

École polytechnique de Louvain

**Conception des avant-ports
d'écluses :
Modélisation physique et
numérique des écoulements au
droit des mâles ajourés**

Auteur : Geoffrey **PIERARD**

Promoteurs : Dr Ir Didier **BOUSMAR**, Dr Ir Catherine **SWARTENBROEKX**

Lecteurs : Ir Jonas **FERON**, Ir Robin **MEURICE**, Dr Ir João **PACHECO DE ALMEIDA**

Année académique 2019–2020

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Dans un premier temps, je remercie mes promoteurs Monsieur Didier BOUSMAR et Madame Catherine SWARTENBROEKX. Je les remercie de leur disponibilité, de m'avoir suivi et guidé durant toute cette année. Je les remercie aussi tout spécialement d'avoir été disponible à ma demande et d'avoir su m'aider à réorienter ce travail à la suite de la crise du *COVID-19*. Ce travail n'aurait pas pu voir le jour sans leurs précieux conseils.

Je tiens à remercier tout le personnel du *Laboratoire des Recherches Hydrauliques de Châtelet* pour leur aide dans la confection et la mise en place du modèle expérimental.

Mes remerciements vont aussi à tous ceux qui ont pris le temps de relire ce travail et qui m'ont aidé à améliorer la qualité de ce dernier.

Je voudrais également remercier toutes les personnes, en particulier ma famille et mes amis, qui m'ont aidé et soutenu lors de la réalisation de ce travail.

Pour terminer, je voudrais remercier particulièrement ma Marraine et mon Grand-Père pour tout ce qu'ils ont fait. Sans eux tout ceci n'aurait pas été possible.

Abstract

Un avant-port d'une écluse est une infrastructure permettant d'offrir des conditions de navigation favorables aux bateaux qui l'emprunteront. Lorsqu'une écluse est adjacente à un canal drainant, tel que peut l'être un barrage, des courants transversaux plus ou moins importants apparaissent à l'entrée du môle. Afin de contenir ces courants, une attention particulière au môle et notamment de sa partie ajourée doit être faite. Dans un même temps, des études réalisées par la *Direction des Recherches Hydrauliques du SPW* sur l'aménagement de nouveaux avant-ports ont mis en évidence le lien entre la fraction de rivière interceptée par l'avant-port et l'importance des courants transversaux.

Ce travail étudie l'influence de la fraction de rivière interceptée par l'avant-port et de la perméabilité du môle ajouré sur les courants présents dans l'avant-port. Une gamme de ces deux paramètres a été étudiée dans un modèle idéalisé reprenant les caractéristiques des avant-ports wallons. Ce travail se propose d'étudier les courants présents dans l'avant-port de deux manières. Tout d'abord via une modélisation expérimentale sur un modèle réduit. Puis, dans un second temps, via une simulation numérique avec le logiciel Telemac2D.

Les résultats de cette étude confirment l'influence de la fraction de rivière interceptée par l'avant-port sur les courants transversaux. Ils mettent aussi en évidence l'existence d'une perméabilité optimale en fonction la fraction de rivière interceptée permettant de réduire l'impact des courants transversaux sur la navigation.

A holding basin of a lock is an infrastructure that provides good navigational conditions for the vessels that will use it. When a lock is adjacent to a draining canal, such as a river with a dam, more or less important cross currents appear at the entrance of the guard wall. In order to contain these currents, special attention must be paid to the guard wall and in particular to its openwork part. At the same time, studies carried out by the *Hydraulic Research Department of the SPW* on the development of new holding basins have highlighted the link between the fraction of the river intercepted by the fore-port and the importance of cross currents.

This work studies the influence of the fraction of the river intercepted by the holding basin and the permeability of the guard wall on the currents present in the holding basin. A range of these two parameters was studied in an idealized model with the characteristics of the Walloon holding basins. This work proposes to study the currents present in the holding basin in two ways. First of all, with an experimental modelling on a reduced model. Then, in a second step, with a numerical simulation with the Telemac2D software.

The results of this study confirm the influence of the fraction of the river intercepted by the holding basin on the cross currents. They also highlight the existence of optimal permeability as a function of the fraction of river intercepted, making it possible to reduce the impact of cross currents on navigation.

Table des matières

REMERCIEMENTS	1
ABSTRACT	3
TABLE DES MATIERES	5
LISTE DES FIGURES	9
LISTE DES TABLEAUX	13
1 SUJET DE L'ETUDE	15
1.1 INTRODUCTION.....	15
1.2 CONTEXTE ET ENJEUX.....	15
1.3 STRUCTURE DU RAPPORT	18
2 ÉTAT DE L'ART	19
2.1 CLASSIFICATION EUROPEENNE DES CONVOIS	19
2.2 DESCRIPTION D'UN AVANT-PORT.....	20
2.2.1 Définition	20
2.2.2 Géométrie.....	20
2.2.3 Conditions de navigation au sein d'un avant-port.....	21
2.3 VITESSE ET CHAMP DE VITESSES D'UN ECOULEMENT	24
2.4 ÉTUDE DE L'US ARMY CORPS OF ENGINEERS	25
2.4.1 Objectifs des études.....	25
2.4.2 Résultats de l'étude	27
2.5 OBJECTIFS DU MEMOIRE	30
2.6 METHODOLOGIE.....	30
3 MODELISATION EXPERIMENTALE	31
3.1 INTRODUCTION.....	31
3.2 PRESENTATION DU MODELE EXPERIMENTAL.....	31
3.2.1 Géométrie du modèle	31
3.2.2 Géométrie du môle.....	33
3.2.3 Pompes	35
3.2.4 Mesure du courantométrie sur le modèle expérimental	35
3.2.5 Description de l'automate	35
3.2.6 Théodolite.....	36
3.2.7 Niveau laser et émetteur laser	36
3.2.8 Supports de l'automate	37
3.2.9 Supports de la passerelle amont.....	37
3.2.10 Fuites d'eau	38
3.3 INSTRUMENTS DE MESURES.....	39
3.3.1 Sonde de vitesse électromagnétique	39
3.3.2 Capteur de niveau à ultrasons	42
3.3.3 Débitmètre électromagnétique	42
3.3.4 HydroCAP3.....	42
3.4 ESSAIS PROGRAMMES ET EFFECTUES	44
3.5 MESURES REALISEES	45
3.5.1 Essais préliminaires	45
3.5.2 Essai profils verticaux de vitesse.....	46
3.5.3 Essais APO50M100.....	48
3.5.4 Essais APO50M100 avec la nouvelle sonde.....	49
3.5.5 Essais APO50M033.....	52
3.6 CONCLUSION DE LA MODELISATION EXPERIMENTALE	54

4	MODELISATION NUMERIQUE	55
4.1	INTRODUCTION.....	55
4.2	CONTEXTE	55
4.3	GEOMETRIES ETUDIEES.....	55
4.4	LE <i>PRE-PROCESSING</i>	56
4.4.1	<i>Blue Kenue</i>	56
4.4.2	<i>Modélisation des géométries et génération des maillages</i>	56
4.5	LA SIMULATION NUMERIQUE	58
4.5.1	<i>Telemac2D</i>	58
4.5.2	<i>Aspect théorique</i>	58
4.5.3	<i>Condition initiale</i>	59
4.5.4	<i>Conditions limites</i>	59
4.5.5	<i>Paramètres de la simulation</i>	60
4.5.6	<i>Validation</i>	61
4.6	LE <i>POST-PROCESSING</i>	64
4.7	CONCLUSION DE LA MODELISATION NUMERIQUE	64
5	ANALYSE DES VITESSES	65
5.1	INTRODUCTION.....	65
5.2	ISSUS DES MODELISATIONS EXPERIMENTALES ET NUMERIQUES.....	65
5.2.1	<i>Observation des champs de vitesses</i>	65
5.2.2	<i>Analyse des profils de vitesses</i>	65
5.3	PROFILS DE VITESSES ISSUS DE LA LITTERATURE	69
5.3.1	<i>Ampsin-Neuville</i>	69
5.3.2	<i>Auvelais</i>	73
6	ANALYSE DES FORCES ET DES MOMENTS DE FORCES	76
6.1	INTRODUCTION.....	76
6.2	DEMARCHE.....	76
6.3	PROFILS DES FORCES ET DES MOMENTS DE FORCES.....	77
6.4	COMPARAISON DES EFFETS ENTRE LES DIFFERENTES GEOMETRIES.....	83
7	PERSPECTIVES.....	85
7.1	MODELISATION	85
7.2	PARAMETRES	85
8	CONCLUSION	86
9	BIBLIOGRAPHIE	87
10	ANNEXES.....	89
10.1	ANNEXES DU CHAPITRE SUJET DE L'ETUDE	89
10.2	ANNEXES DU CHAPITRE ÉTAT DE L'ART	89
10.2.1	<i>Tableau des configurations modélisées par STOCKSTILL</i>	89
10.3	ANNEXES DU CHAPITRE MODELISATION EXPERIMENTALE	90
10.3.1	<i>Plan du modèle expérimental</i>	90
10.3.2	<i>Photos du modèle expérimentale</i>	91
10.3.3	<i>Plans des supports de l'automate et de la passerelle</i>	94
10.3.4	<i>Planning de la modélisation physique</i>	95
10.3.5	<i>Référencement des erreurs dues au théodolite</i>	96
10.3.6	<i>Validation des essais à partir du débit</i>	98
10.3.7	<i>Moyennes glissantes et écart-types calculés</i>	99
10.3.8	<i>Résultats des essais AP050M100 avec l'ancienne sonde</i>	100
10.3.9	<i>Résultats des essais avec la nouvelle sonde</i>	101

10.4	ANNEXES DU CHAPITRE MODELISATION NUMERIQUE	102
10.4.1	<i>Exemple de steering file pour la configuration AP050M100</i>	102
10.4.2	<i>Comparaison des vitesses calculés avec mesure sur modèle physique -AP050M100</i>	104
10.4.1	<i>Comparaison des vitesses calculés avec mesure sur modèle physique -AP050M033</i>	106
10.5	ANNEXES DU CHAPITRE ANALYSE DES VITESSES	108
10.5.1	<i>Affichage des champs de vitesses</i>	108
10.5.2	<i>Comparaison des profils et gradients de vitesses</i>	123
10.5.3	<i>Géométries de môle étudiées pour Ampsin-Neuville</i>	125
10.5.4	<i>Géométries de môles étudiées pour Auvélais</i>	126
11	ANNEXE NUMERIQUE	127

