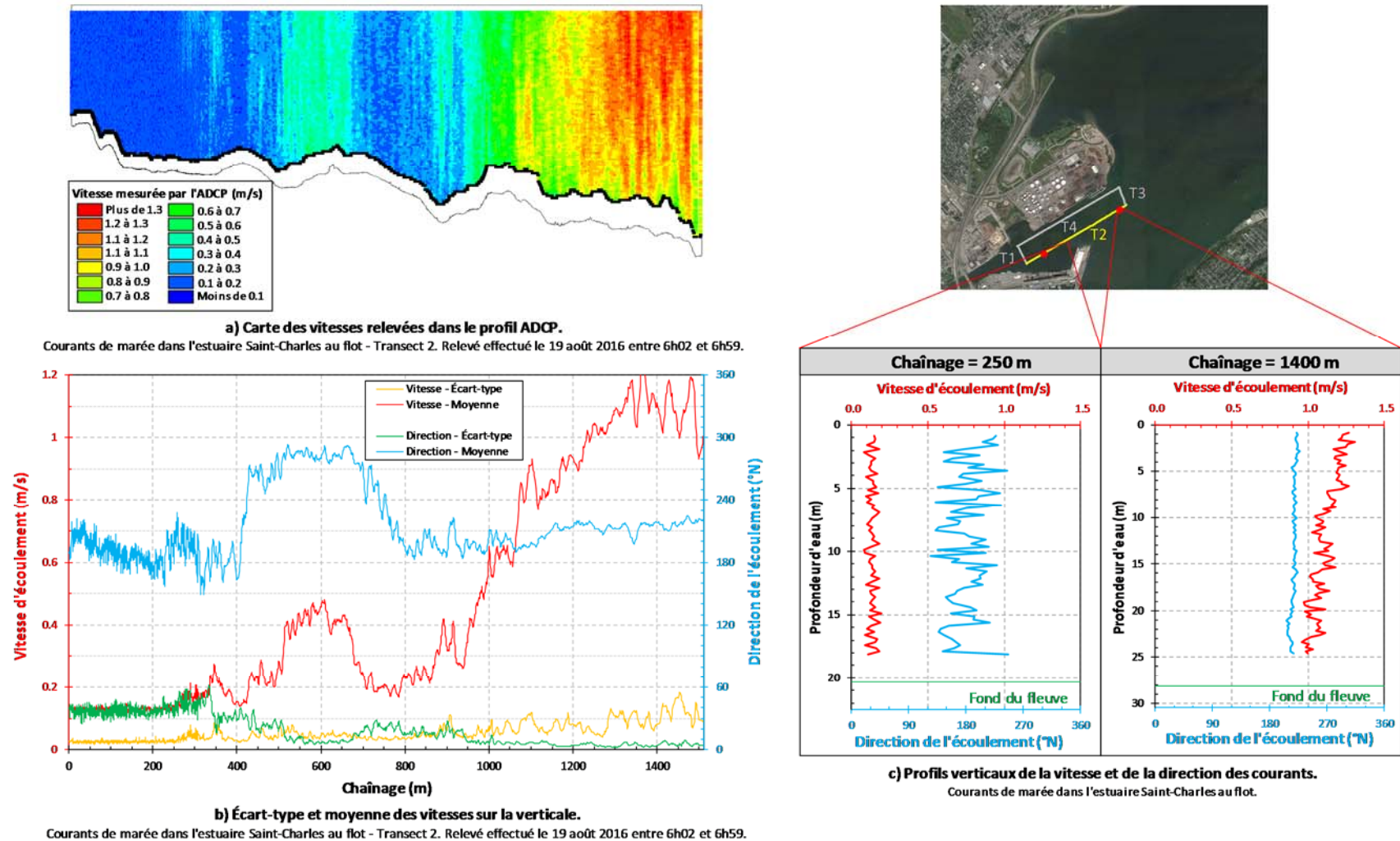


Figure A-3.2 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot
Estuaire Saint-Charles - Transect 2

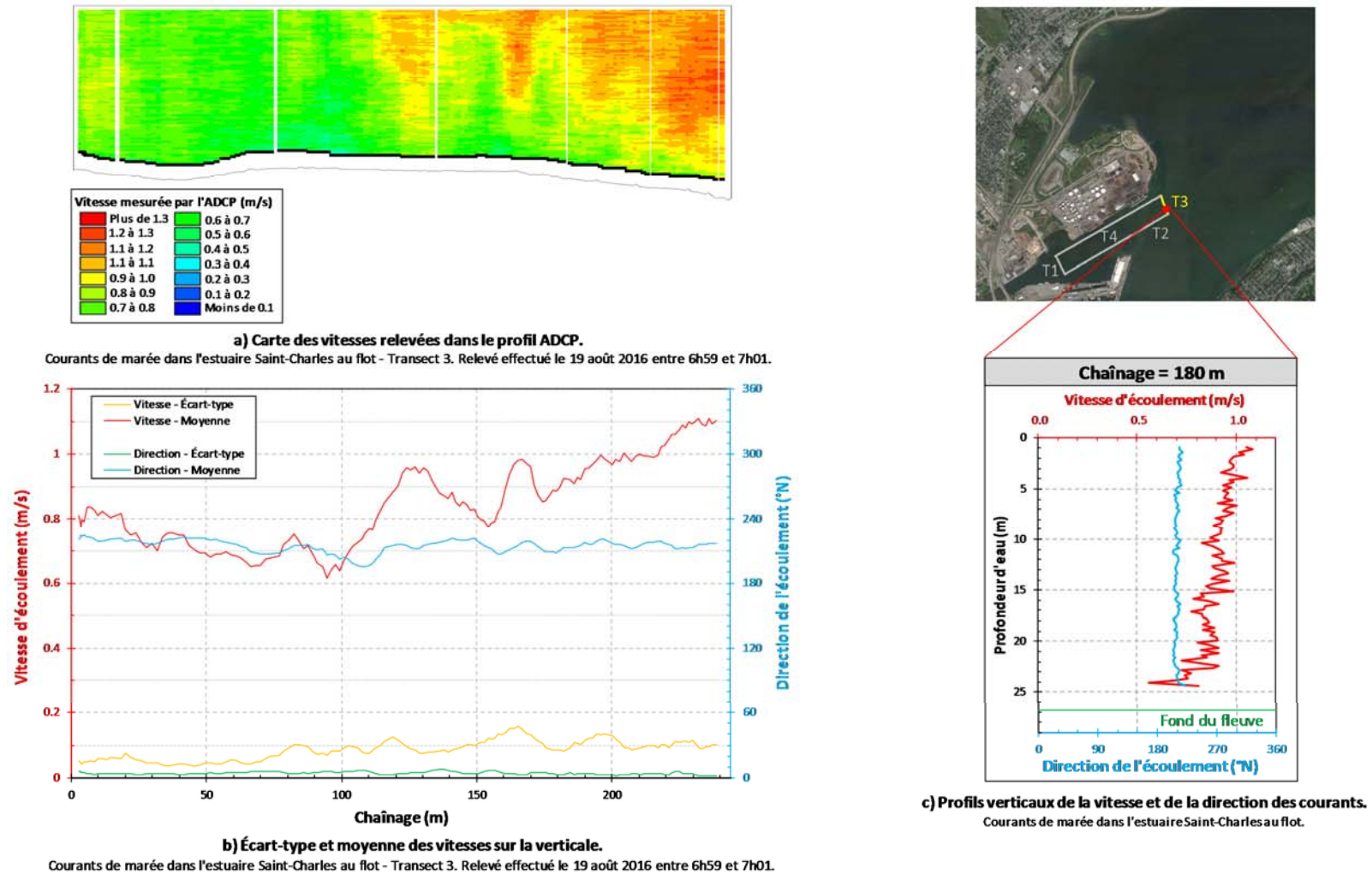


Figure A-3.3 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot
Estuaire Saint-Charles - Transect 3

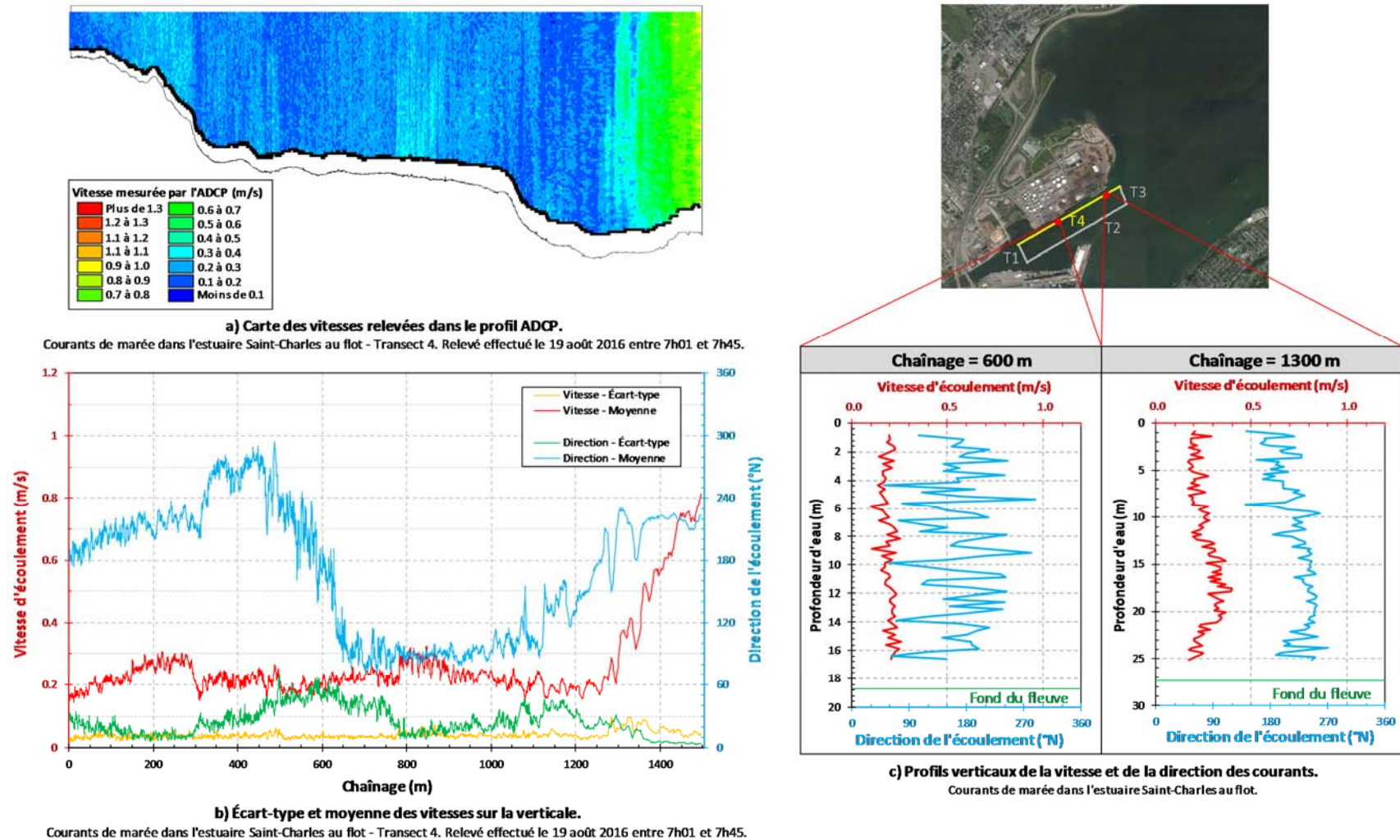


Figure A-3.4 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au flot
Estuaire Saint-Charles - Transect 4

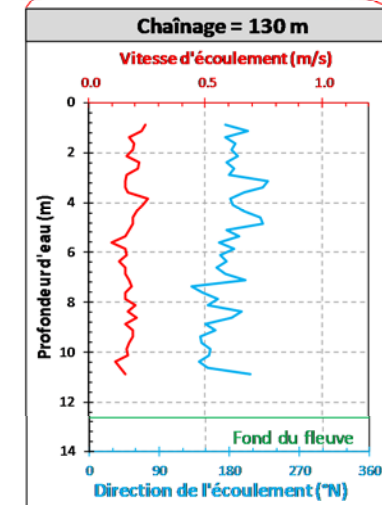
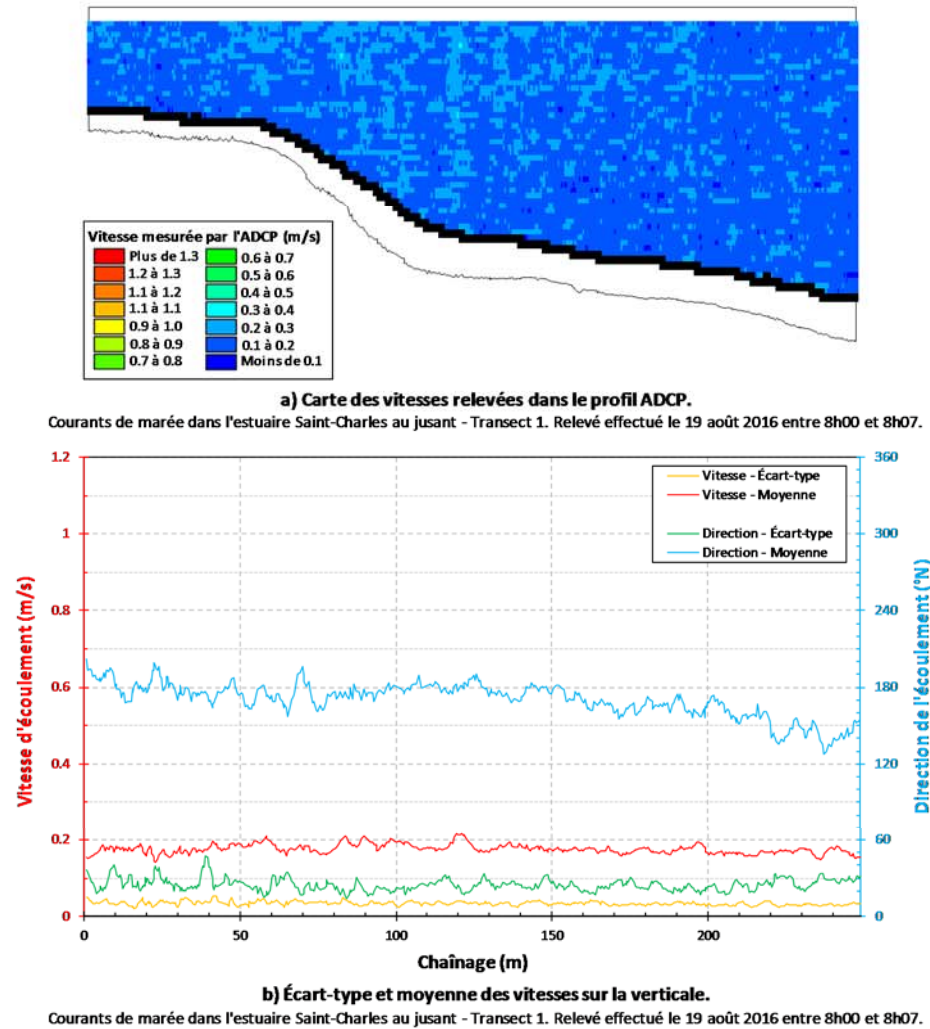