Liste des Figures

FIGURE 1-1 : REPARTITION DU TRANSPORT TERRESTRE DE FRET EN WALLONIE [2].....	15
FIGURE 2-1 : DESIGN D'UN AVANT-PORT A UN SEUL SAS D'ECLUSE [9]	21
FIGURE 2-2 : PHENOMENE D'ENFONCEMENT DYNAMIQUE [10]	22
FIGURE 2-3 : PLAN D'UN AVANT-PORT EN AMONT D'UNE ECLUSE (SCHEMA)	23
FIGURE 2-4 : COUPE LONGITUDINALE D'UN AVANT-PORT (SCHEMA)	23
FIGURE 2-5 : COUPE TRANSVERSALE D'UN AVANT-PORT (SCHEMA)	23
FIGURE 2-6 : SCHEMA DE LA GEOMETRIE DU MODELE PHYSIQUE DE STOCKSTILL [11]	25
FIGURE 2-7 : DISTRIBUTION DE VITESSES TRANSVERSALEMENT À L'AVANT-PORT, STATION 4800 [11].....	26
FIGURE 2-8 : DISTRIBUTION DE VITESSES TRANSVERSALEMENT À L'AVANT-PORT, STATION 1920 [11].....	26
FIGURE 2-9 : DISTRIBUTION DE VITESSES TRANSVERSALEMENT À L'AVANT-PORT, STATION 1015 [11].....	26
FIGURE 2-10 : DISTRIBUTION DE VITESSES TRANSVERSALEMENT À L'AVANT-PORT, STATION 2760 [11].....	26
FIGURE 2-11 : DISTRIBUTION DE VITESSES TRANSVERSALEMENT À L'AVANT-PORT, STATION 1265 [11].....	26
FIGURE 2-12 : DISTRIBUTION DE VITESSES TRANSVERSALEMENT À L'AVANT-PORT, STATION 765 [11].....	26
FIGURE 2-13 : DISTRIBUTION DE VITESSES TRANSVERSALEMENT À L'AVANT-PORT, STATION 515 [11].....	27
FIGURE 2-14 : DISTRIBUTION DE VITESSES TRANSVERSALEMENT À L'AVANT-PORT, STATION 265 [11].....	27
FIGURE 2-15 : DIMENSIONS D'UN CONVOI 15 BARGES [14]	27
FIGURE 2-16 : CHAMP DE VITESSE DE LA CONFIGURATION "TYPE 5" [11]	28
FIGURE 2-17 : COMPARAISON DES FORCES LONGITUDINALES ET TRANSVERSALES [11]	28
FIGURE 2-18 : GRAPHE DES FORCES MAXIMALES SELON LE RAPPORT M [11]	29
FIGURE 3-1 : PHOTO DE LA BERGE MOBILE	32
FIGURE 3-2 : PHOTO DU SOUS-BASSIN AMONT.....	33
FIGURE 3-3 : PLANS DES MOLES RETENUS	34
FIGURE 3-4 : COUPES DES MOLES RETENUS	34
FIGURE 3-5 : VUE 3D DES SUPPORTS DE L'AUTOMATE	37
FIGURE 3-6 : VUE 3D DES SUPPORTS DE LA PASSERELLE AMONT	38
FIGURE 3-7 : CYCLE DE LA VARIATION DE LA HAUTEUR DU PLAN D'EAU & POSITIONS DES FUITES.....	38
FIGURE 3-8 : PHOTO DE LA SONDE P-EMS 30 [17].....	39
FIGURE 3-9 : EXEMPLE D'UNE ANOMALIE MESUREE I	40
FIGURE 3-10 : EXEMPLE D'UNE ANOMALIE MESUREE II.....	40
FIGURE 3-11 : EXEMPLE D'UNE ANOMALIE MESUREE III.....	41
FIGURE 3-12 : ALGORITHME DE DEPLACEMENT DU ROBOT AUTOMATE	42
FIGURE 3-13 : PRE-ESSAIS - CHAMP DE VITESSE MESURE I.....	45
FIGURE 3-14 : PRE-ESSAIS - CHAMP DE VITESSE MESURE II.....	46
FIGURE 3-15 : PRE-ESSAIS - CHOIX DES POINTS POUR MESURES PROFILS VERTICAUX DE VITESSE	46
FIGURE 3-16 : PROFILS VERTICAUX DE VITESSE DES 4 POINTS RETENUS.....	47
FIGURE 3-17 : EXEMPLE DE MOYENNE GLISSANTE.....	48
FIGURE 3-18 : DIAGRAMME EN BOITE DES ECART-TYPES CALCULES.....	48
FIGURE 3-19 : MAILLAGE PLAN UTILISE	49
FIGURE 3-20 : CHAMP DE VITESSES MESURE I - AP050M100 - 10/04/20.....	50
FIGURE 3-21 : ECART-TYPE SUR LES VITESSES SCALAIRES - AP050M100	51
FIGURE 3-22 : ECART-TYPE SUR LES VITESSES LONGITUDINALES - AP050M100.....	51
FIGURE 3-23 : ECART-TYPE SUR LES VITESSES TRANSVERSALES - AP050M100	51
FIGURE 3-24 : ECART-TYPE SUR L'ORIENTATION DES VITESSES - AP050M100.....	52
FIGURE 3-25 : CHAMP DE VITESSES MESURE I - AP050M033 - 27/04/20.....	52
FIGURE 3-26 : ECART-TYPE SUR LES VITESSES SCALAIRES - AP050M100	53
FIGURE 3-27 : ECART-TYPE SUR LES VITESSES LONGITUDINALES - AP050M033.....	53
FIGURE 3-28 : ECART-TYPE SUR LES VITESSES TRANSVERSALES - AP050M033	53
FIGURE 3-29 : ECART-TYPE SUR L'ORIENTATION DES VITESSES - AP050M033.....	54
FIGURE 4-1 : DENSITE DU MAILLAGE UTILISE - CONFIGURATION AP050M100	56
FIGURE 4-2 : ZOOM SUR LA DENSITE DU MAILLAGE UTILISE - CONFIGURATION AP050M100	57
FIGURE 4-3 : REPRESENTATION DES FRONTIERES DU MODELE - CONFIGURATION AP050M100	57
FIGURE 4-4 : ANOMALIE OBSERVEE LORSQUE LES CONDITIONS LIMITEES ETAIENT APPLIQUEES DE FAÇON STRICTE	59
FIGURE 4-5 : SUPPRESSION DE L'ANOMALIE EN APPLIQUANT LES CONDITIONS LIMITEES PAR LA METHODE DE THOMSON	60
FIGURE 4-6 : FLUCTUATION DES VITESSES PENDANT LA SIMULATION - CONFIGURATION AP050M100	60

FIGURE 4-7 : FLUCTUATION DES VITESSES PENDANT LA SIMULATION - CONFIGURATION AP050M000	61
FIGURE 4-8 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE TRANSVERSALE X=12000 [MM]	62
FIGURE 4-9 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE TRANSVERSALE X=14000 [MM]	62
FIGURE 4-10 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE TRANSVERSALE X=16000 [MM]	62
FIGURE 4-11 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE TRANSVERSALE X=18000 [MM]	63
FIGURE 5-1 : PROFILS DE VITESSES SUR COUPE LONGITUDINALE - AP050M100.....	66
FIGURE 5-2 : POSITION DES PROFILS DE VITESSES SUR L'INTERPOLATION DU CHAMP DE VITESSE SCALAIRE – AP050M100	66
FIGURE 5-3 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSES SELON AP AVEC M100.....	67
FIGURE 5-4 : COMPARAISON DES GRADIENTS DE VITESSES SELON AP AVEC M100	67
FIGURE 5-5 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSES SELON AP AVEC M033.....	68
FIGURE 5-6 : COMPARAISON DES GRADIENTS DE VITESSES SELON AP AVEC M033	68
FIGURE 5-7 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSES SELON M AVEC AP050.....	68
FIGURE 5-8 : COMPARAISON DES GRADIENTS DE VITESSES SELON M AVEC AP050	68
FIGURE 5-9 : IMPLANTATION DE LA NOUVELLE ECLUSE AMONT D'AMPSIN-NEUVILLE [21]	69
FIGURE 5-10 : POSITION DE L'AXE SUR LE CHAMP DE VITESSE – AMPSIN-NEUVILLE B2A [22].....	70
FIGURE 5-11 : PROFILS DE VITESSES LONGITUDINALES - AMPSIN-NEUVILLE I [22].....	71
FIGURE 5-12 : PROFILS DE VITESSES LONGITUDINALES - AMPSIN-NEUVILLE II [22].....	71
FIGURE 5-13 : PROFILS DE VITESSES LONGITUDINALES - AMPSIN-NEUVILLE III [22].....	71
FIGURE 5-14 : PROFILS DE VITESSES TRANSVERSALES - AMPSIN-NEUVILLE I [22]	72
FIGURE 5-15 : PROFILS DE VITESSES TRANSVERSALES - AMPSIN-NEUVILLE II [22]	72
FIGURE 5-16 : PROFILS DE VITESSES TRANSVERSALES - AMPSIN-NEUVILLE III [22]	72
FIGURE 5-17 : SCHEMA DU MOLE AMONT ACTUEL DE L'ECLUSE D'AUVELAIS [23]	73
FIGURE 5-18 : POSITION DE LA SECTION LONGITUDINALE – AUVELAIS [23].....	74
FIGURE 5-19 : PROFILS DE VITESSE LONGITUDINALE I – AUVELAIS [23].....	74
FIGURE 5-20 : PROFILS DE VITESSE LONGITUDINALE II – AUVELAIS [23].....	75
FIGURE 5-21 PROFILS DE VITESSE TRANSVERSALE I – AUVELAIS [23]	75
FIGURE 5-22 PROFILS DE VITESSE TRANSVERSALE II – AUVELAIS [23]	75
FIGURE 6-1 : SCHEMA DE LA SITUATION DU MODELE REDUIT.....	76
FIGURE 6-2 : SCHEMA DE COMPREHENSION POUR LE CALCUL DES F ET M	77
FIGURE 6-3 : PROFILS DES FORCES LONGITUDINALES I	78
FIGURE 6-4 : PROFILS DES FORCES LONGITUDINALES II	78
FIGURE 6-5 : PROFILS DES FORCES LONGITUDINALES III	78
FIGURE 6-6 : PROFILS DES FORCES LONGITUDINALES IV	79
FIGURE 6-7 : PROFILS DES FORCES LONGITUDINALES V	79
FIGURE 6-8 : PROFILS DES FORCES TRANSVERSALES I	79
FIGURE 6-9 : PROFILS DES FORCES TRANSVERSALES II	80
FIGURE 6-10 : PROFILS DES FORCES TRANSVERSALES III	80
FIGURE 6-11 : PROFILS DES FORCES TRANSVERSALES IV	80
FIGURE 6-12 : PROFILS DES FORCES TRANSVERSALES V	81
FIGURE 6-13 : PROFILS DES MOMENTS DE FORCES I	81
FIGURE 6-14 : PROFILS DES MOMENTS DE FORCES II	81
FIGURE 6-15 : PROFILS DES MOMENTS DE FORCES III	82
FIGURE 6-16 : PROFILS DES MOMENTS DE FORCES IV	82
FIGURE 6-17 : PROFILS DES MOMENTS DE FORCES V	82
FIGURE 6-18 : FORCES MAXIMALES POUR LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS	83
FIGURE 6-19 : MOMENTS MAXIMAUX POUR LES DIFFERENTES CONFIGURATIONS	83
FIGURE 6-20 : VALEURS DES INTEGRALES DE F LONGITUDINALES ET TRANSVERSALES ET DE M.....	84
FIGURE 7-1 : PERSPECTIVE DE PROFILS OPTIMAUX.	85
FIGURE 10-1 : PHOTO DE L'AUTOMATE	91
FIGURE 10-2 : PHOTO DU MODELE DANS L'AXE DE L'ECOULEMENT.....	91
FIGURE 10-3 : PHOTO DE L'ENSEMBLE DU MODELE EXPERIMENTALE.....	92
FIGURE 10-4 : PHOTO D'UNE SEANCE DE MESURE.....	92
FIGURE 10-5 : PHOTO DES MOLES AJOURES MOBILES	93
FIGURE 10-6 : PLAN ET COUPE DES SUPPORTS DE L'AUTOMATE	94
FIGURE 10-7 : PLAN ET COUPE DES SUPPORTS DE LA PASSERELLE AMONT	94
FIGURE 10-8 : CHAMP DE VITESSE MESURE I - AP050M100 - 05/03/20	100
FIGURE 10-9 : CHAMP DE VITESSE MESURE I - AP050M100 - 07/03/20	100