Figure A-4.1 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant Estuaire Saint-Charles - Transect 1

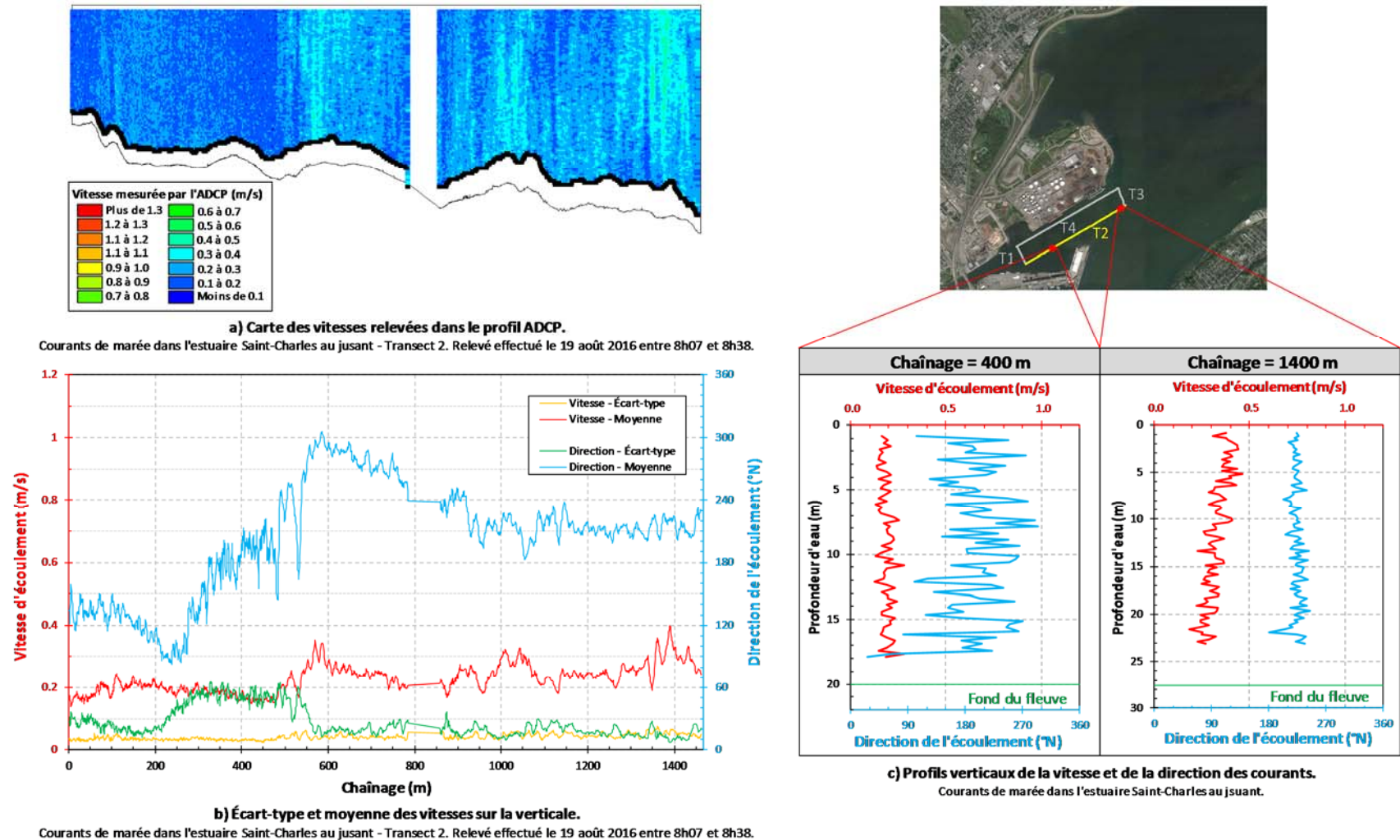


Figure A-4.2 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant
Estuaire Saint-Charles - Transect 2

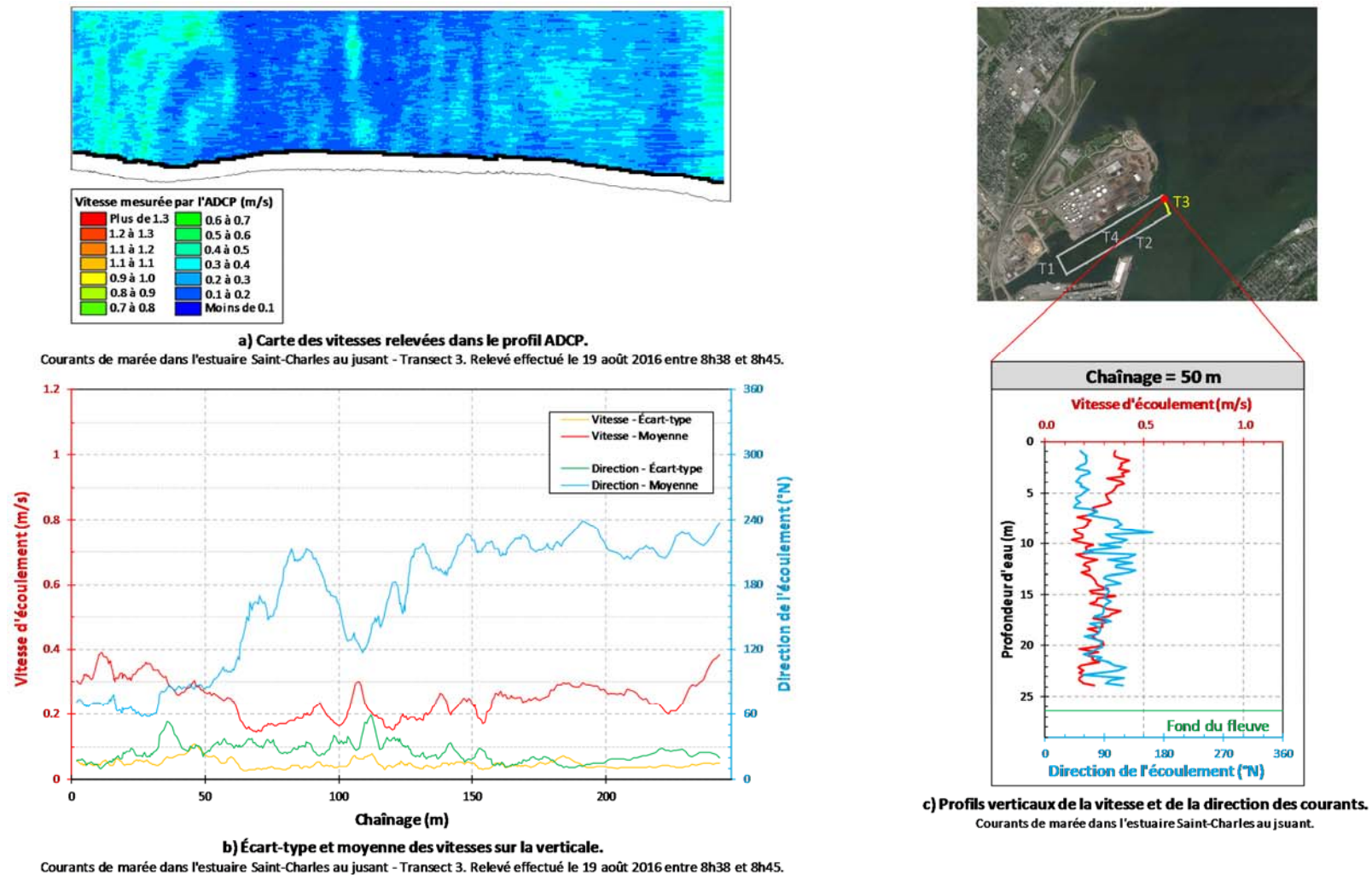


Figure A-4.3 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant
Estuaire Saint-Charles - Transect 3

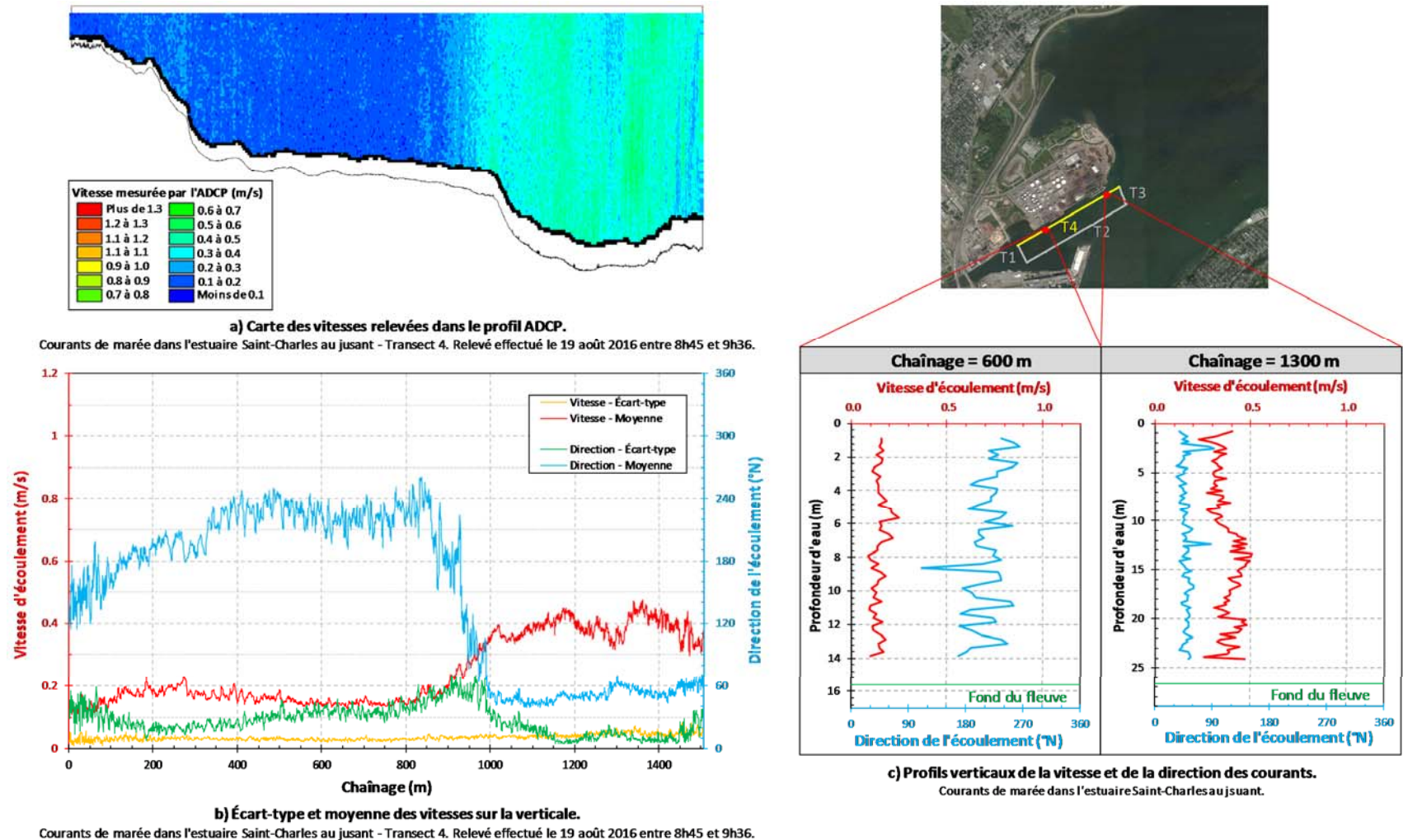


Figure A-4.4 : Analyse des mesures de terrain de la campagne d'août 2016 pour les courants de marée au jusant
Estuaire Saint-Charles - Transect 4

ANNEXE B

VALIDATION DU MODÈLE BIDIMENSIONNEL

Annexe B – Validation du modèle bidimensionnel

Figure B-1.0 : Positions et période des mesures des transects ADCP relevés durant la campagne de mesure d'août 2016 pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot

Figure B-1.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot – Transect 1

Figure B-1.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot – Transect 2

Figure B-1.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot – Transect 3

Figure B-1.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot – Transect 4

Figure B-2.0 : Positions et période des mesures des transects ADCP relevés durant la campagne de mesure d'août 2016 pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusant

Figure B-2.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusant – Transect 1

Figure B-2.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusant – Transect 2

Figure B-2.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusant – Transect 3

Figure B-2.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusant – Transect 4

Figure B-3.0 : Positions et période des mesures des transects ADCP relevés durant la campagne de mesure d'août 2016 pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot

Figure B-3.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 1

Figure B-3.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 2

Figure B-3.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 3

Figure B-3.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 4

Figure B-4.0 : Positions et période des mesures des transects ADCP relevés durant la campagne de mesure d'août 2016 pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant

Figure B-4.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 1

Figure B-4.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 2

Figure B-4.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 3

Figure B-4.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 4

Baie de Beauport - courants de marée au flot

20 août 2016 – Relevés effectués entre 6h27 et 8h10

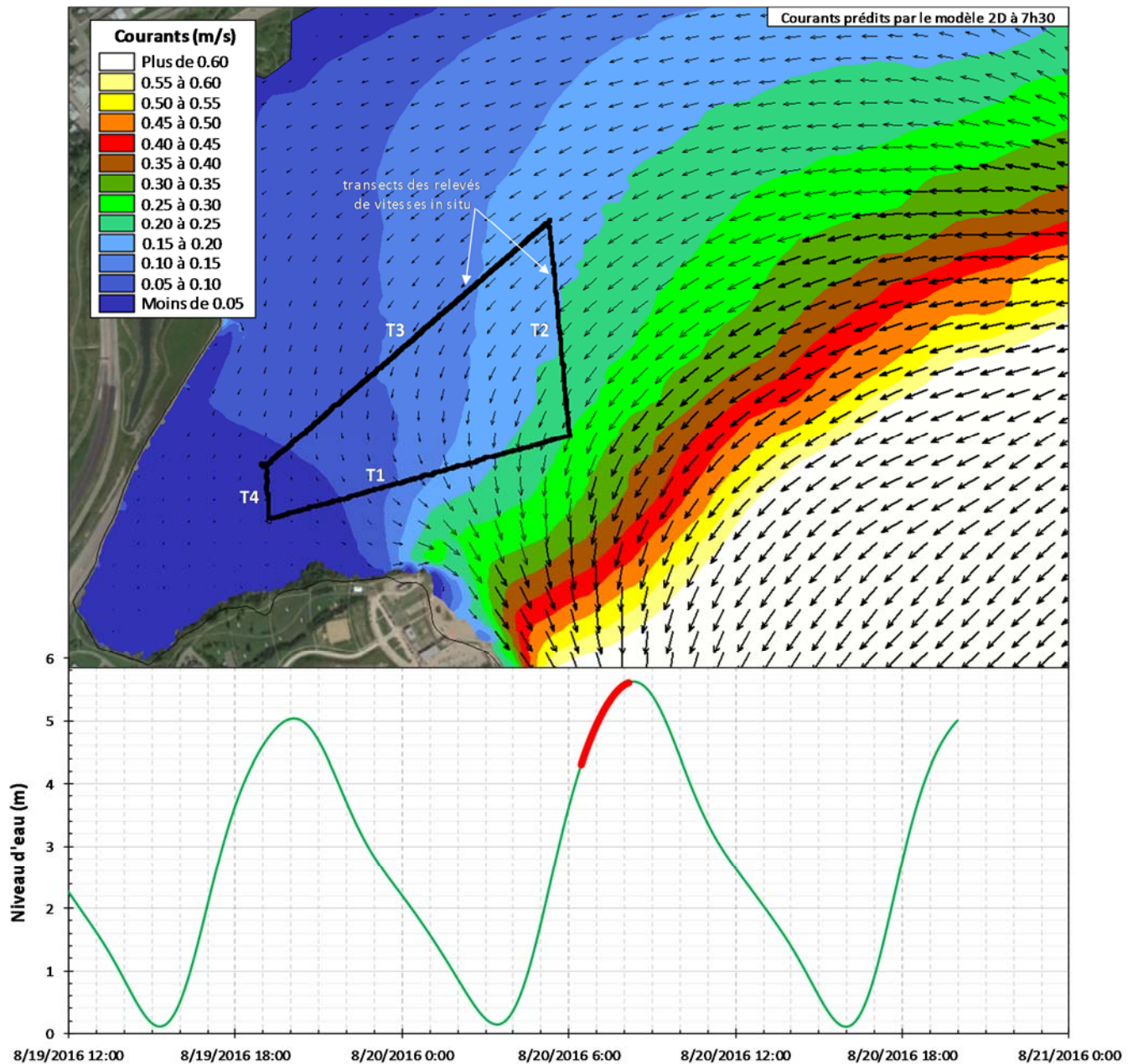


Figure B-1.0 : Positions et période des mesures des transects ADCP relevés durant la campagne de mesure d'août 2016 pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot

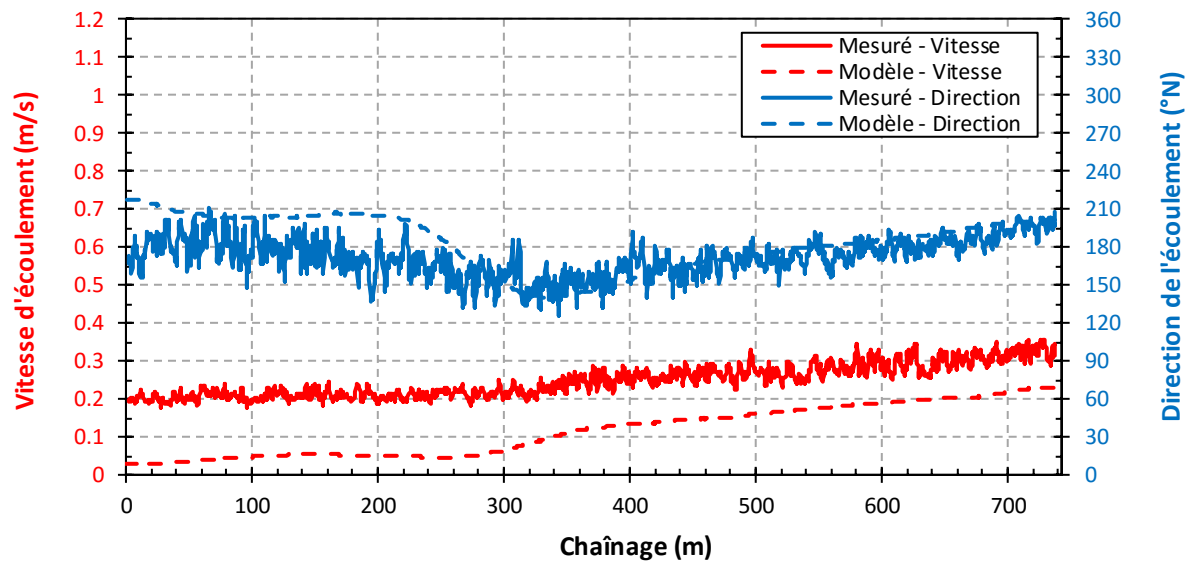


Figure B-1.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de beauport au flot – Transect 1
20 août 2016 entre 6h27 et 7h12

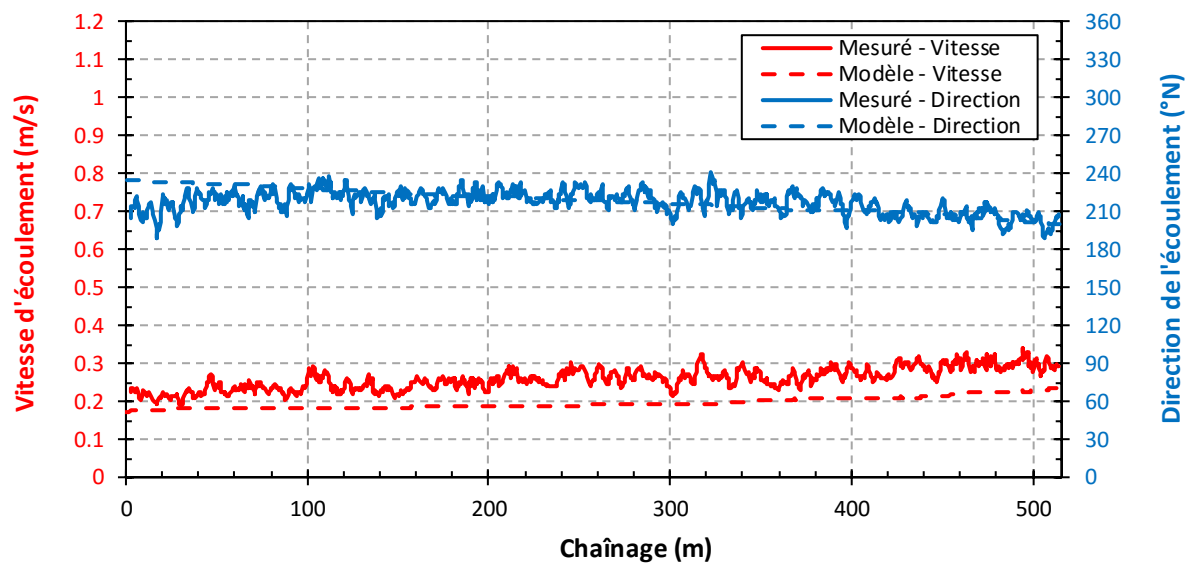


Figure B-1.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot – Transect 2
20 août 2016 entre 7h12 et 7h30

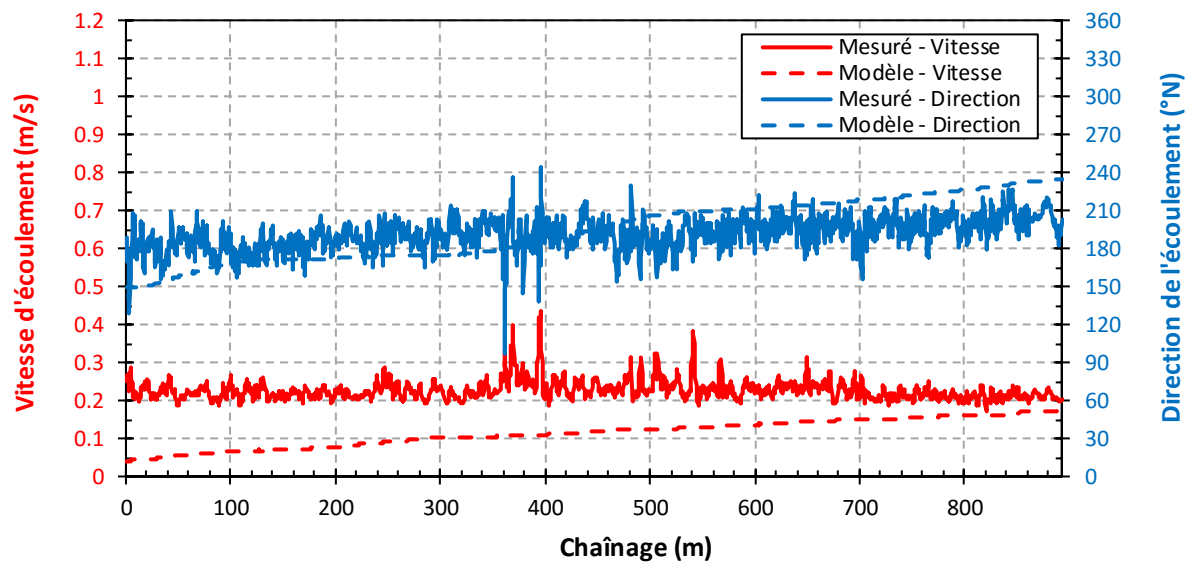


Figure B-1.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot – Transect 3
20 août 2016 entre 7h30 et 8h06

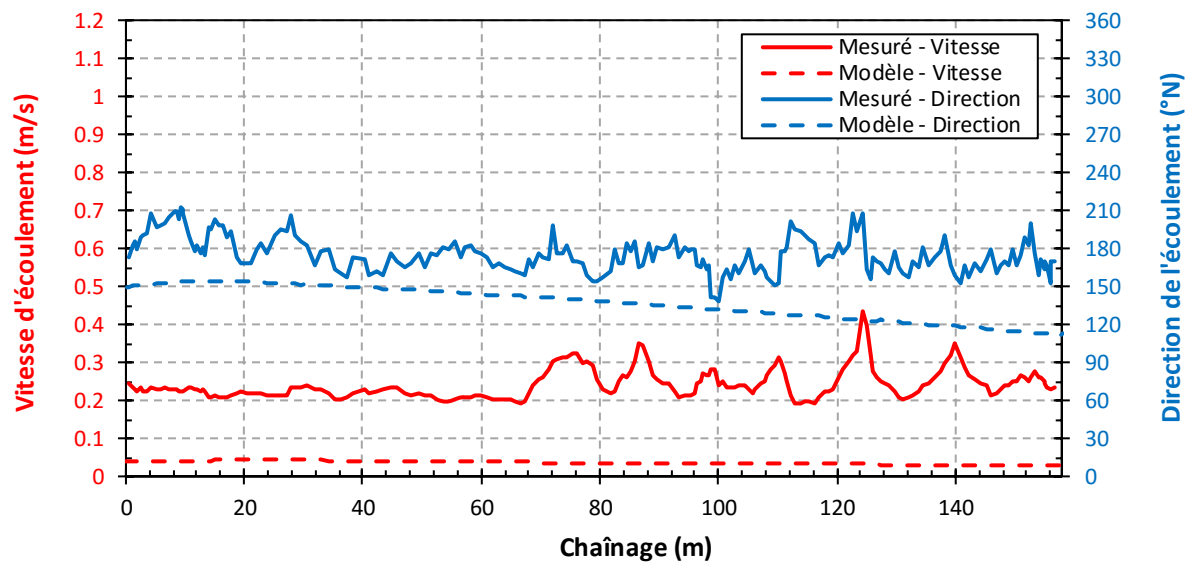


Figure B-1.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au flot – Transect 4
20 août 2016 entre 8h06 et 8h10