FIGURE 10-10 : CHAMP DE VITESSE MESURE I - AP050M100 - 12/03/20	100
FIGURE 10-11 : CHAMP DE VITESSE MESURE I - AP050M100 - 14/04/20	101
FIGURE 10-12 : CHAMP DE VITESSE MESURE I - AP050M100 - 16/04/20	101
FIGURE 10-13 : CHAMP DE VITESSE MESURE I - AP050M033 – 28/04/20	101
FIGURE 10-14 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE LONGITUDINALE X=12000 [MM] – AP050M100	104
FIGURE 10-15 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE LONGITUDINALE X = 14000 [MM] – AP050M100	104
FIGURE 10-16 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE LONGITUDINALE X = 16000 [MM] – AP050M100	104
FIGURE 10-17 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE LONGITUDINALE X = 18000 [MM] – AP050M100	105
FIGURE 10-18 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE LONGITUDINALE X = 12000 [MM] – AP050M033	106
FIGURE 10-19 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE LONGITUDINALE X = 14000 [MM] – AP050M033	106
FIGURE 10-20 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE LONGITUDINALE X = 16000 [MM] – AP050M033	106
FIGURE 10-21 : COMPARAISON DES VITESSES SUR LA COUPE LONGITUDINALE X = 18000 [MM] – AP050M033	107
FIGURE 10-22 : CHAMP DE VITESSES - AP020M000	108
FIGURE 10-23 : CHAMP DE VITESSES - AP020M033	108
FIGURE 10-24 : CHAMP DE VITESSES - AP020M050	109
FIGURE 10-25 : CHAMP DE VITESSES - AP020M066	109
FIGURE 10-26 : CHAMP DE VITESSES - AP020M100	110
FIGURE 10-27 : CHAMP DE VITESSES - AP020M---	110
FIGURE 10-28 : CHAMP DE VITESSES - AP025M000	111
FIGURE 10-29 : CHAMP DE VITESSES - AP025M033	111
FIGURE 10-30 : CHAMP DE VITESSES - AP025M050	112
FIGURE 10-31 : CHAMP DE VITESSES - AP025M066	112
FIGURE 10-32 : CHAMP DE VITESSES - AP025M100	113
FIGURE 10-33 : CHAMP DE VITESSES - AP025M---	113
FIGURE 10-34 : CHAMP DE VITESSES - AP033M000	114
FIGURE 10-35 : CHAMP DE VITESSES - AP033M033	114
FIGURE 10-36 : CHAMP DE VITESSES - AP033M050	115
FIGURE 10-37 : CHAMP DE VITESSES - AP033M066	115
FIGURE 10-38 : CHAMP DE VITESSES - AP033M100	116
FIGURE 10-39 : CHAMP DE VITESSES - AP033M---	116
FIGURE 10-40 : CHAMP DE VITESSES - AP040M000	117
FIGURE 10-41 : CHAMP DE VITESSES - AP040M033	117
FIGURE 10-42 : CHAMP DE VITESSES - AP040M050	118
FIGURE 10-43 : CHAMP DE VITESSES - AP040M066	118
FIGURE 10-44 : CHAMP DE VITESSES - AP040M100	119
FIGURE 10-45 : CHAMP DE VITESSES - AP040M---	119
FIGURE 10-46 : CHAMP DE VITESSES - AP050M000	120
FIGURE 10-47 : CHAMP DE VITESSES - AP050M033	120
FIGURE 10-48 : CHAMP DE VITESSES - AP050M050	121
FIGURE 10-49 : CHAMP DE VITESSES - AP050M066	121
FIGURE 10-50 : CHAMP DE VITESSES - AP050M100	122
FIGURE 10-51 : CHAMP DE VITESSES - AP050M---	122
FIGURE 10-52 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSES SELON M AVEC AP040	123
FIGURE 10-53 : COMPARAISON DES GRADIENTS DE VITESSES SELON M AVEC AP040	123
FIGURE 10-54 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSES SELON M AVEC AP033	123
FIGURE 10-55 : COMPARAISON DES GRADIENTS DE VITESSES SELON M AVEC AP033	123
FIGURE 10-56 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSES SELON M AVEC AP025	124
FIGURE 10-57 : COMPARAISON DES GRADIENTS DE VITESSES SELON M AVEC AP025	124
FIGURE 10-58 : COMPARAISON DES PROFILS DE VITESSES SELON M AVEC AP020	124
FIGURE 10-59 : COMPARAISON DES GRADIENTS DE VITESSES SELON M AVEC AP020	124
FIGURE 10-60 : GEOMETRIES DE MOLES ETUDIES POUR AMPSIN-NEUVILLE	125
FIGURE 10-61 : SCHEMA DU MOLE AMONT ACTUEL DE L'ECLUSE D'AUVELAIS [23]	126
FIGURE 10-62 : SCHEMA DU MOLE AMONT RACCOURCI AVEC 3 OUVERTURES DE L'ECLUSE D'AUVELAIS [23]	126
FIGURE 10-63 : SCHEMA DU MOLE AMONT RACCOURCI AVEC 7 OUVERTURES DE L'ECLUSE D'AUVELAIS [23]	126
FIGURE 10-64 : SCHEMA DU MOLE AMONT DROIT DE L'ECLUSE D'AUVELAIS [23]	126
FIGURE 10-65 : SCHEMA DU MOLE AMONT DROIT AVEC 7 OUVERTURES DE L'ECLUSE D'AUVELAIS [23]	126
FIGURE 10-66 : SCHEMA DU MOLE AMONT DROIT AVEC 5 OUVERTURES DE L'ECLUSE D'AUVELAIS [23]	126

Liste des Tableaux

TABLEAU 1-1 : COUTS EXTERNES DE LA POLLUTION ET DES GES DUS AUX MODES DE TRANSPORT [3]	16
TABLEAU 1-2 : COUTS EXTERNES DUS AUX MODES DE TRANSPORT [3]	17
TABLEAU 2-1 : CLASSIFICATION EUROPEENNE DES CONVOIS D'EAU INTERIEURE [8].....	19
TABLEAU 2-2 : DIMENSIONS MINIMALES D'UN AVANT-PORT D'ECLUSE A UN SEUL SAS [9].....	21
TABLEAU 3-1 : RAPPORTS AP ET LARGEURS DU COURS D'EAU ETUDIES.....	31
TABLEAU 3-2 : DEBITS RETENUS POUR CHAQUE CONFIGURATION.....	33
TABLEAU 3-3 : CONFIGURATIONS DES MOLES "MOBILES" RETENUS	34
TABLEAU 3-4 : PARAMETRES SONDE P-EMS 30	39
TABLEAU 3-5 : ESSAIS PROGRAMMES	44
TABLEAU 4-1 : LISTE DES CONFIGURATIONS MODELISEES NUMERIQUEMENT.....	55
TABLEAU 4-2 : LISTE DES PRE-ESSAIS NUMERIQUES	61
TABLEAU 5-1 : GEOMETRIES ETUDIEES POUR AMPSIN-NEUVILLE [22]	69
TABLEAU 5-2 : GEOMETRIES ETUDIEES POUR AMPSIN-NEUVILLE [23]	73
TABLEAU 10-1 - CONFIGURATIONS MODELISEES PAR STOCKSTILL	89
TABLEAU 10-2 : PLANNING DE LA MODELISATION PHYSIQUE	95
TABLEAU 10-3 : REFERENCEMENT DES ERREURS DUES AU THEODOLITE	97
TABLEAU 10-4 : ANALYSE STATISTIQUE DU TEMPS DE THEODOLITE DISPONIBLE.....	98
TABLEAU 10-5 : VALIDATIONS DES ESSAIS A PARTIR DU DEBIT	98
TABLEAU 10-6 : VALEURS MOYENNES ET ECART-TYPES CALCULES.....	99

1 Sujet de l'étude

1.1 Introduction

L'humanité a toujours su mettre à profit son environnement pour réaliser ses ambitieux desseins. En effet, elle a vite découvert que le transport de marchandises ou de personnes via une voie d'eau grâce à un corps flottant permet une grande économie d'énergie. Il y a 3000 ans déjà, les contremaitres égyptiens mettaient à profit le Nil pour acheminer les roches de granit et de grès extraites au sud de l'Égypte vers le nord pour y construire les pyramides [1]. Jusqu'à l'avènement de l'ère moderne, le transport maritime était même l'unique moyen pour assurer le transport de marchandises *lourdes*.

Aujourd'hui encore ce mode de transport poursuit son développement. D'autant plus que ce vieux moyen de transport possède des atouts environnementaux et sociétaux pour s'inscrire avantageusement dans le monde de demain.

Pour profiter de ces atouts, l'Humanité a aménagé des cours d'eau réputés incompatibles avec ce transport et en a même construit de nouveaux comme le Canal du Midi en France ou le Canal du Centre en Belgique. Ses ingénieurs ont dû aussi imaginer des *ouvrages d'art* permettant le franchissement d'obstacles topographiques. Ces ouvrages modifient le comportement local du cours d'eau. Ses mêmes ingénieurs se doivent donc de comprendre la portée qu'auront leurs créations sur leur environnement afin de ne pas l'impacter péjorativement.

Cette dernière phrase ne se résume pas qu'aux ingénieurs hydrauliciens mais à tout ingénieur se voulant acteur pour la transition vers le monde de demain.

1.2 Contexte et enjeu

Dressons dans un premier temps le paysage wallon du transport terrestre de marchandises. Le moyen de transport le plus utilisé est le transport routier qui représente plus de 80 % des tonne-kilomètres parcourus en Wallonie. Il est suivi par le transport ferroviaire ($\approx 10\%$) et en dernière position le transport fluvial ($\approx 7\%$). La Figure 1-1 montre l'évolution entre 1990 et 2017 de la répartition de ces transports en Wallonie. Nous pouvons y voir que le transport routier continue de croître (+57% de tkm parcourus entre 1995 et 2017). Cette croissance se fait au dépend du transport ferroviaire (-34% depuis 1995). Le transport fluvial, quant à lui, croît de +46% entre 1995 et 2018 malgré la crise de 2009, la fermeture des hauts-fourneaux et des cokeries [2].

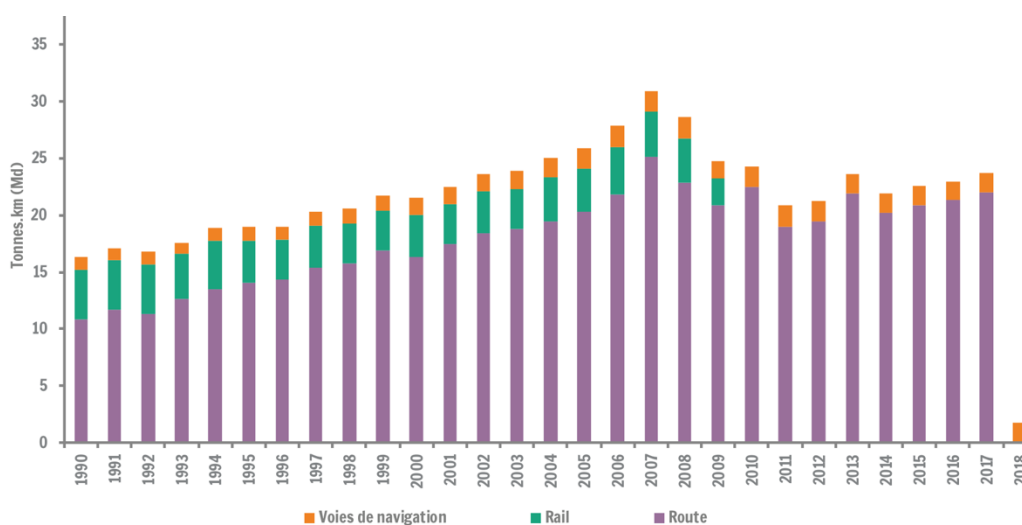


Figure 1-1 : Répartition du transport terrestre de fret en Wallonie [2]

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre d'un programme de développement des infrastructures de transports de l'Union Européenne, le réseau transeuropéen de transport (RTE-T) et plus précisément des politiques visant à densifier le trafic fluvial. Ceci a pour but d'anticiper la croissance de la demande du transport de marchandises et d'essayer d'augmenter la part du transport fluvial dans la répartition wallonne des transports. Ceci passe par une augmentation de la capacité d'accueil des différents canaux. Ce mémoire s'inscrit aussi dans la tendance actuelle, tant publique que politique, visant à réduire nos émissions de gaz à effet de serre et notre empreinte écologique en général.