Baie de Beauport - courants de marée au jusant

20 août 2016 – Relevés effectués entre 8h14 et 10h40

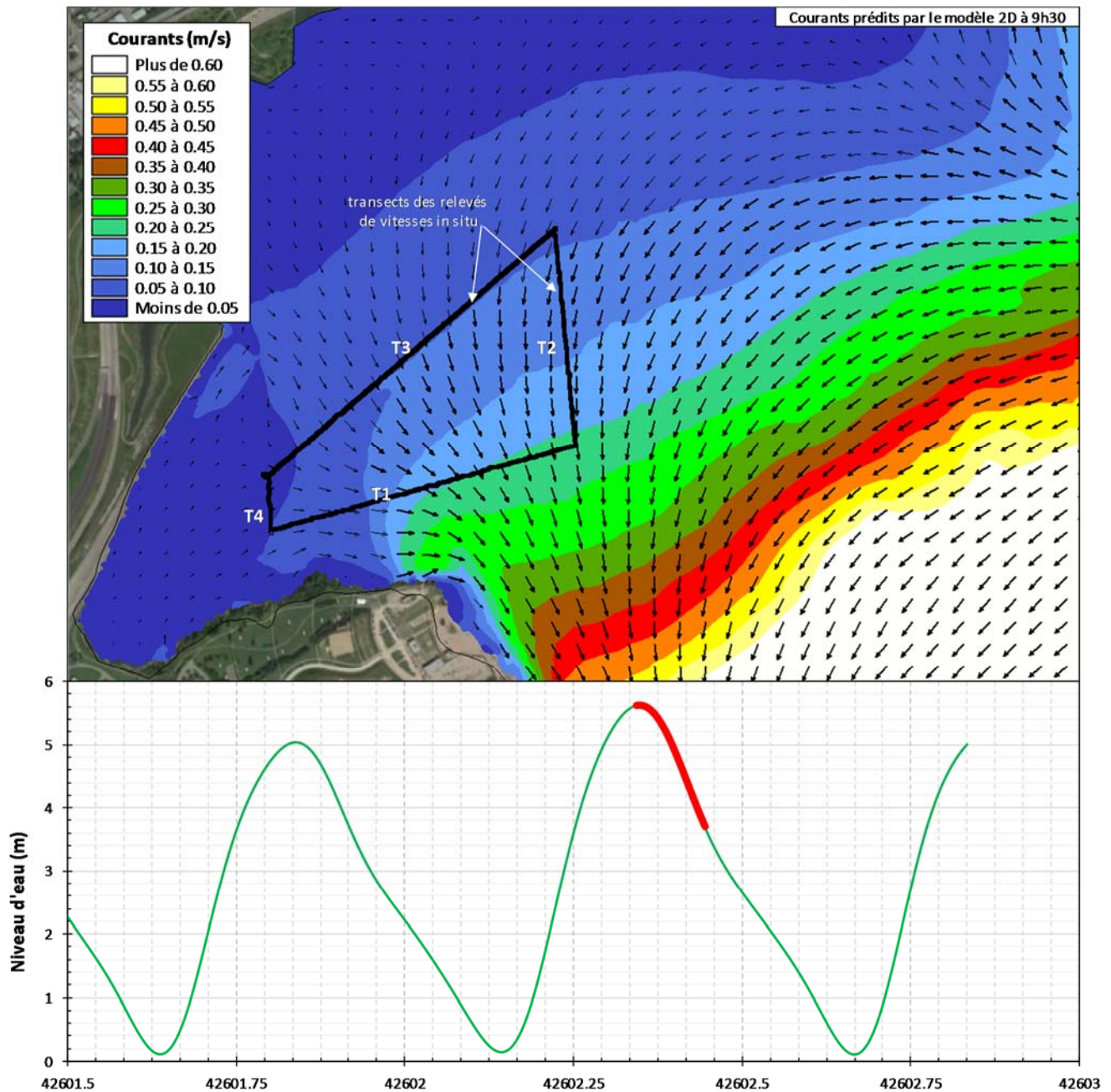


Figure B-2.0 : Positions et période des mesures des transects ADCP relevés durant la campagne de mesure d'août 2016 pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusant

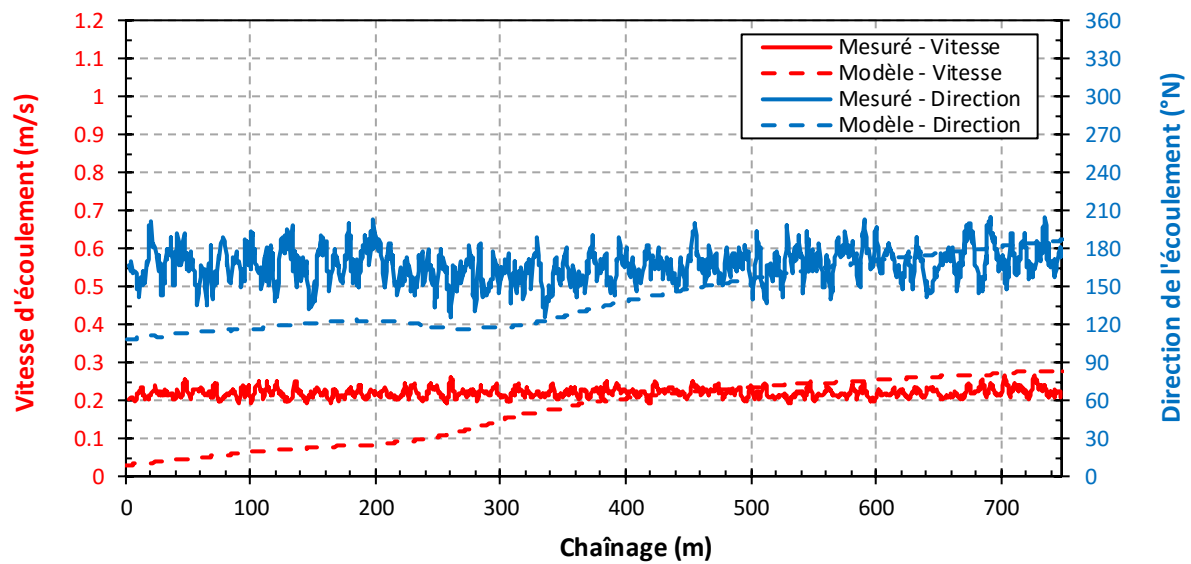


Figure B-2.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusan – Transect 1
20 août 2016 entre 8h14 et 8h39

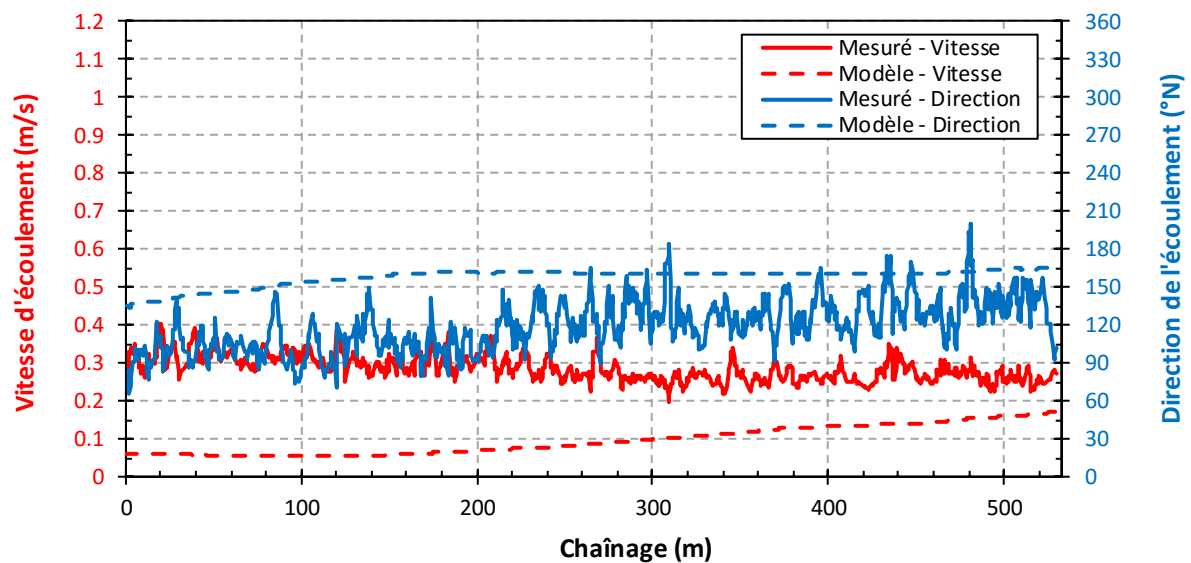


Figure B-2.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusan – Transect 2
20 août 2016 entre 9h49 et 10h05

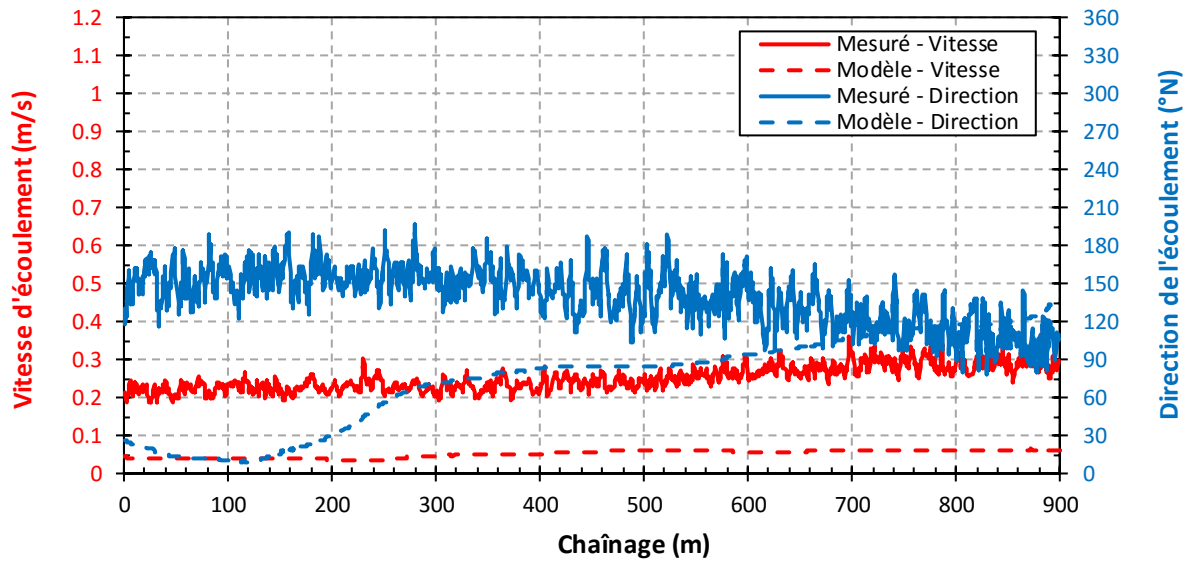


Figure B-2.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusant – Transect 3
20 août 2016 entre 10h05 et 10h36

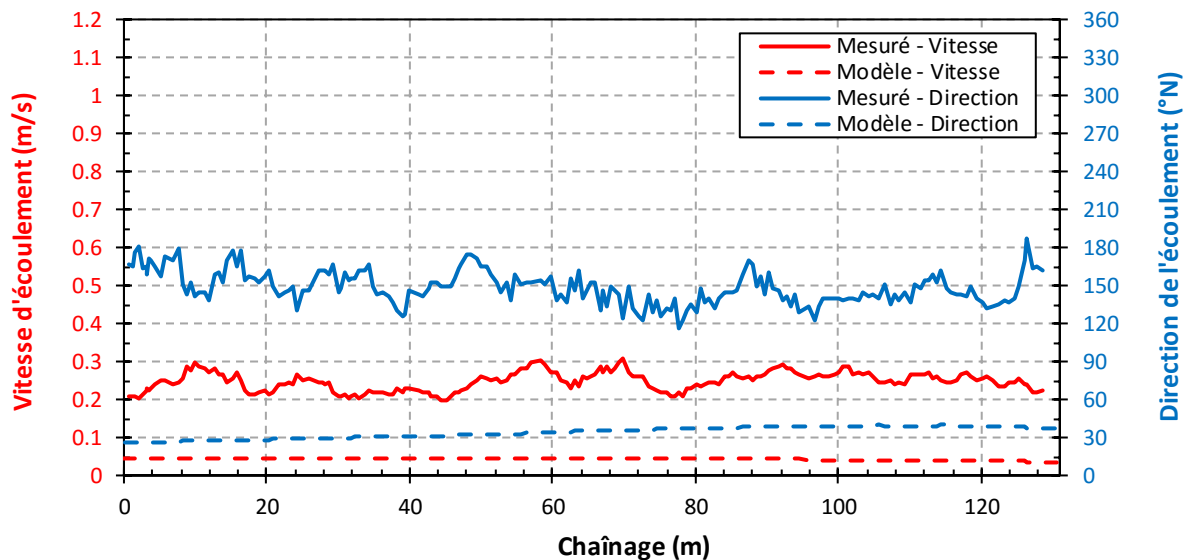


Figure B-2.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans la baie de Beauport au jusant – Transect 4
20 août 2016 entre 10h36 et 10h40

Estuaire Saint-Charles - courants de marée au flot

19 août 2016 – Relevés effectués entre 5h50 et 7h45

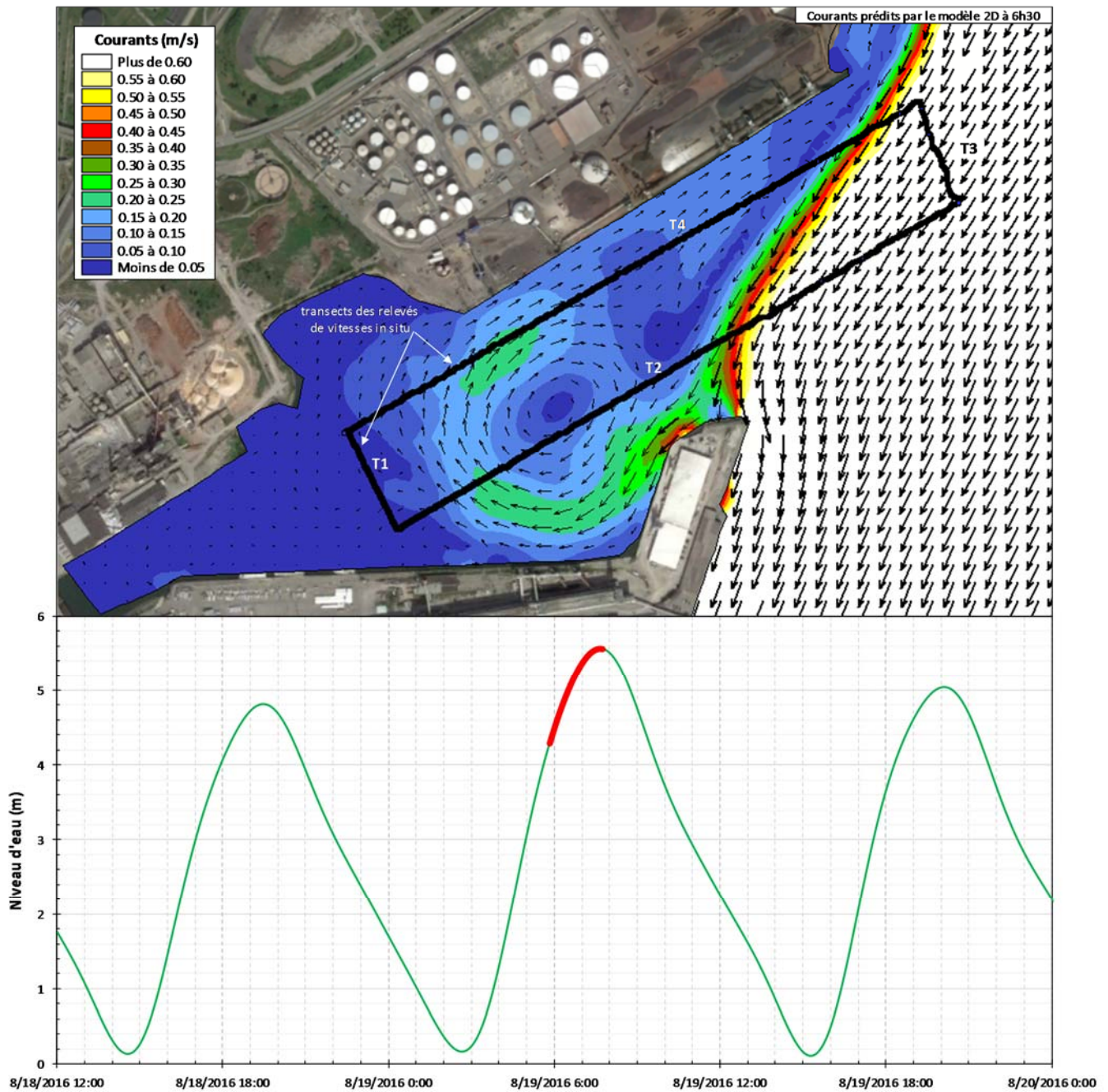


Figure B-3.0 : Positions et période des mesures des transects ADCP relevés durant la campagne de mesure d'août 2016 pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot

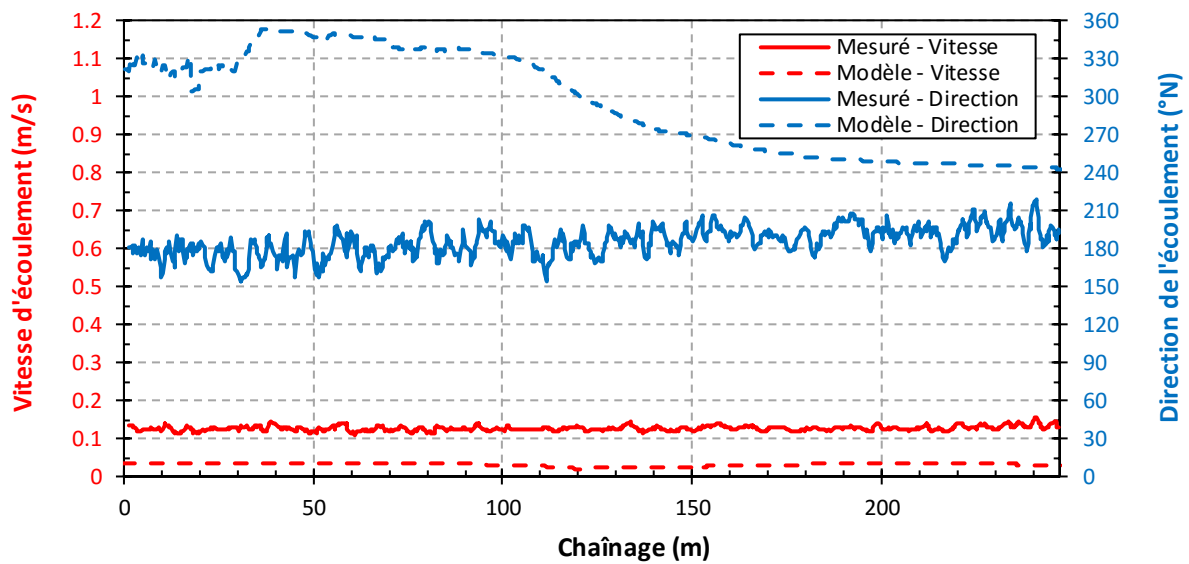


Figure B-3.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 1
19 août 2016 entre 5h50 et 6h02

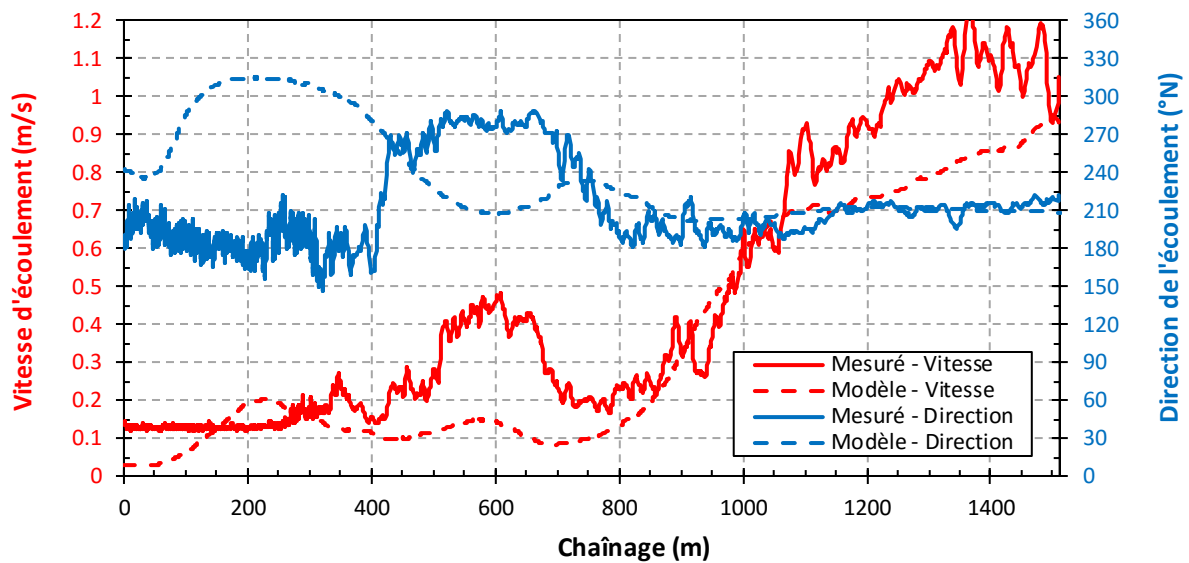


Figure B-3.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 2
19 août 2016 entre 6h02 et 6h59

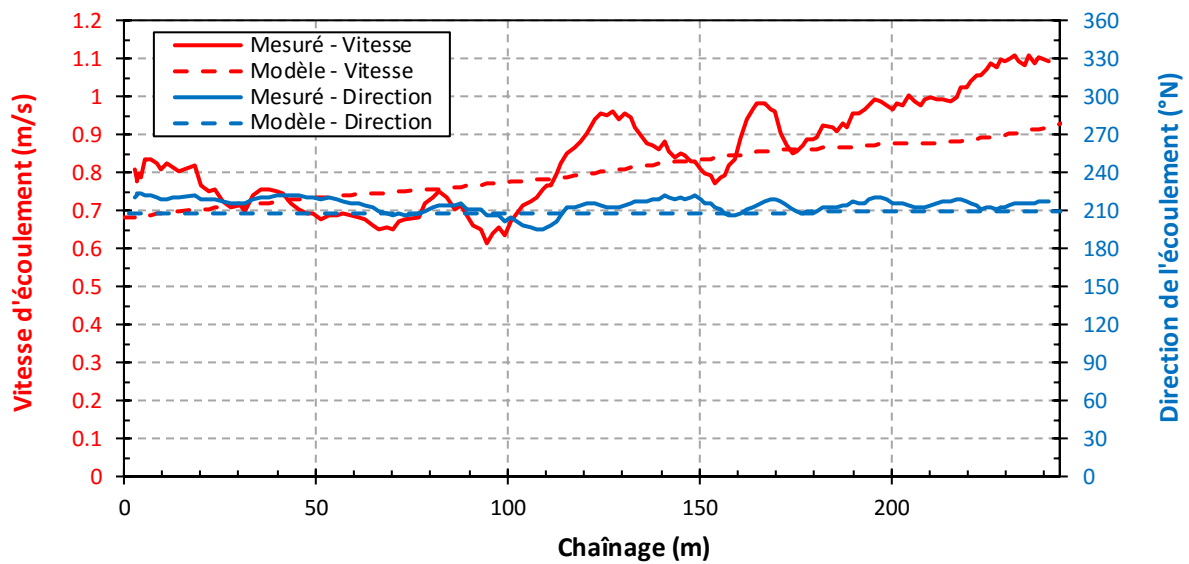


Figure B-3.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 3
19 août 2016 entre 6h59 et 7h01

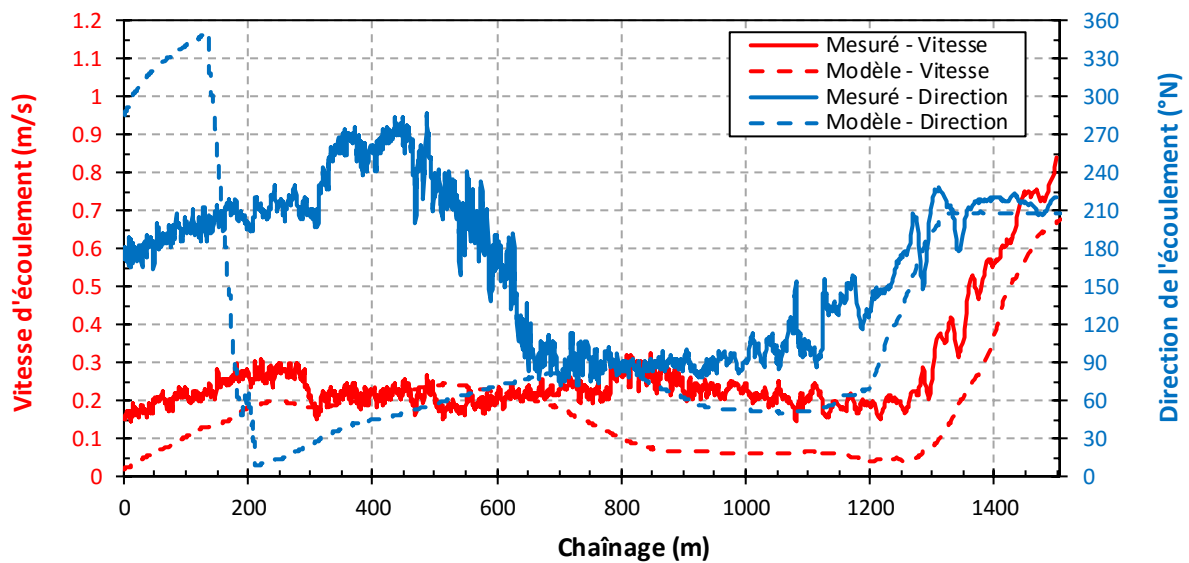


Figure B-3.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 4
19 août 2016 entre 7h02 et 7h45

Estuaire Saint-Charles - courants de marée au jusant

19 août 2016 – Relevés effectués entre 8h00 et 9h36

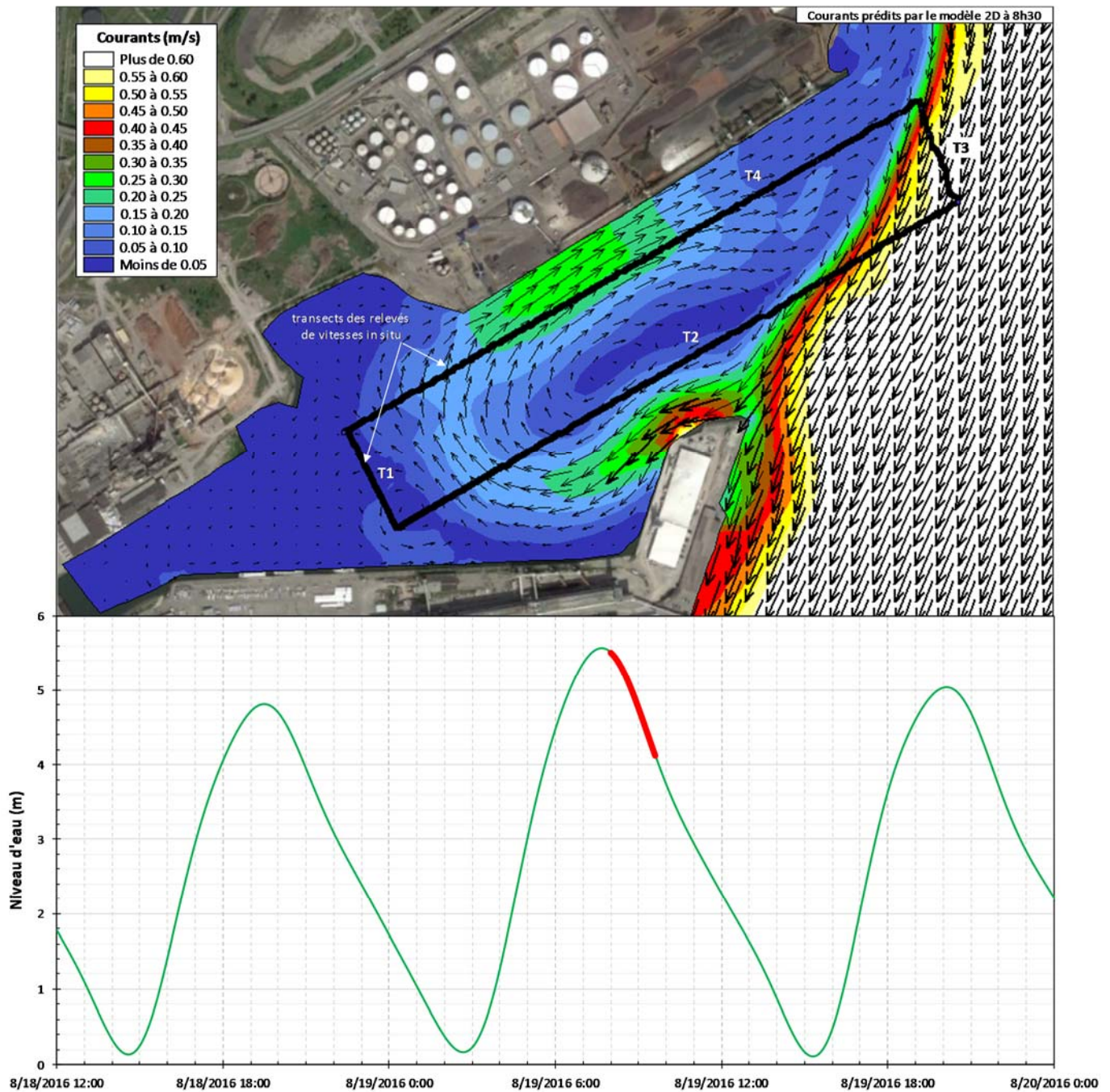


Figure B-4.0 : Positions et période des mesures des transects ADCP relevés durant la campagne de mesure d'août 2016 pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant

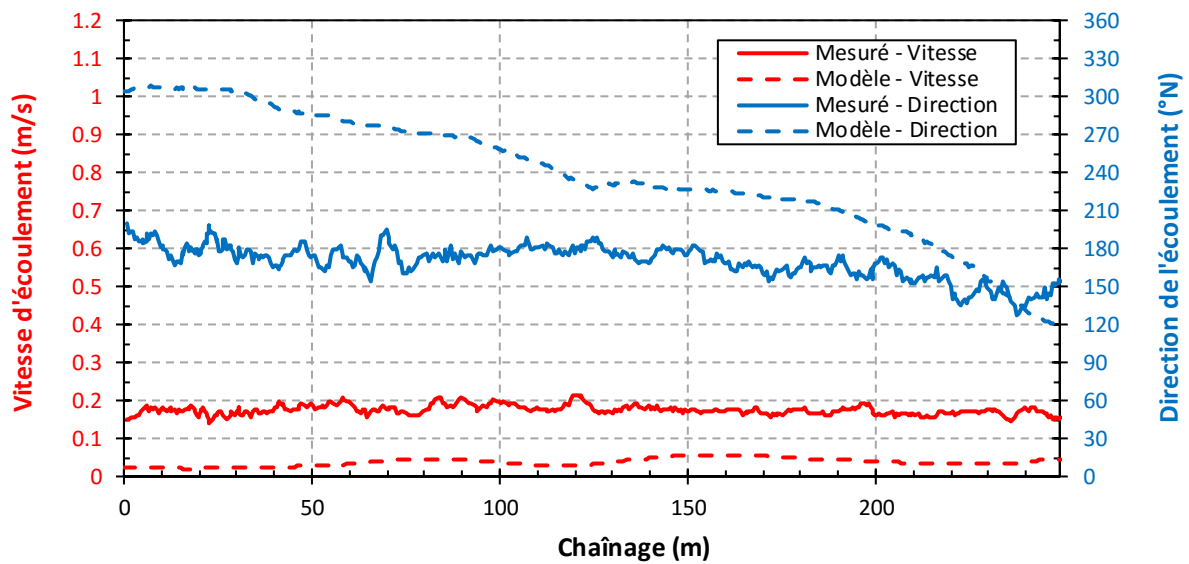


Figure B-4.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 1
19 août 2016 entre 8h00 et 8h07

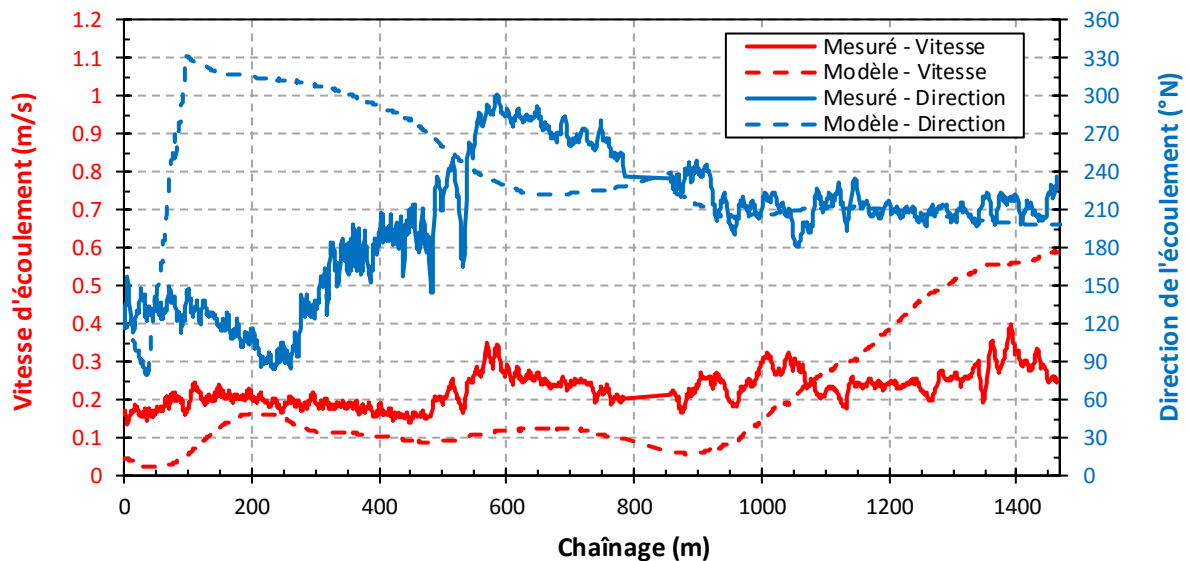


Figure B-4.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 2
19 août 2016 entre 8h07 et 8h38

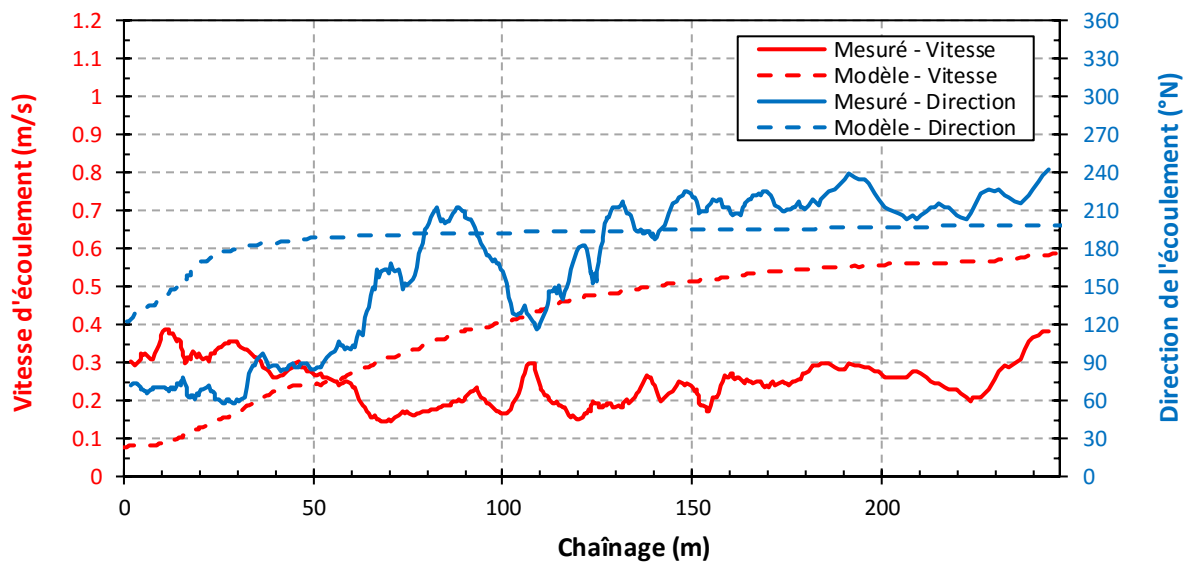


Figure B-4.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 3
19 août 2016 entre 8h38 et 8h45

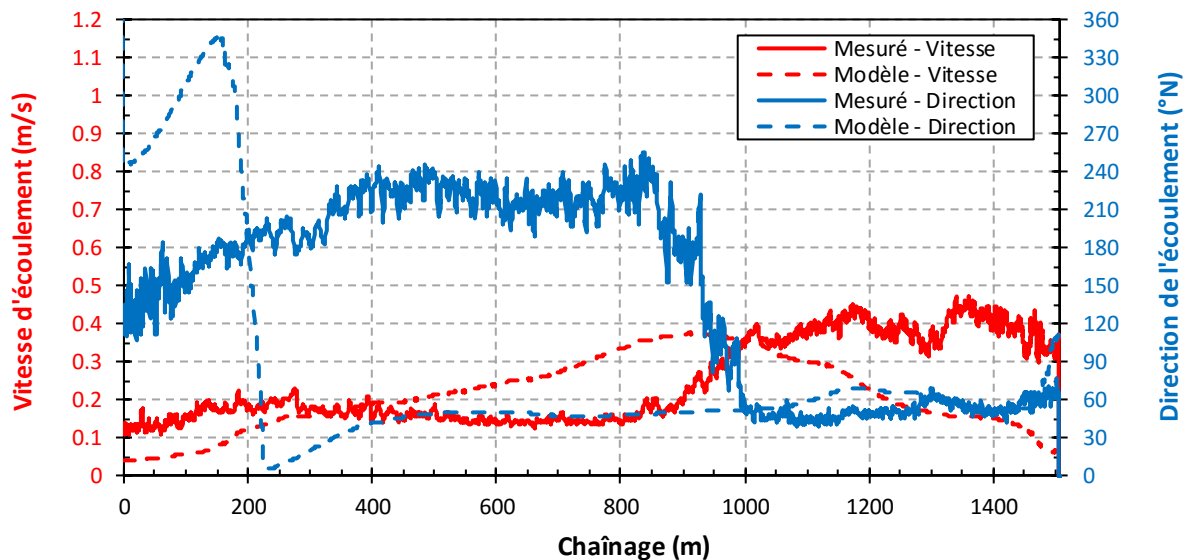


Figure B-4.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 4
19 août 2016 entre 8h45 et 9h36

ANNEXE C

VALIDATION DU MODÈLE BIDIMENSIONNEL

VUES EN PLAN

Annexe C – Validation du modèle bidimensionnel

Vues en plan

Figure C-1.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 2

Figure C-1.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 2 (suite)

Figure C-1.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 4

Figure C-1.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 4 (suite)

Figure C-2.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 2

Figure C-2.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 2 (suite)

Figure C-2.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 4

Figure C-2.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 4 (suite)