Afin de comprendre l'enjeu de développer le transport fluvial, une présentation des différents atouts de ce transport est nécessaire. Une étude menée par le CIEM a étudié les coûts externes des différents moyens de transports terrestres de marchandises en Wallonie. Le coût externe d'un moyen de transport permet de donner une valeur chiffrée aux dommages occasionnés par ces transports sur la collectivité. Ceci permet aussi d'avoir un élément de comparaison numérique entre les moyens de transport.

Un **premier atout** est **environnemental**. Cette étude a étudié la quantité des 6 gaz à effet de serre (GES) reconnus (CO₂, CH₄, N₂O, SF₆, les hydrofluorocarbures et les perfluorocarbures) émise par les différents moyens de transport wallons. Le Tableau 1-1 montre l'avantage certain de promouvoir le transport ferroviaire et la navigation intérieure par rapport au transport routier (les véhicules utilitaires légers et les camions) au niveau des GES. De plus, le transport fluvial permet une réduction de la consommation d'énergie de 5 à 6 fois par rapport au transport routier [3]. Cette réduction du coût énergétique du transport s'associe ainsi à une réduction d'émissions de CO₂ de l'ordre de 60 grammes par tonne-kilomètre transportée. Compte tenu du nombre de tonnes-kilomètres effectuées en Wallonie pendant un an, cela équivaut à une économie de plus de 100 000 tonnes de CO₂ [3].

Modes de transport/Coûts [€/tkm]	VUL	Camion	Train	Navigation intérieure
Coûts dus aux GES	0,95 à 6,68	0,21 à 1,49	0,06 à 0,37	0,07 à 0,5
Coûts dus aux polluants primaires	1,93 à 5,47	0,57 à 1,56	-	-

Tableau 1-1 : Coûts externes de la pollution et des GES dus aux modes de transport [3]

Néanmoins, il ne faut pas négliger l'impact des polluants dits primaires (SO₂, NO_x, CO et les particules fines) sur la santé humaine, la faune, la flore et la dégradation matérielle de biens telles que les bâtiments. Il n'existe malheureusement pas de chiffres wallons pour le transport ferroviaire et la navigation intérieure. Or ces transports sont aussi la source de polluants primaires. Le transport ferroviaire rejette principalement des particules fines via l'usure des freins, des roues, des caténaires et des rails. Quant à la navigation intérieure, elle rejette principalement des NO_x issus de la combustion des fuels lourds de leur motorisation [4].

Le **deuxième atout** est **sociétal**. Une péniche ayant un tonnage de 2000 [T] équivaut à la charge de transport de 100 camions. En plus d'offrir un désengorgement évident, moins de camion sur nos routes, c'est aussi moins d'accidents mortels. En effet, en Belgique 6% des accidents corporels sont impliqués par les camions tandis qu'ils sont impliqués dans 17% des accidents mortels [5]. En d'autres mots, les accidents corporels impliquant un camion ont un taux de mortalité plus élevé. De l'autre côté, les risques d'accident en navigation fluviale sont nettement moindres : ce transport serait 100 à 300 fois plus sûr que le transport routier [3]. Le transport fluvial a encore un atout : sa fiabilité ! Ne dépendant pas des infrastructures routières et ferroviaires, ils ne subissent donc pas leurs aléas (engorgements, restrictions, limites, ...) [3].

L'étude du *CIEM* déjà citée a calculé les coûts externes liés à la congestion des voies de transports et des accidents. De plus cette étude a calculé les coûts liés aux nuisances sonores et à la consommation d'espace. Le Tableau 1-2 montre encore une fois l'intérêt de développer les modes de transport alternatifs au transport routier.

Modes de transport / Coûts [€ct/tkm]	VUL	Camion	Train	Navigation intérieure
Coûts dus à la congestion	18,74 à 57,91	1,87 à 5,79	0,05	0
Coûts dus aux accidents	4,51 à 8,05	0,62 à 0,81	0	0
Coûts dus aux nuisances sonores	3,66	0,55	0,36	0
Coûts dus à la consommation d'espace	1,45	0,27	0,04	0,11

Tableau 1-2 : Coûts externes dus aux modes de transport [3]

Finalement, c'est aussi un transport stratégique qui peut continuer à fonctionner presque normalement même en temps de crise comme celle du *COVID-19* [6]. En effet, aussi bien en Wallonie [6] qu'en France [7], le transport fluvial a permis l'approvisionnement de produits essentiels. Tout en permettant aux entreprises travaillant en flux continu, tel que le secteur chimique, de poursuivre leurs activités.

A la vue de ces éléments, nous pouvons nous demander pourquoi le transport routier prédomine autant face aux autres alternatives (>80% des tkm parcourus en Wallonie). Il y a un point que nous n'avons pas abordé, c'est la facilité qu'offre ce transport. Grâce à une infrastructure routière hyper développée, le transport routier permet de déplacer rapidement et précisément la plupart des marchandises. Il est donc nécessaire de rendre plus attractives les différentes alternatives comme le transport fluviale via le développement de leurs infrastructures.

1.3 Structure du rapport

Ce travail se compose en 4 grandes parties.

La première partie consiste en un **état de l'art** qui décrit tout d'abord le matériel navigant en Wallonie puis qui définit le cadre de l'avant-port amont d'une écluse. Ensuite elle synthétise une étude réalisée par R. STOCKSTILL portant sur les conditions de navigation à l'approche d'une écluse. Cette étude, menée pour l'*US Army Corps of Engineers*, est un des points de départ de ce travail. Enfin cette partie détaillera les objectifs de ce travail et la démarche employée pour atteindre ces objectifs.

La seconde partie est la présentation des 2 modélisations réalisées, l'une **physique** et l'autre **numérique** :

1. La présentation du modèle physique décrit tout d'abord la conception du modèle, la géométrie de l'avant-port et les différentes configurations étudiées. Ensuite il y est présenté les différents outils, instruments utilisés ainsi que les résultats obtenus.
2. La présentation du modèle numérique décrit les 3 étapes de processing nécessaires à la modélisation de l'écoulement dans le modèle simplifié d'avant-port que nous avons imaginé. Il y est abordé plus en détail le fonctionnement du solveur utilisé (*Telemac2D*). La compréhension de la modélisation requiert aussi un rappel théorique sur les modèles hydrodynamiques utilisés.

La troisième partie est concentrée sur l'analyse des **profils de vitesses** issus de notre modélisation. Les observations constatées lors de cette analyse sont ensuite confrontées à d'autres profils de vitesses issus d'études de situation réelle d'avant-port effectuées par le Service Public de Wallonie. Cette troisième partie se termine par une analyse des **profils de forces** et **des moments** dérivés de nos profils de vitesses.

Enfin, la dernière partie amène des **pistes** pour **améliorer** et **développer** le sujet.

2 État de l'art

2.1 Classification européenne des convois

Comme énoncé dans le contexte de ce mémoire, l'augmentation du trafic fluvial va nécessiter l'augmentation du tonnage de chaque convoi. Celle-ci sera régie par une augmentation de la classe de convoi pouvant transiter sur les voies navigables. En effet, l'Europe a classifié ses voies d'eau intérieures navigables selon leurs dimensions et leur capacité à permettre le passage de bateaux. Il en existe actuellement 8.

Afin de mieux visualiser l'ordre de grandeur de cette augmentation, le Tableau 2-1 présente les dimensions générales de chaque classe.






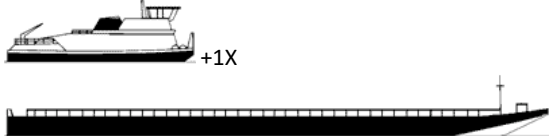
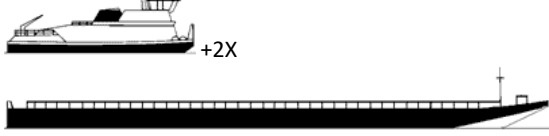
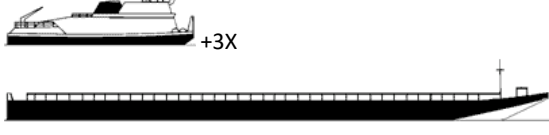
Classe	Type	Longueur [m]	Largeur [m]	Tirant d'eau [m]	Tonnage [T]	Schéma
0	Bateau de plaisance	-	-	-	-	-
I	Péniche ou Spits	38,5	5,05	2,2	250 à 400	
II	Campinois	50 à 63	6,6	2,5	400 à 600	
III	D.E.K.	67 à 80	8,8	2,5	650 à 1000	
IV	R.H.K.	80 à 85	9,5	2,5	1000 à 1500	
Va et Vlb	Grand Rhénan	95 à 140	11,4 à 15	2,5 à 3,9	1500 à 3500	
IV, Va et Vla	Convoi poussé court	85 à 110	9,5 à 22,8	2,5 à 4,5	1250 à 6000	
V, Vb, Vlb et Vlc	Convoi poussé moyen	172 à 200	11,4 à 34,2	2,5 à 4,5	3200 à 18000	
Vlc et VII	Convoi poussé long	270 à 285	22,8 à 34,2	2,5 à 4,5	9600 à 27000	

Tableau 2-1 : Classification européenne des convois d'eau intérieure [8]

2.2 Description d'un avant-port

2.2.1 Définition

L'avant-port d'une écluse est une infrastructure située en amont ou en aval de cette écluse afin d'offrir des conditions de navigation favorables aux bateaux qui l'emprunteront. L'avant-port donne, tout d'abord, une zone dans laquelle les bateaux peuvent réduire leur vitesse. Il permet aussi d'offrir une zone d'amarrage aux bateaux lorsque l'écluse n'est pas ouverte.

Dans ce travail, nous étudierons spécifiquement l'avant-ports en amont d'écluse. Ceci a son importance car les courants présents dans les 2 configurations sont différents. Dans le cas amont, le courant passe dans l'avant-port puis dans l'écluse. A l'inverse du cas aval où le courant passe dans l'écluse puis dans l'avant-port.

2.2.2 Géométrie

La géométrie de l'avant-port est délimitée par une berge d'un côté et d'un môle de l'autre. L'avant-port doit être rectiligne sur toute sa longueur et doit être aligné selon l'axe de l'écluse [9, p. 74]. Deux grandes géométries d'avant-ports existent. Elles se différencient selon la façon dont le débit du cours d'eau est évacué.

- Évacuation du débit par buse.
- Évacuation du débit via un canal drainant adjacent (c'est la géométrie étudiée dans ce travail de fin d'étude).

2.2.2.1 Longueur

La longueur totale de l'avant-port L_{AP} est déterminée selon 4 paramètres [9, p. 74] :

1. La longueur de l'entonnoir¹ : L_f
2. La longueur de la zone d'alignement : L_o
3. La longueur de la zone d'amarrage : L_w
4. La longueur de bout de course : L_{ult}

2.2.2.2 Largeur

La largeur d'un l'avant-port *simple*, c'est-à-dire dont son écluse est constituée d'un seul sas, est déterminée selon 6 paramètres (voir Figure 2-1) [9, pp. 74 - 75] :

1. La largeur de la classe du navire caractéristique² de l'écluse : B
2. La largeur de la bande de sécurité : S
3. La largeur du sas de l'écluse : B_k
4. La largeur de la voie de navigation (équivalent à la largeur du sas) : B_k
5. La largeur de la bande entre la voie de navigation et la bande de la zone où la profondeur a atteint le maximum du tirant d'eau autorisé : B_r
6. La longueur de la zone d'alignement par rapport à la longueur du sas de l'écluse L_k obtenu a partir du rapport L_o/L_k et du Tableau 2-2.

¹ Goulet faisant la jonction entre l'avant-port et l'écluse

² Navire ayant la capacité maximale de l'écluse

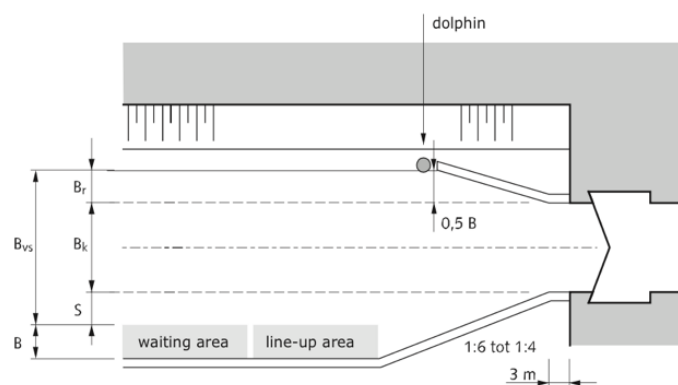


Figure 2-1 : Design d'un avant-port à un seul sas d'écluse [9]

Le Tableau 2-2 donne les dimensions de largeur minimales d'un avant-port pour une classe de navires.

Classe	B [m]	B _k [m]	S = B _r [m]	L_o/L_k
I	5,1	6,0	3,0	1,0 – 1,2
II	6,6	7,5	3,5	1,0 – 1,2
III	8,2	9,0	4,0	1,0 – 1,2
IV	9,5	10,5	5,0	1,0 – 1,2
Va	11,4	12,5	6,0	1,0 – 1,2
Vb	11,4	12,5	7,0	1,0 – 1,2

Tableau 2-2 : Dimensions minimales d'un avant-port d'écluse à un seul sas [9]

2.2.2.3 Profondeur

La profondeur de l'avant-port doit être au moins équivalente à celle de la voie d'eau. Pour éviter la sédimentation sur le fond de l'écluse, l'avant-port doit être plus profond que l'écluse [9, p. 76].

2.2.3 Conditions de navigation au sein d'un avant-port

Le bateau qui navigue est soumis aux courants (flux d'eau) qui selon leurs vitesses et leurs orientations perturbent la navigation du bateau. Ces perturbations doivent être éventuellement corrigées pour assurer une bonne trajectoire. D'autant plus qu'à l'approche d'une écluse, par son étroitesse, la trajectoire du bateau ne peut pas être trop influencée. C'est pourquoi les avant-ports d'écluse amont reliés à un canal drainant (comme un barrage adjacent à l'écluse) dont la vitesse de l'écoulement est supérieure à 0,3 [m/s] nécessitent une attention particulière [9]. En effet, cette configuration amène des courants transversaux plus ou moins importants. L'orthogonalité de ces courants transversaux par rapport à l'axe de navigation va produire sur le bateau une embardée (un déplacement transversal) et un lacet (une rotation sur l'axe vertical). Ces mouvements doivent être compensés afin de rester aligné dans l'axe de l'écluse. Il est donc nécessaire de limiter les courants transversaux afin de limiter ces mouvements.

Pour concevoir un avant-port offrant des conditions de navigations sûres, il faut tout d'abord connaître ce qui influe dessus. Les 4 situations communes qui vont venir modifier l'écoulement dans l'avant-port sont [9, p. 79] :

1. Le flux de l'eau via les buses de l'écluse.
2. Le flux de l'eau via des ouvertures dans le môle.
3. Le flux d'eau dû à la présence d'une passe à poissons.
4. Le flux d'eau lors de l'ouverture des portes du sas.

D'autres phénomènes peuvent jouer aussi sur les conditions de navigation tel que le phénomène d'enfoncement dynamique [10]. Il survient lorsqu'un navire en mouvement se déplace avec une faible profondeur d'eau sous la quille (c'est-à-dire que le tirant d'eau du bateau est grand par rapport à la profondeur). Quand le navire entre en mouvement, le courant d'eau s'écoulant sous le navire va accélérer et entraîner une dépression qui va attirer le navire vers le bas (voir Figure 2-2).

Ce phénomène est d'autant plus marqué sur des navires ayant une géométrie parallélépipédique tels que les barges.

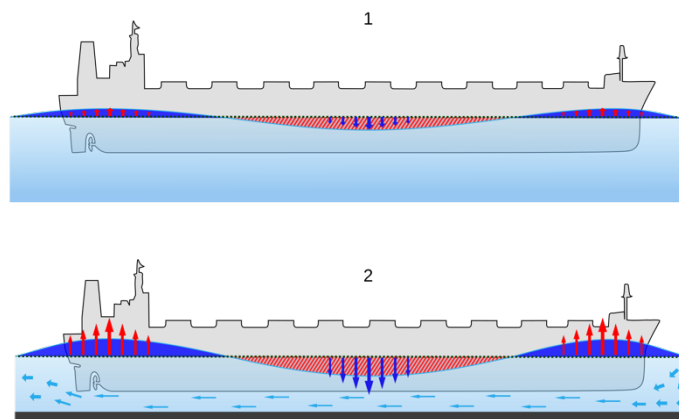


Figure 2-2 : Phénomène d'enfoncement dynamique [10]

Les recommandations données pour avoir des conditions de navigation optimales dans un avant-port amont drainé par son môle sont [9, p. 81] :

- La vitesse longitudinale doit être limitée à 0,5 [m/s].
- La vitesse transversale doit être inférieure à 0,3 [m/s]. Pour cela il est recommandé d'avoir une première section de môle plein proche du sas de l'écluse, puis d'avoir une deuxième section de môle ayant des ouvertures croissantes vers l'amont.

Limiter les composantes longitudinales et transversales est important pour garantir des conditions de navigations sûres car des vitesses faibles diminuent les forces et couples agissant sur le navire. Tout en laissant la capacité aux navires de se diriger correctement.

A la vue de ces recommandations et des paramètres géométriques disponibles, un seul levier d'action pour *contrôler* le champ de vitesses à l'intérieur de l'avant-port est la géométrie de son môle. Il est donc important de comprendre comment chaque modification géométrique d'un môle influence ce champ de vitesses. Dans ce travail, nous étudierons l'influence de 2 paramètres :

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{rapport AP} = \frac{l_x}{l_c} \\ \text{rapport M} = \frac{\sum A_{p_i}}{A_x} = \frac{\sum h \cdot l_{p_i}}{h \cdot l_x} \end{array} \right.$$

Où les différents paramètres sont exposés sur les Figure 2-3 à Figure 2-5.

Remarque : Dans ce travail un *môle ajouré* est aussi appelé *môle ouvert*.

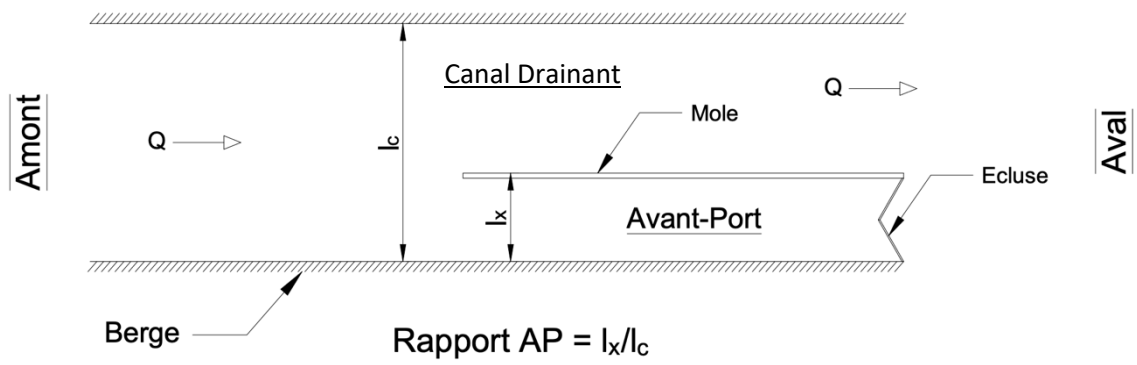


Figure 2-3 : Plan d'un avant-port en amont d'une écluse (schéma)

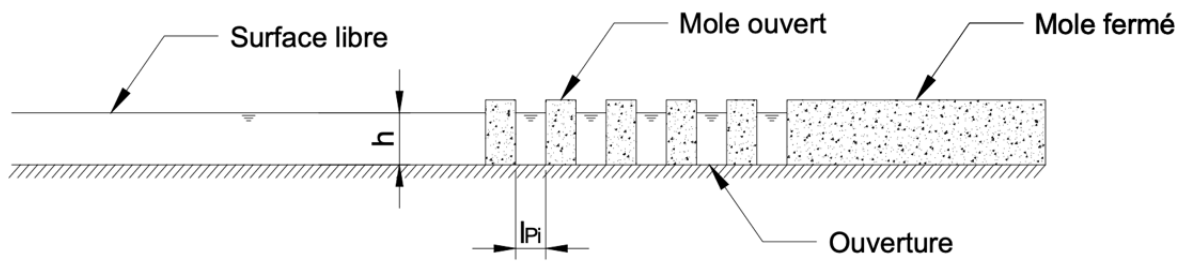


Figure 2-4 : Coupe longitudinale d'un avant-port (schéma)

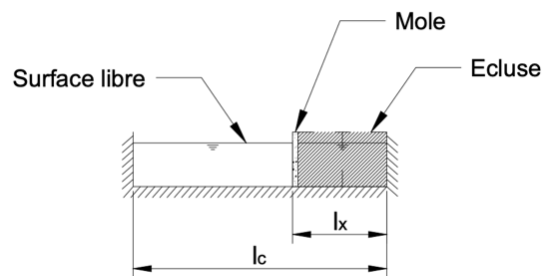


Figure 2-5 : Coupe transversale d'un avant-port (schéma)

2.3 Vitesse et champ de vitesses d'un écoulement

Ce travail aborde les notions de vitesse et de champ de vitesses d'un écoulement. Ces notions peuvent être vagues pour le lecteur qui n'est pas familier avec la mécanique des fluides. Cette section définit donc ces différentes notions.

Tout d'abord, ce travail prend l'hypothèse d'étudier des écoulements stationnaires. C'est-à-dire que les toutes vitesses évoquées ne varient pas dans temps.

Ensuite, lorsque nous évoquons les **vitesses** d'un écoulement, il s'agit de la vitesse du flux ou du courant pour un point donné de l'écoulement. Une façon simple de s'imaginer ce que cette vitesse représente, c'est d'imaginer une particule que l'on place dans ce flux et de mesurer la **vitesse** de cette particule. Cette vitesse mesurée est la vitesse locale de l'écoulement (pour la position X,Y et Z où la mesure de vitesse a été faite).