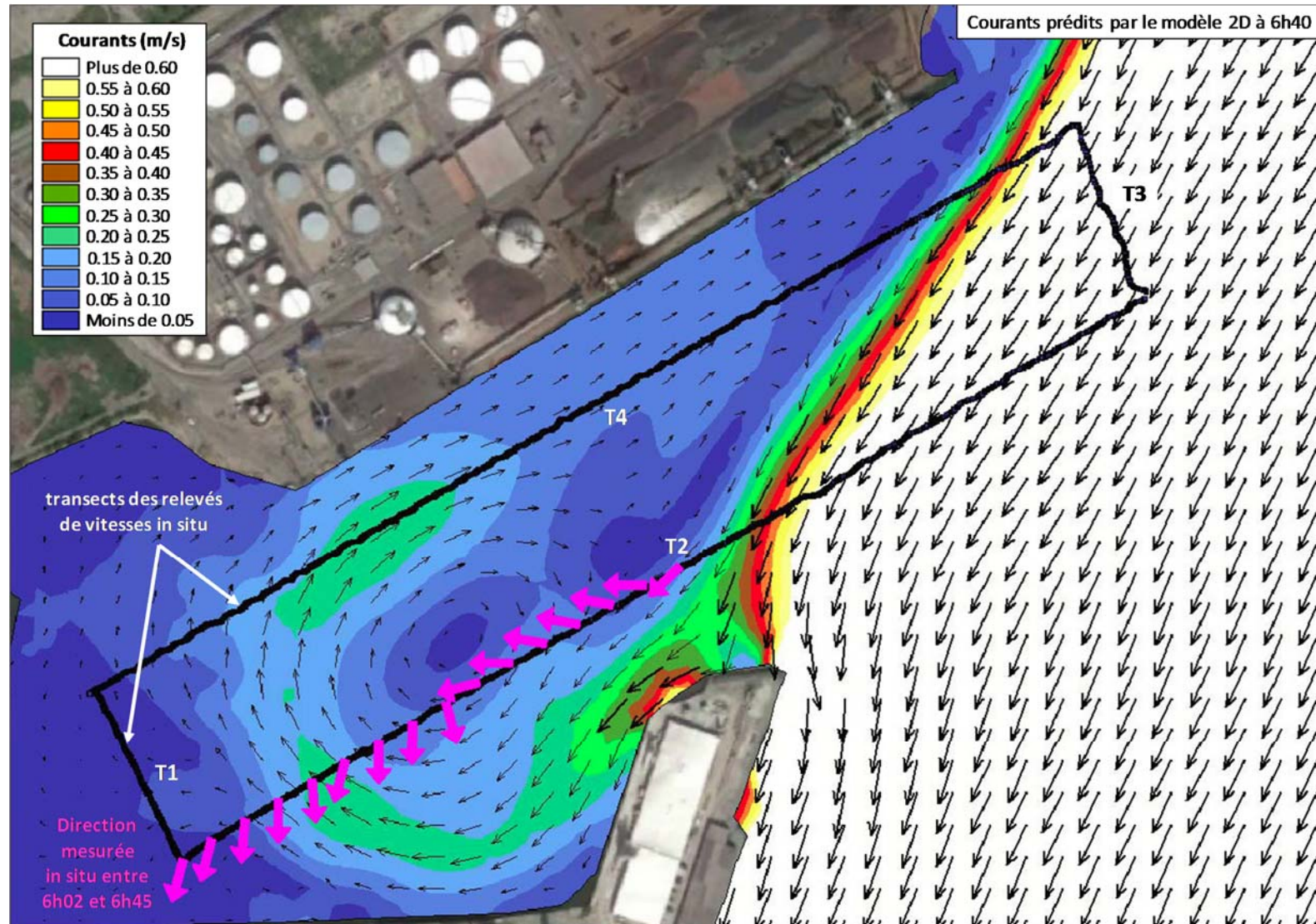


Figure C-1.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 2

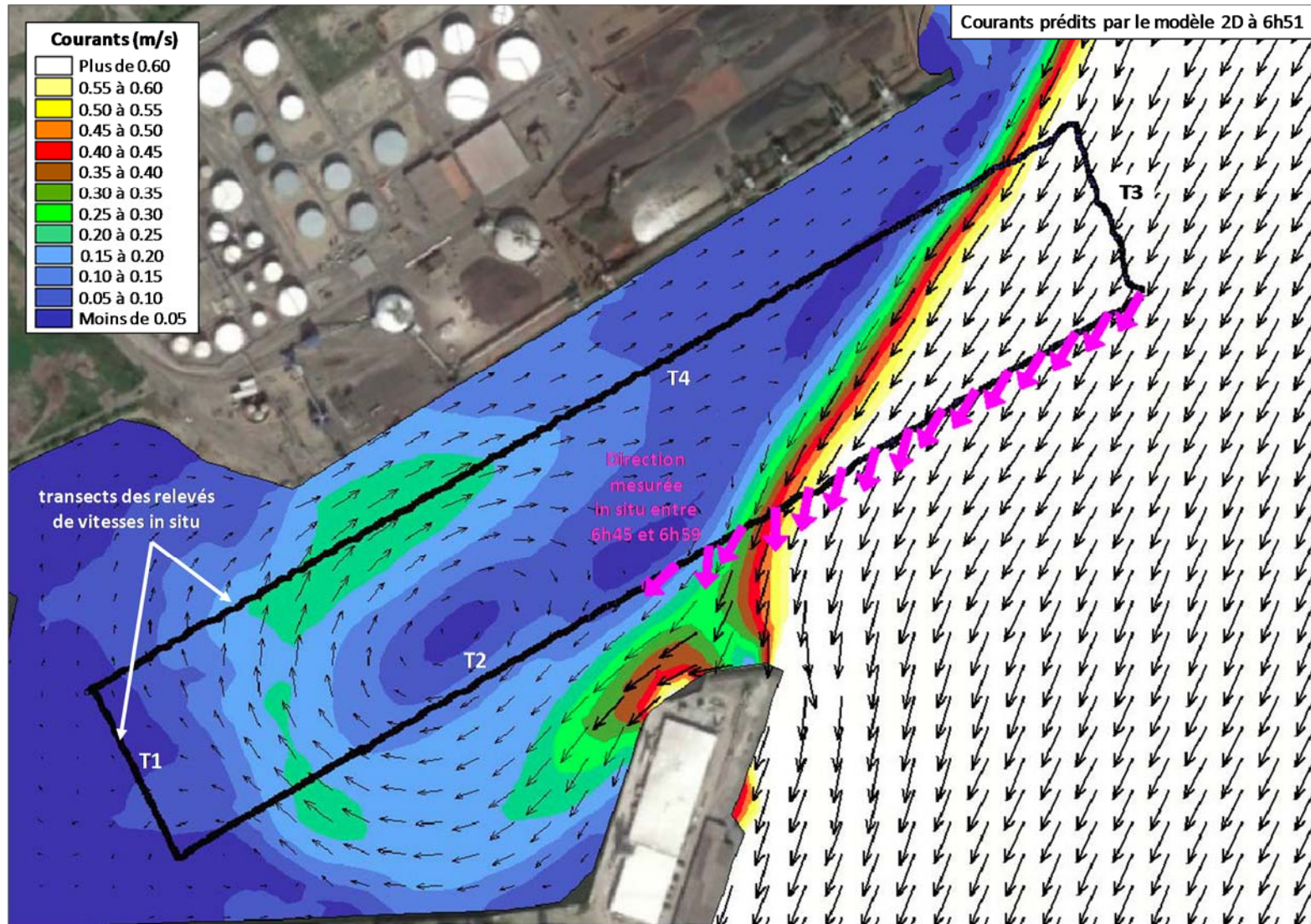


Figure C-1.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 2 (suite)

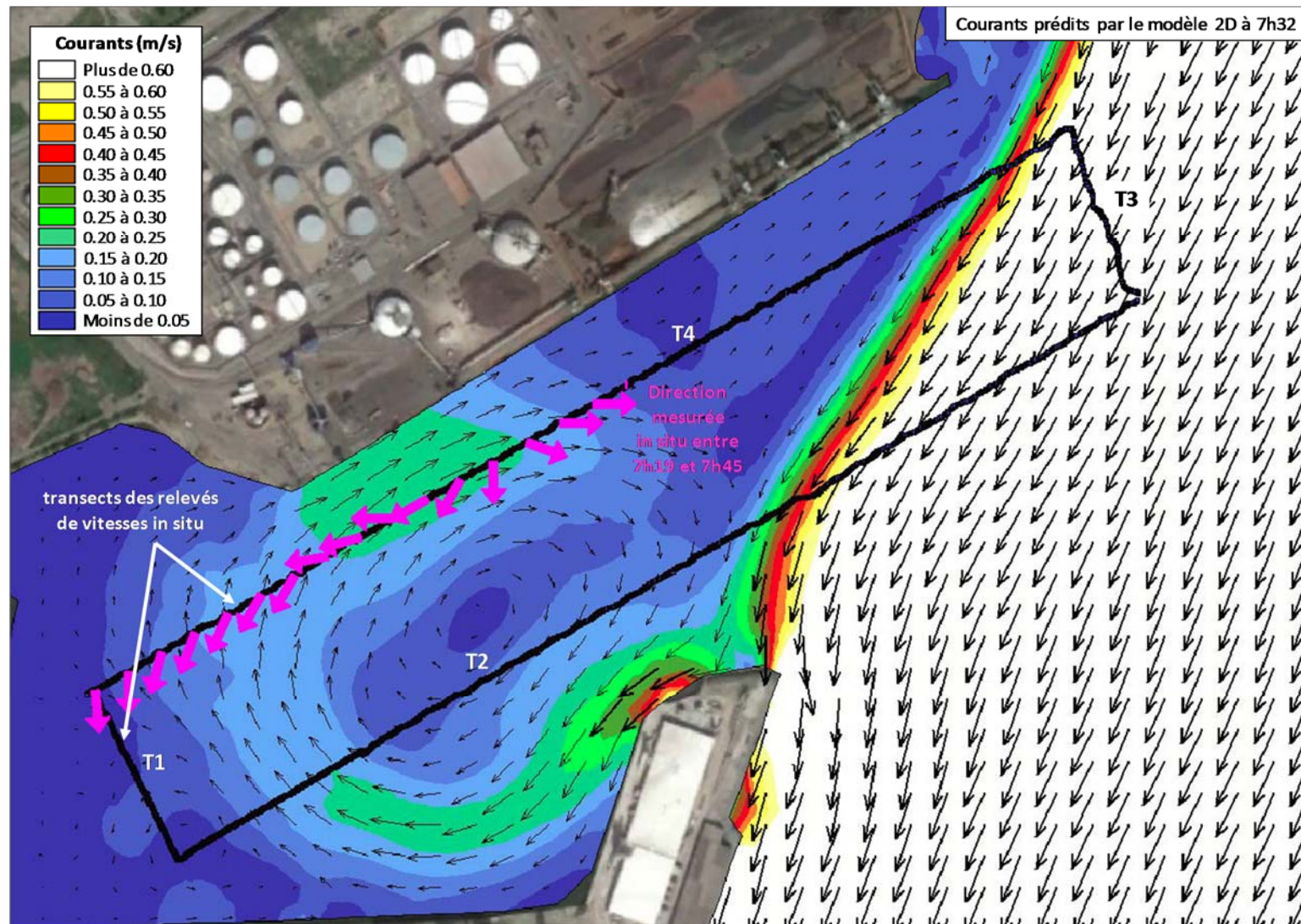


Figure C-1.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 4

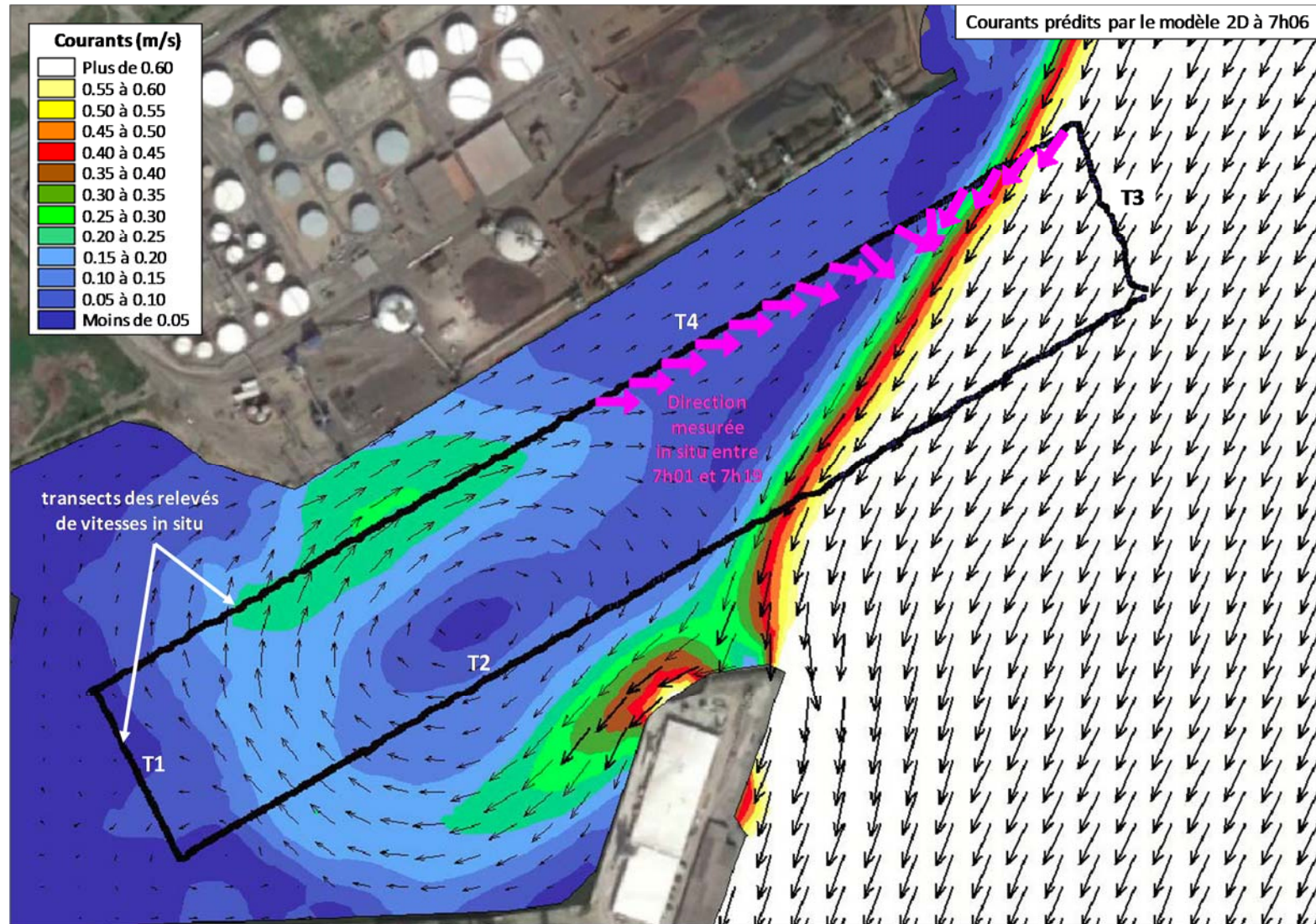


Figure C-1.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au flot – Transect 4 (suite)