Un **champ de vitesses** c'est une description d'un espace qui va décrire pour chaque point (X,Y et Z) un vecteur vitesse (donnant son intensité et sa direction). Un moyen de se l'imaginer, ce serait de remplir le canal de boules de frigolite et de mesurer simultanément la vitesse de toutes ces boules. Ceci permettrait d'obtenir le champ de vitesses (surfaccique) de l'écoulement³. En mécanique des fluides, cette manière de décrire un écoulement est appelée la description eulérienne.

Ce travail évoquera aussi la notion de **profil de vitesses**. Un profil de vitesses donne toutes les vitesses situées sur une coupe (ou section) faite dans l'écoulement.

³ C'est d'ailleurs une méthode de mesure de courantométrie employée sur modèle réduit expérimental [20].

2.4 Étude de l'US Army Corps of Engineers

Cette section synthétise l'étude menée par Richard L. STOCKSTILL portant sur la modélisation des conditions de navigation à l'approche d'une écluse [11] [12]. Celle-ci est, en effet, à la base de certaines démarches et notions qui seront prises durant ce mémoire.

2.4.1 Objectifs des études

L'objectif de cette étude était de modéliser différentes conditions de navigation à l'approche d'une écluse grâce à plusieurs designs d'avant-ports et d'observer l'impact de ces designs sur la navigation.

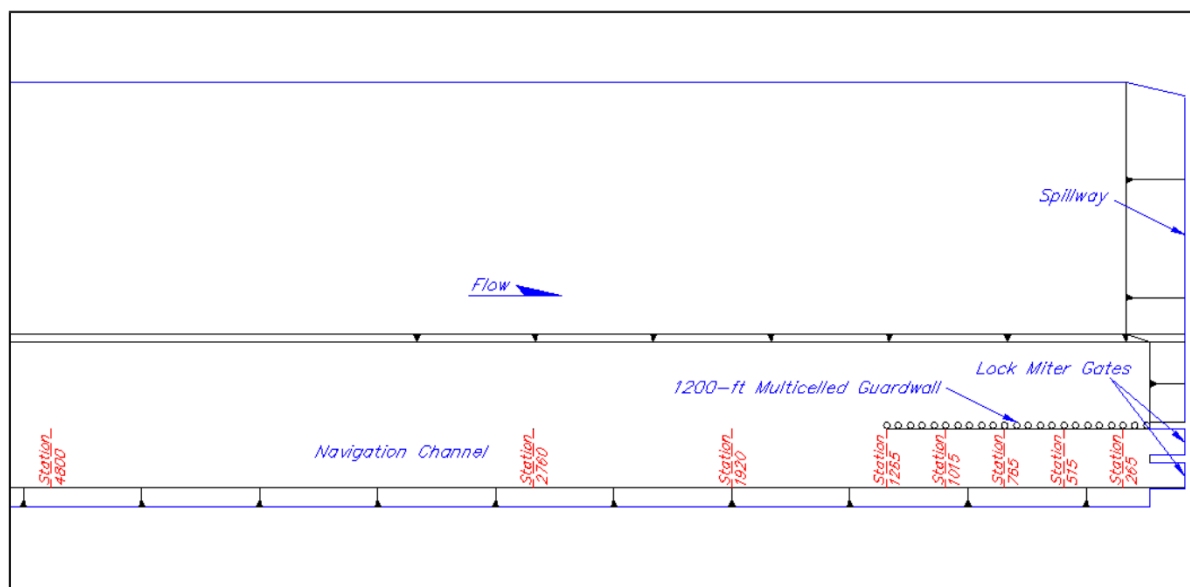


Figure 2-6 : Schéma de la géométrie du modèle physique de STOCKSTILL [11]

26 configurations d'avant-ports ont été modélisées numériquement. Chacune de ces configurations présente un jeu de 4 caractéristiques propres. Le détail de ces 26 configurations est repris dans le tableau en Annexe 10.2.1. Ces caractéristiques sont : la largeur de l'avant-port (épaisseur du môle exclu), le type de môle, la longueur de l'avant-port et le rapport M.

$$\text{Rappel : } M = \frac{\sum_i Ap_i}{Ax} \text{ avec } \begin{cases} Ap = \text{l'aire de la surface totale ouverte du môle} \\ Ax = \text{l'aire de la section transversale de l'avant - port} \end{cases}$$

Afin de valider leurs modélisations numériques une comparaison avec un modèle physique (visible sur la Figure 2-6) fut réalisée. Les Figure 2-7 à Figure 2-14 [11, pp. 3-6] comparent leurs résultats numériques avec ceux mesurés aux différentes stations (voir Figure 2-6). Bien que les résultats numériques n'épousent pas toujours parfaitement ceux mesurés sur le modèle physique, ils donnent une assez bonne approximation. Ils permettent donc d'avoir un bon aperçu sur les changements de conditions d'approche relatives à chaque configuration modélisée.

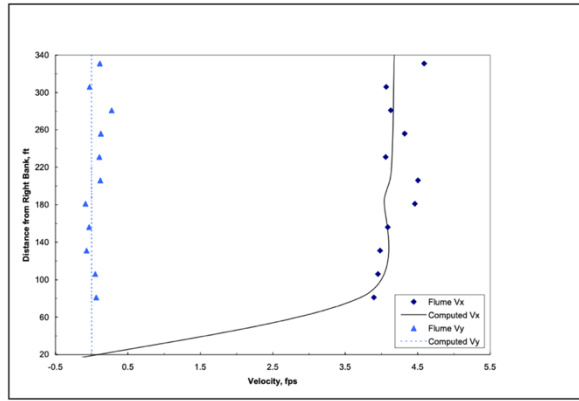


Figure 2-7 : Distribution de vitesses transversalement à l'avant-port, station 4800 [11]

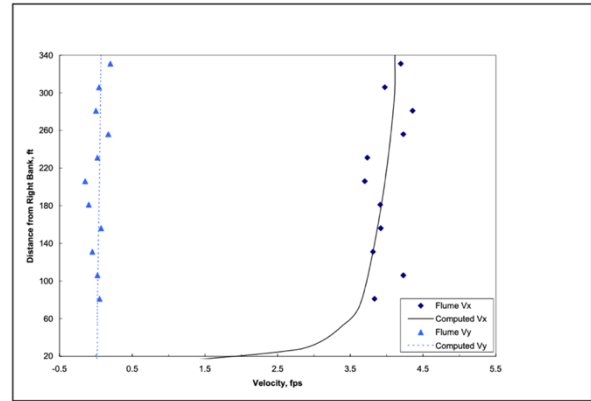


Figure 2-10 : Distribution de vitesses transversalement à l'avant-port, station 2760 [11]

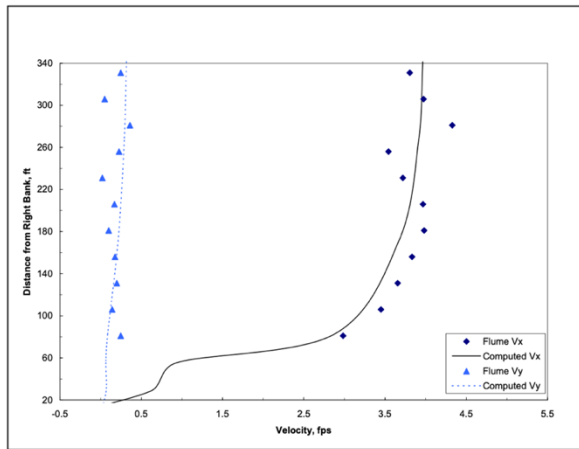


Figure 2-8 : Distribution de vitesses transversalement à l'avant-port, station 1920 [11]

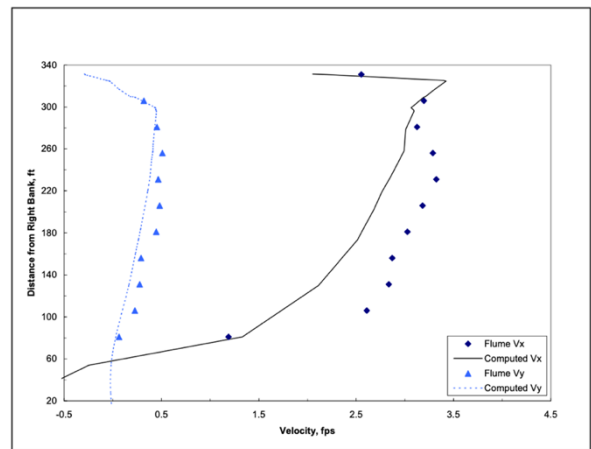


Figure 2-11 : Distribution de vitesses transversalement à l'avant-port, station 1265 [11]

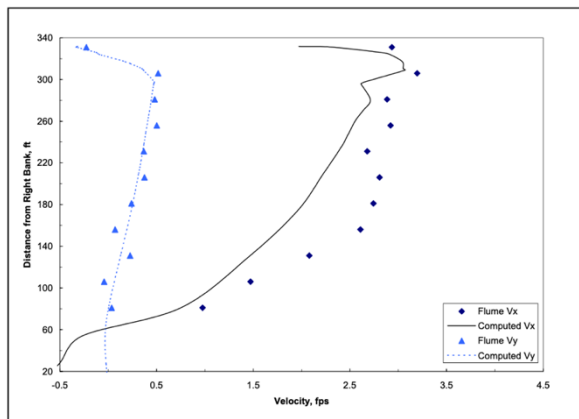


Figure 2-9 : Distribution de vitesses transversalement à l'avant-port, station 1015 [11]

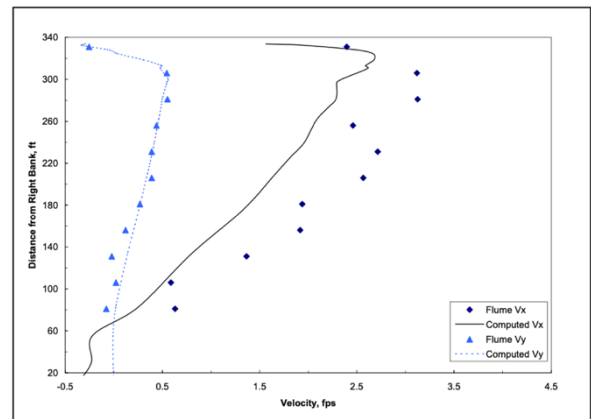


Figure 2-12 : Distribution de vitesses transversalement à l'avant-port, station 765 [11]

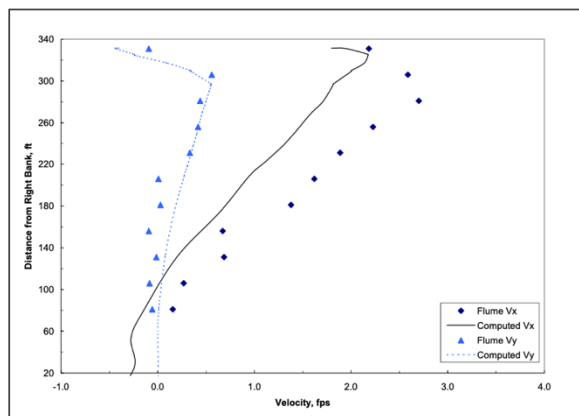


Figure 2-13 : Distribution de vitesses transversalement à l'avant-port, station 515 [11]

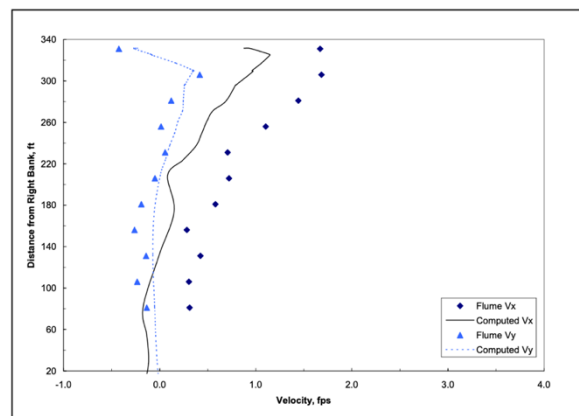


Figure 2-14 : Distribution de vitesses transversalement à l'avant-port, station 265 [11]

2.4.2 Résultats de l'étude

Les simulations numériques étant validées par des essais expérimentaux, le champ de vitesses de chaque configuration fut calculé. Un exemple est montré à la Figure 2-16. A partir de ces champs de vitesses sont calculées la force longitudinale et la force transversale agissant sur une barge. Bien que ces deux forces ne représentent pas toutes les forces agissant sur une barge transitant par l'avant-port, elles permettront de classer les différentes configurations selon la sûreté de leurs conditions de navigation.

A titre indicatif :

Le **modèle de barge** utilisé pour les calculs de cette étude est un convoi poussé de 3 par 5 barges (voir Figure 2-15). Longueur avec remorqueur : 1200 [ft] = 402,33 [m]. Largeur = 105 [ft] = 32 [m]. Tirant d'eau = 9 [ft] = 2,74 [m] [13].

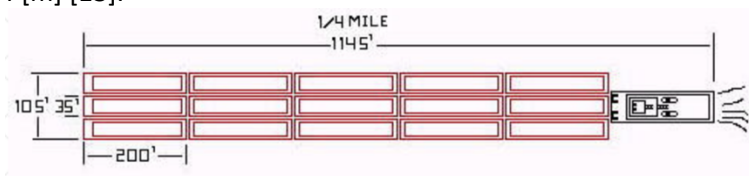


Figure 2-15 : Dimensions d'un convoi 15 barges [14]

- Les **forces longitudinales** ont été estimées à partir d'un gradient de vitesse latéral sans tenir compte du phénomène d'enfoncement dynamique de la barge. La force retenue est la force maximale estimée sur différents tracés de navigation démarrants chacun à 3,3 x la longueur du convoi en amont de l'écluse.
- Les **forces transversales** ont aussi été estimées à partir d'un gradient de vitesse latéral. La force retenue est la force maximale estimée sur un tracé démarrant à 0,2 x la longueur du convoi en amont de l'écluse et situé à une distance du môle de 0,5 x la largeur du convoi.

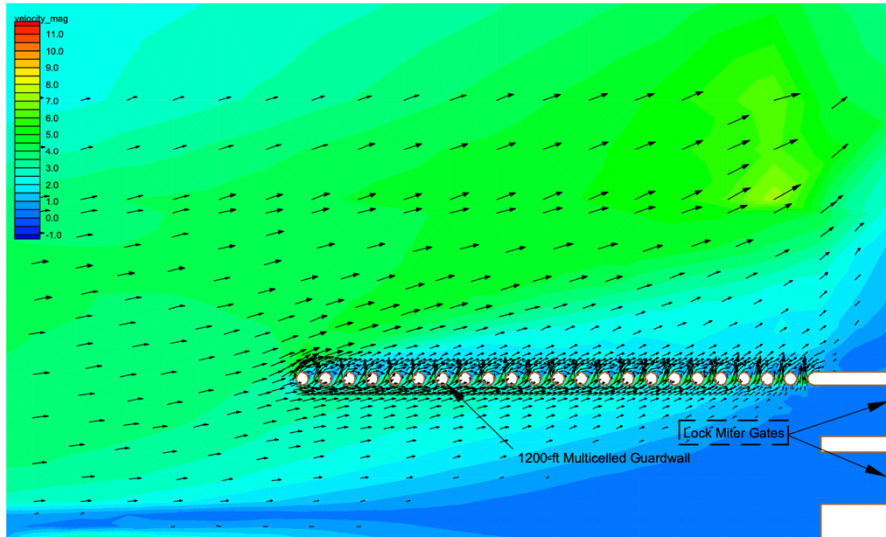


Figure 2-16 : Champ de vitesse de la configuration "Type 5" [11]

La Figure 2-17 montre les résultats de l'estimation de ces forces pour chacune des configurations. En regardant ce graphe, une tendance apparaît : les forces transversales sont plus grandes après la configuration *Type 15*. Le seul paramètre ayant changé entre les configurations 2 à 15 et les configurations 16 à 27 est la largeur de l'approche dans l'avant-port.

Le rapport $AP = \frac{\text{largeur de l'avant-port } (l_x)}{\text{largeur du cours-d'eau } (l_c)}$ vaut 0,15 dans le premier jeu de configurations (*Type 2* au *Type 15*) et vaut 0,3 dans le second jeu de configurations (*Type 16* au *Type 27*)

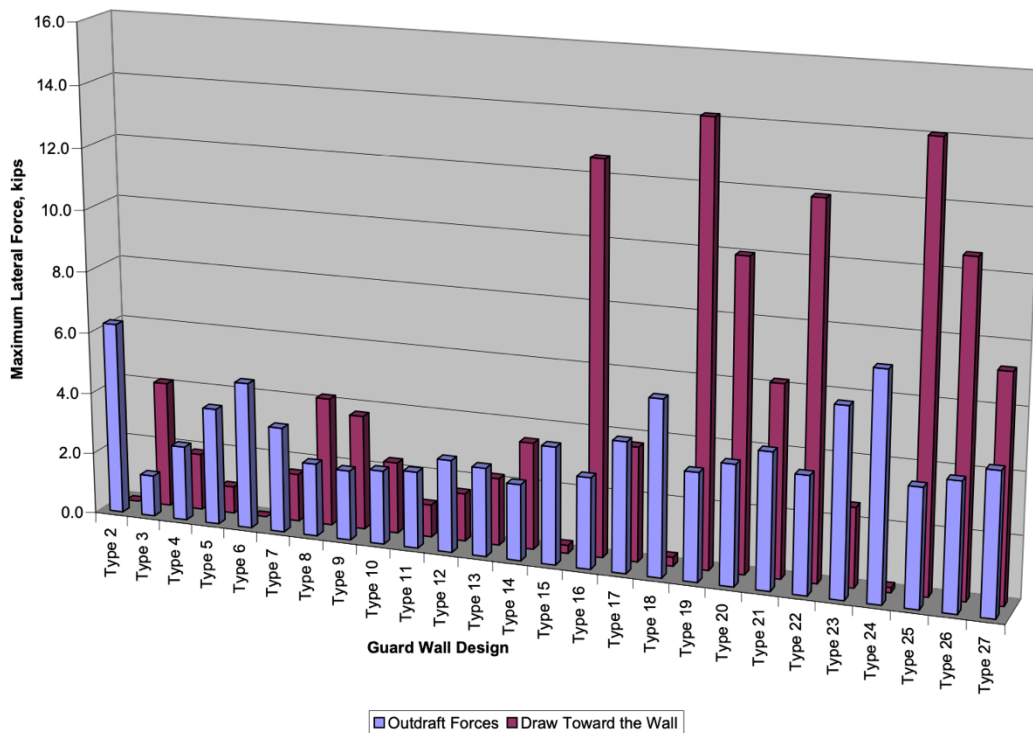


Figure 2-17 : Comparaison des forces longitudinales et transversales [11]

En réalisant un graphe des forces en fonctions du rapport M (visible à la Figure 2-18), STOCKTILL arrive à la conclusion que le **rapport M** minimisant les forces transversales et longitudinales $\approx 0,6$ [11, p. 10].

Nous avons vu à la Section 2.4.2 qu'un *rapport AP* plus important implique des forces transversales plus élevées, or en Wallonie le *rapport AP* peut atteindre de plus grandes valeurs. Par exemple, le projet de la construction d'une nouvelle écluse à Ampsin-Neuville sur la Meuse a un *rapport AP* valant 0,36. L'avant-port de l'écluse d'Auvelais a un *rapport AP* de 0,4 sur la Basse-Sambre. Il serait donc intéressant de voir si ce **rapport M optimal** reste inchangé pour les configurations de nos voies navigables.

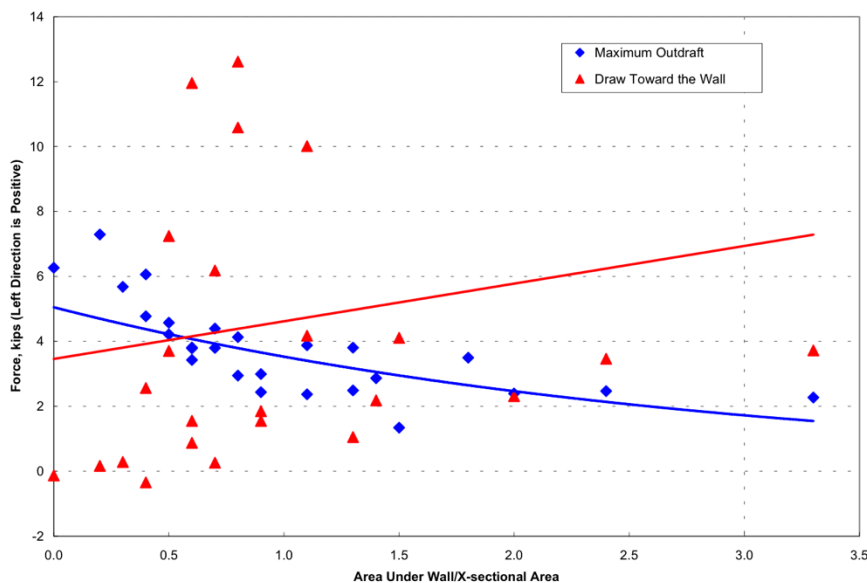


Figure 2-18 : Graphe des forces maximales selon le rapport M [11]

2.5 Objectifs du mémoire

Nous avons vu dans l'introduction l'intérêt de la Wallonie à développer son trafic fluvial. Des projets de construction de nouvelles écluses sont donc étudiés afin de permettre le passage de convois ayant un tonnage plus important. Cependant, il a été observé dans diverses études (comme celle de R. STOCKSTILL présentée à la Section 2.4) qu'un élargissement d'une écluse et donc de son avant-port en amont provoquait une augmentation des courants transversaux dans ce dernier. Cette observation induit que la traversée d'une écluse par un bateau puisse être rendue plus difficile voire impossible faute de conditions de navigation suffisamment sûres.

L'objectif de ce travail est double. Tout d'abord il est de confirmer l'impact de la section de la voie d'eau interceptée par l'avant-port (le *rapport AP*) sur les courants dans un avant-port amont. Ensuite il est d'observer l'impact de la perméabilité du môle (le *rapport M*) sur ces mêmes courants afin de voir s'il est possible d'améliorer les conditions de navigations grâce à une perméabilité appropriée.

Ceci permettra de donner aux concepteurs chargés de construire ou de modifier des avant-ports amont sur des voies navigables les éléments de réflexion leur permettant d'appréhender leur étude avec plus de compréhension.

2.6 Méthodologie

Pour observer cet impact sur les conditions de navigation, un avant-port amont à la géométrie simple va être modélisé à l'instar du modèle de STOCKSTILL. Ce modèle *simplifié* permet d'observer plus facilement les variations du courant dans l'avant-port lorsque les paramètres du môle et du cours d'eau changent.

Une première modélisation expérimentale a d'abord été uniquement envisagée. Ce modèle, réalisé au *Laboratoire des Recherches hydrauliques de Châtelet*, devait permettre la mesure du champ de vitesses au sein de l'avant-port. Au total, 20 configurations de l'avant-port idéalisé avaient été prévues. Une configuration étant un modèle d'avant-port avec des *rapports AP* et *M* spécifiques.