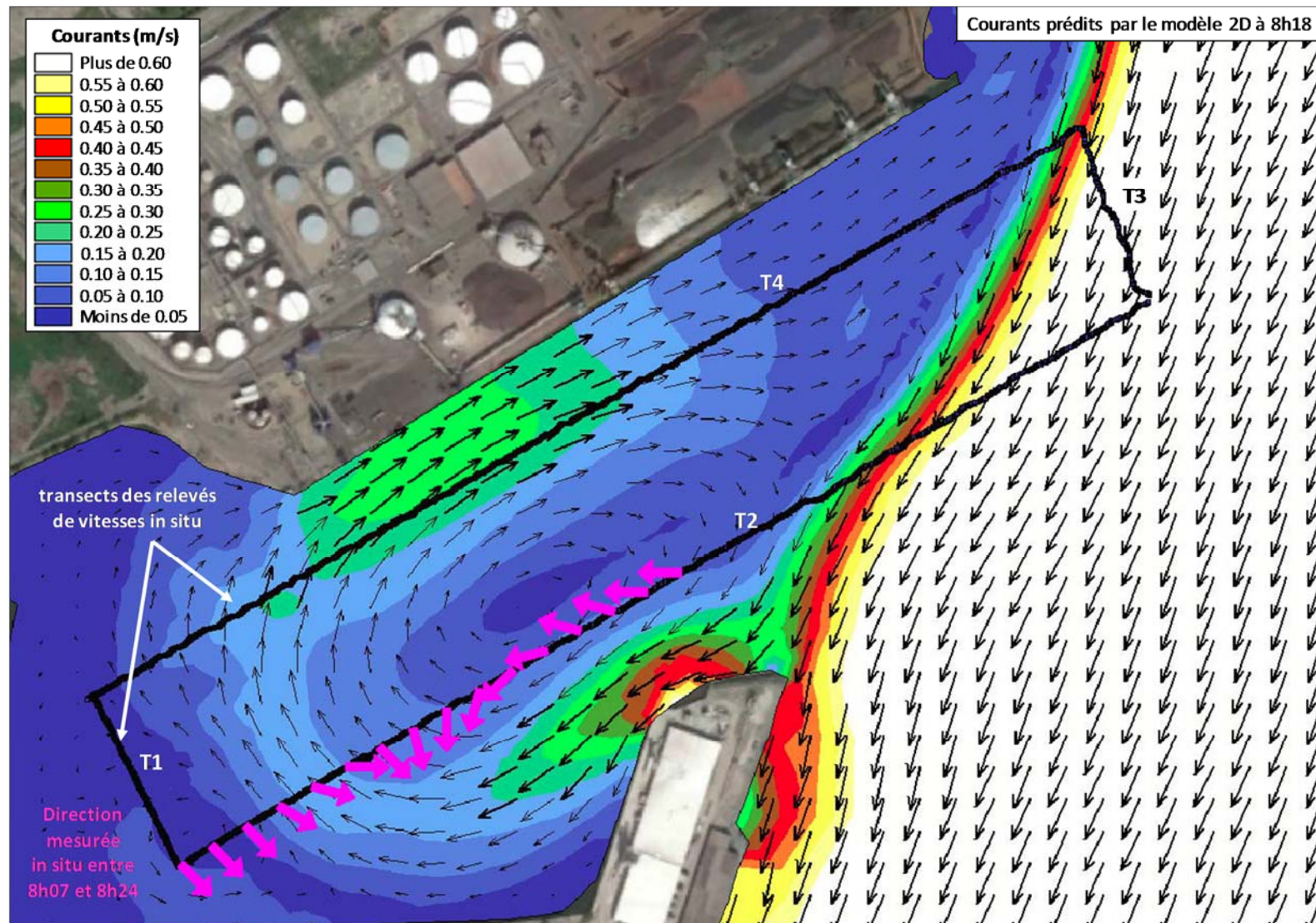


Figure C-2.1 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 2

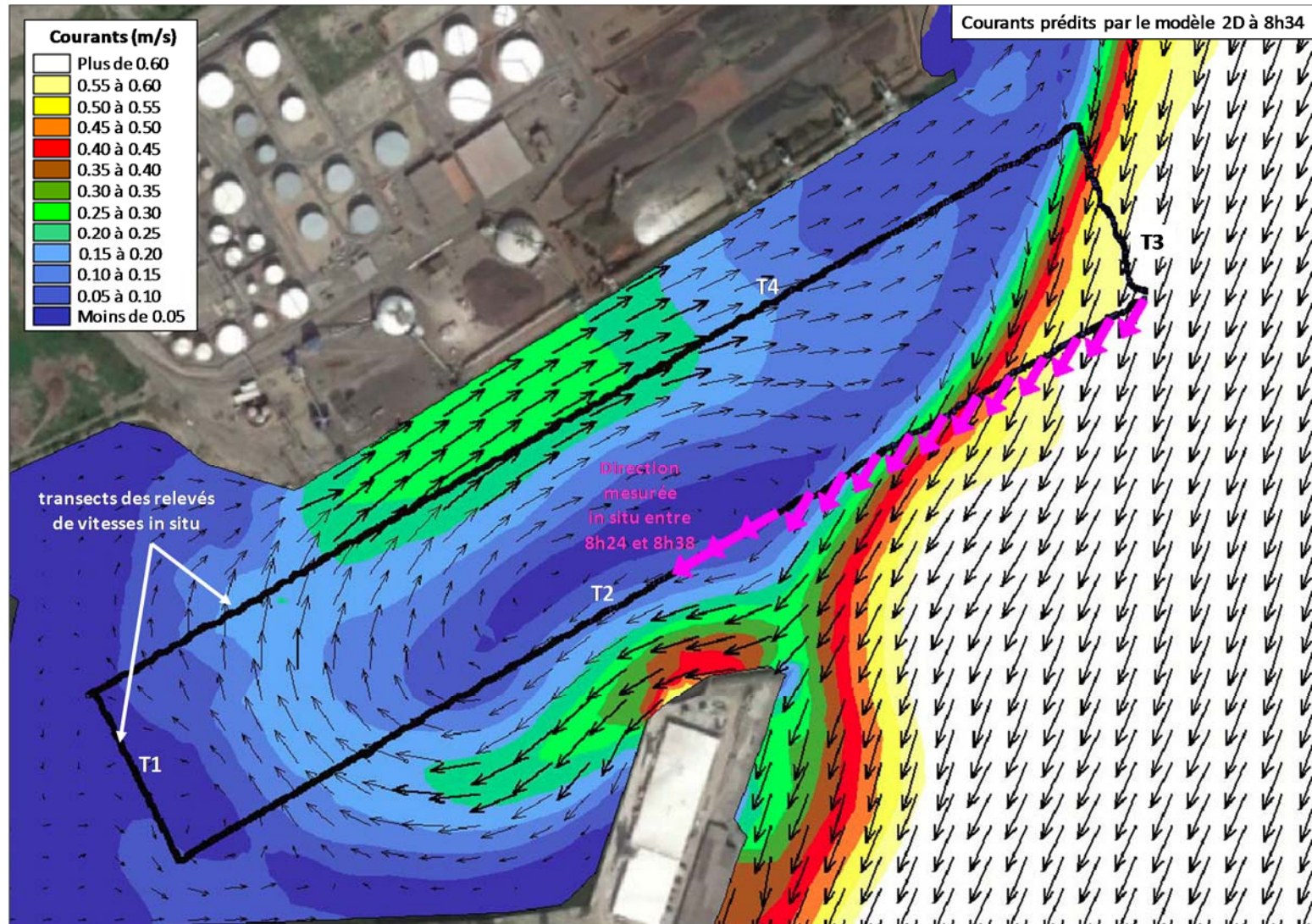


Figure C-2.2 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 2 (suite)

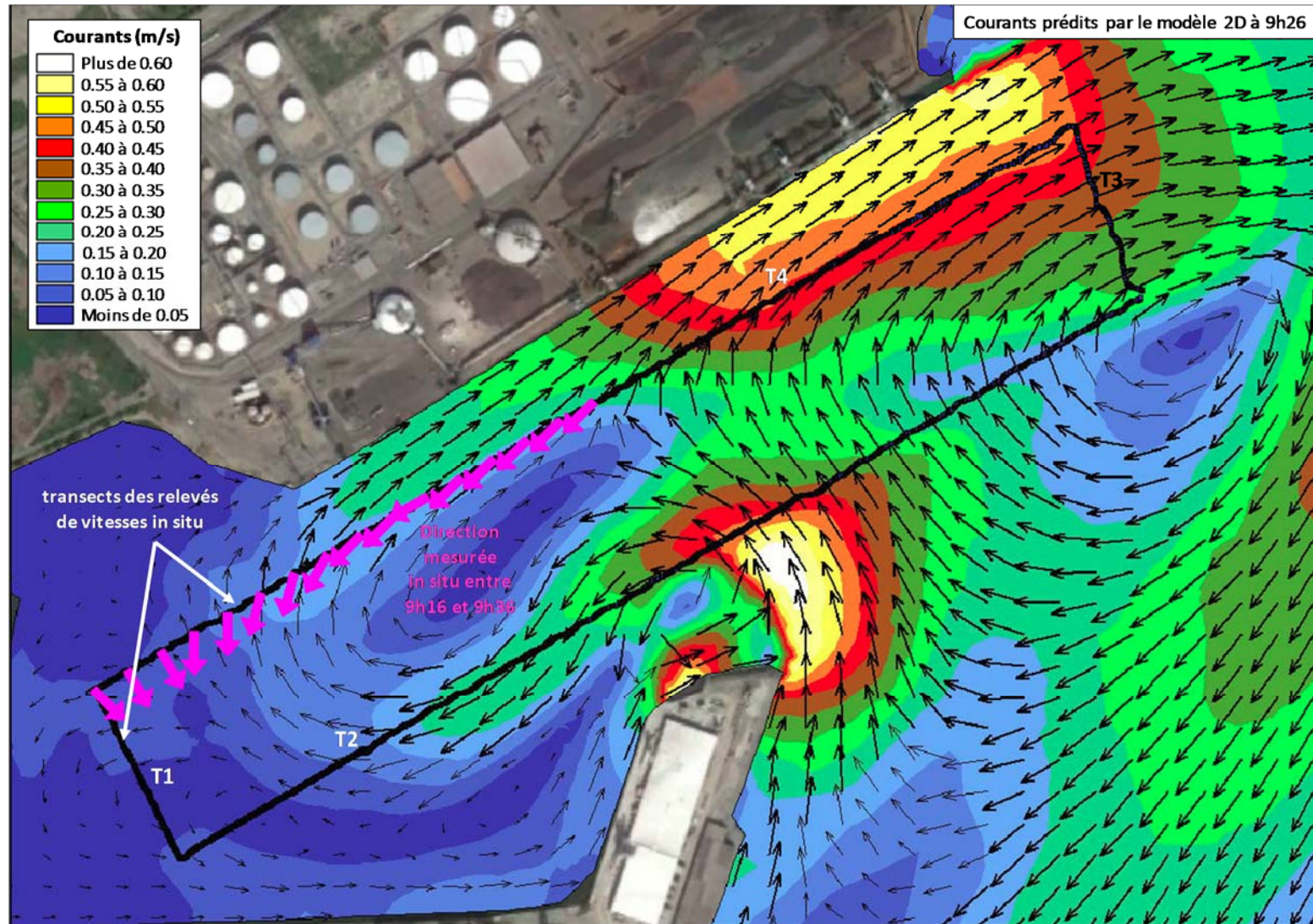


Figure C-2.3 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusan – Transect 4

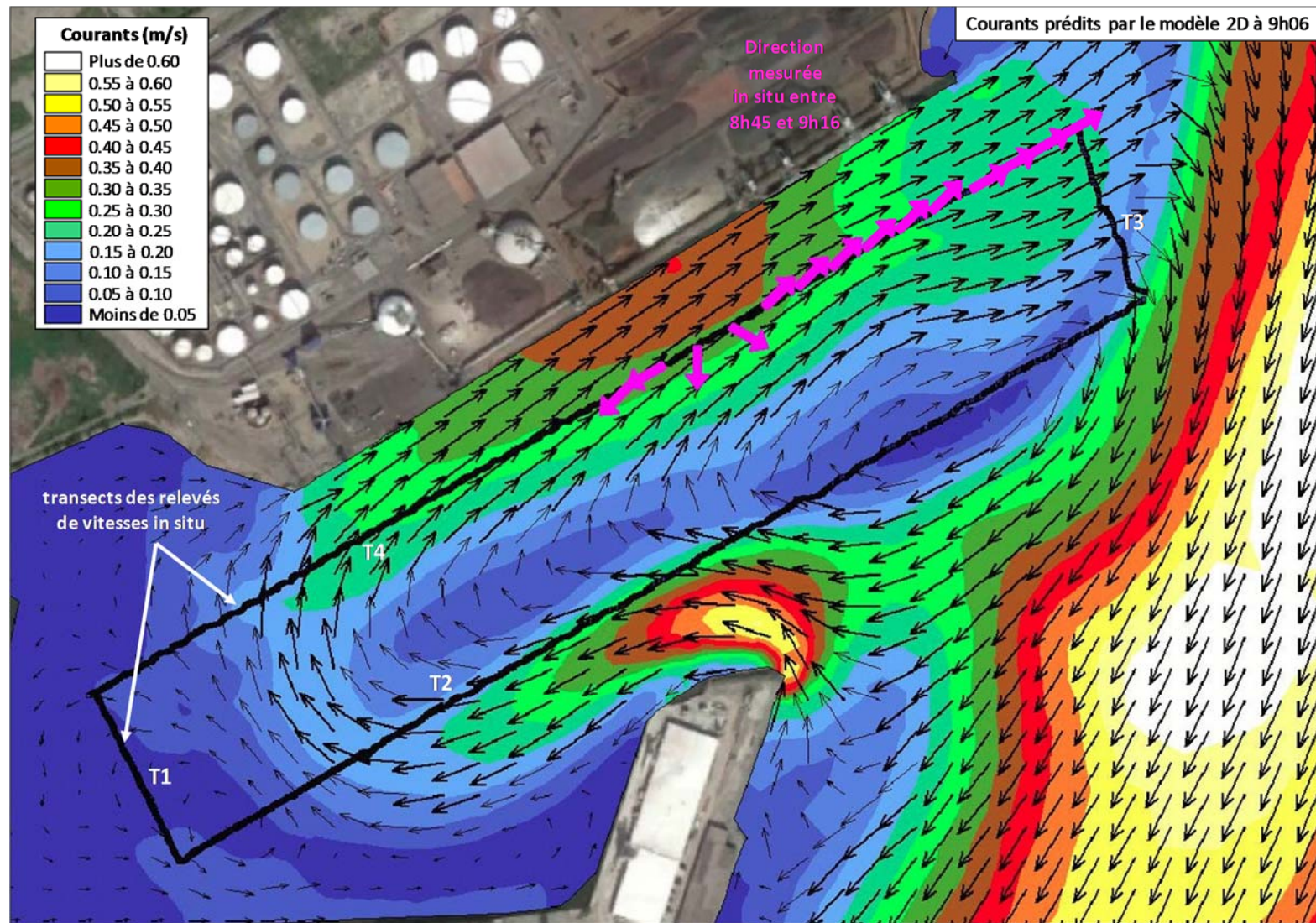


Figure C-2.4 : Validation du modèle bidimensionnel pour les courants de marée dans l'estuaire Saint-Charles au jusant – Transect 4 (suite)