À la suite de la crise du *COVID-19* survenue pendant le second trimestre 2020, la modélisation expérimentale fut abandonnée au profit d'une modélisation numérique.

3 Modélisation expérimentale

3.1 Introduction

Ce chapitre présente le modèle expérimental créé pour atteindre les objectifs de cette étude et détaille les différentes géométries étudiées. Les différents instruments et outils utilisés sont ensuite exposés. Ceci permettra au lecteur de se familiariser à l'étude sur modèles expérimentaux. Dans un même temps, ce chapitre évoque aussi les différents problèmes rencontrés lors de cette modélisation afin de tenter d'apporter des solutions et des conseils pour de futures études. Enfin, ce chapitre présente les différents résultats mesurés et discute leur validité.

3.2 Présentation du modèle expérimental

3.2.1 Géométrie du modèle

3.2.1.1 Largeur de l'avant-port

La géométrie du modèle expérimental dont nous cherchons à créer se veut d'être la plus simple possible. En effet, il n'est ici nullement besoin de modéliser une situation existante. Nous nous laisserons guider au maximum par les dimensions du bassin disponible au hall du *Laboratoire des Recherches Hydrauliques de Châtelet* réservé pour ce modèle. Les dimensions de ce bassin permettent facilement d'intégrer un avant-port sans devoir faire des modifications dans la chape de ce dernier. La largeur de l'avant-port est fixée à 1700 [mm].

3.2.1.2 Largeur du cours d'eau

La largeur du cours d'eau sera fixée par un des paramètres étudiés dans ce travail : le *rapport AP*.

Rappel, le *rapport AP* = $\frac{\text{largeur de l'avant-port } (l_x)}{\text{largeur du cours-d'eau } (l_{cd})}$

Les différents rapports étudiés ont été déterminés par similitude avec les *rapports AP* des voies d'eau wallonnes. Ces rapports et les largeurs associées du cours d'eau pour le modèle sont :

Phase	Rapport AP [-]	Largeur du cours d'eau [mm]
1	1/2	3400
2	2/5	4250
3	1/3	5100
4	1/4	6800
5	1/5	8500

Tableau 3-1 : Rapports AP et largeurs du cours d'eau étudiés

Ces largeurs s'obtiendront par la création d'une berge mobile en bois marin (voir Figure 3-1) que nous déplacerons par phases successives (voir Tableau 3-1). L'autre berge sera tout simplement le mur adjacent à l'avant-port déjà présent.

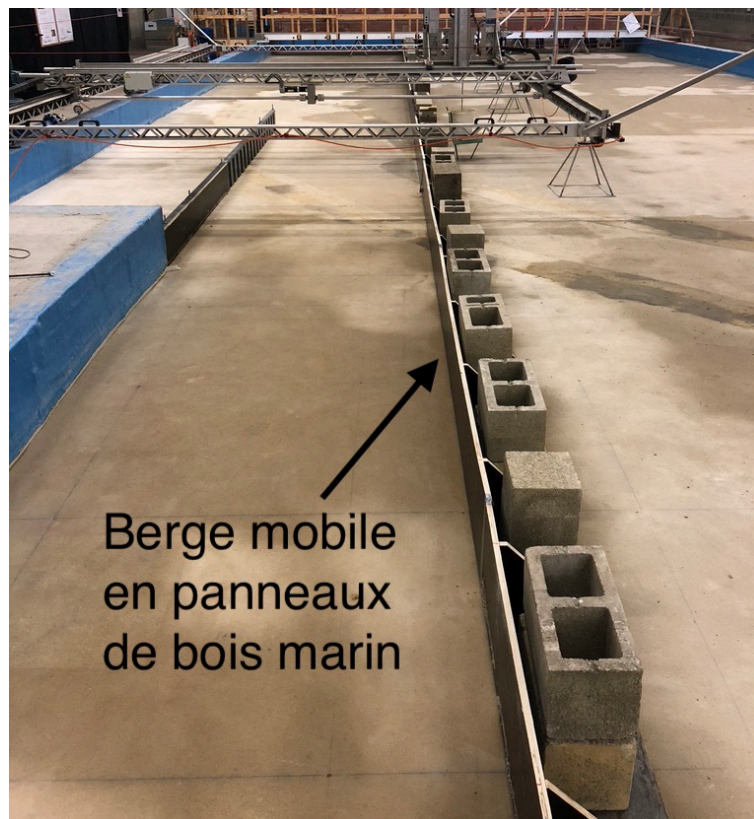


Figure 3-1 : Photo de la berge mobile

3.2.1.3 Longueur de l'avant-port

L'avant-port est délimité par les dimensions de son môle. Dans notre modèle, le môle est composé de deux parties. La première partie conçue pour être immobile et sans ouverture. La longueur de cette première partie est de 2,2 [m]. La seconde partie conçue quant à elle pour être mobile afin de pouvoir varier le nombre d'ouverture (faire varier le rapport M). La longueur de cette partie est de 3,3 [m]. Ces dimensions ont été choisies d'une part par comparaison avec des grandeurs d'avant-ports wallons déjà existant et d'autres part par les dimensions de la zone de mesure du robot automate (un rectangle de 4 [m] x 8 [m] plus détaillé dans la Section 3.2.5).

Le plan du modèle est visible en Annexe 10.3.1. Pour permettre au lecteur de se faire une meilleure visualisation, des photos sont aussi jointes en Annexe 10.3.2.

3.2.1.4 Hauteur de la surface libre

La hauteur de la surface libre a été fixée par comparaison avec des situations déjà existantes en Wallonie. Cette hauteur a été fixée à 15 [cm].

3.2.1.5 Débits choisis

Le débit choisi pour chaque essai a été déterminé selon les capacités des 2 pompes disponibles. Une capacité de 250 + 100 [L/s] (théorique) ramené à un total de 300 [L/s] (pratique) afin de travailler sur les plus grandes vitesses possibles et donc avoir des différences de vitesses (Δv) plus marquées. Un autre choix fut de travailler avec une hauteur de la surface libre constante afin d'avoir des vitesses en amont égales pour chaque configuration.

Phase	Rapport AP	Débit [L/s]
1	0,5	120
2	0,4	150
3	0,33	180
4	0,25	240
5	0,2	300

Tableau 3-2 : Débits retenus pour chaque configuration

3.2.1.6 Mise en place de l'écoulement

Afin d'atténuer au maximum les perturbations provoquées par l'entrée et la sortie du débit d'eau, deux sous-bassins sont présents en amont et en aval du modèle. En amont, les pompes à eau vont d'abord remplir le sous-bassin et c'est le débordement de ce dernier qui remplira le modèle. En aval, l'eau du modèle remplira l'autre sous-bassin qui lui-même débordera dans un bassin d'évacuation. La jonction entre les 2 bassins aval se fait par 3 vannes à clapet qui servent à évacuer le surplus d'eau du sous-bassin vers le bassin d'évacuation, permettant ainsi de régler la hauteur du plan d'eau dans le modèle.

Toujours dans l'optique de limiter les perturbations et d'avoir un flux d'eau longitudinal à l'amont, la berge mobile en panneau marin vient fermer les longueurs de ces deux sous-bassins qui ne sont pas dans l'axe du cours d'eau (voir Figure 3-2).

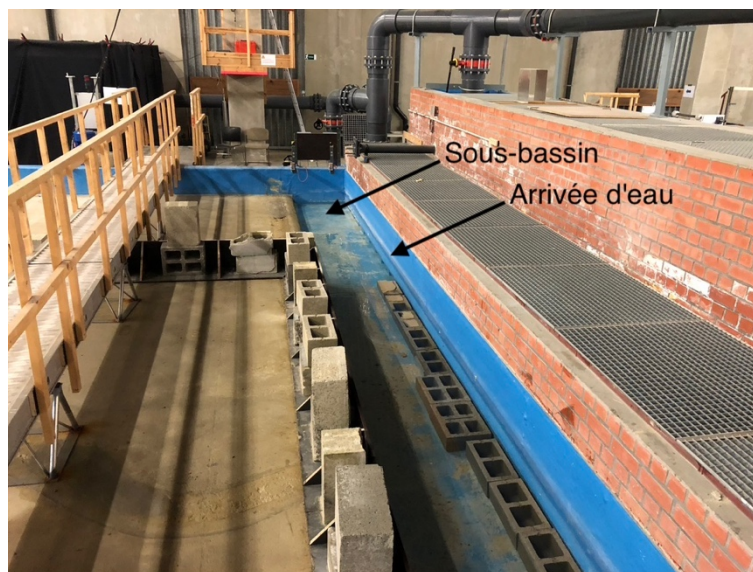


Figure 3-2 : Photo du sous-bassin amont

3.2.2 Géométrie du môle

La géométrie du môle est le second paramètre testé lors de cette expérimentation. Le môle utilisé est constitué de 2 parties. L'une fixe de 2200 [mm] de longueur et pleine. Une seconde partie de 3300 [mm] de longueur ; dite « mobile » car elle changera selon la configuration de l'essai. Un plan et une coupe (voir respectivement Figure 3-3 et Figure 3-4) montrent les caractéristiques des 4 configurations de môle retenues.

Configuration	Rapport M [-]	A_p [mm ²]	A_x [mm ²]	Nombre d'ouvertures	Largeur des ouvertures [mm]
1	1	$1650 \times h_{eau}$	$1650 \times h_{eau}$	33	50
2	$\approx 1/2$	$1650 \times h_{eau}$	$800 \times h_{eau}$	16	50
3	$1/3$	$1650 \times h_{eau}$	$550 \times h_{eau}$	11	50
4	0	$1650 \times h_{eau}$	0	0	-

Tableau 3-3 : Configurations des môles "mobiles" retenus

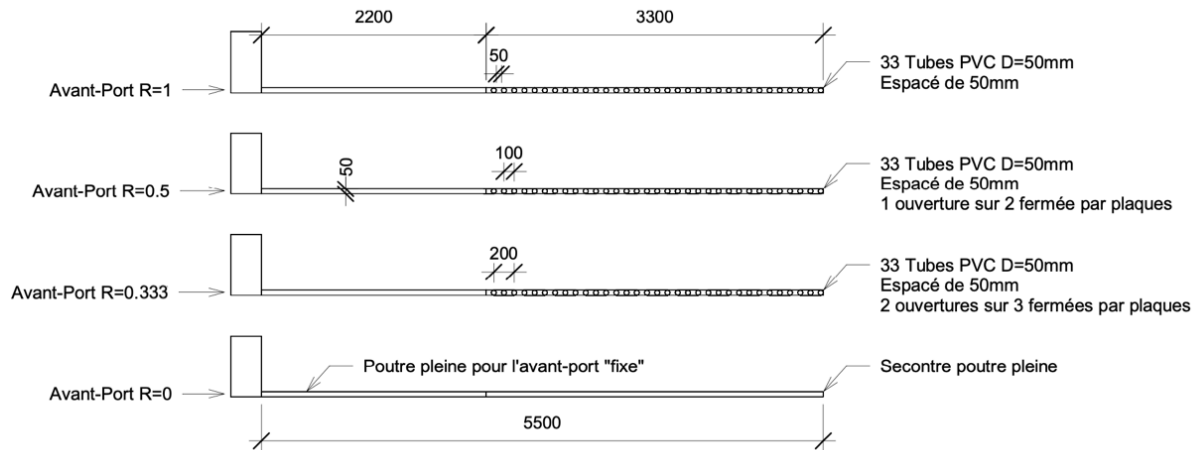


Figure 3-3 : Plans des môles retenus

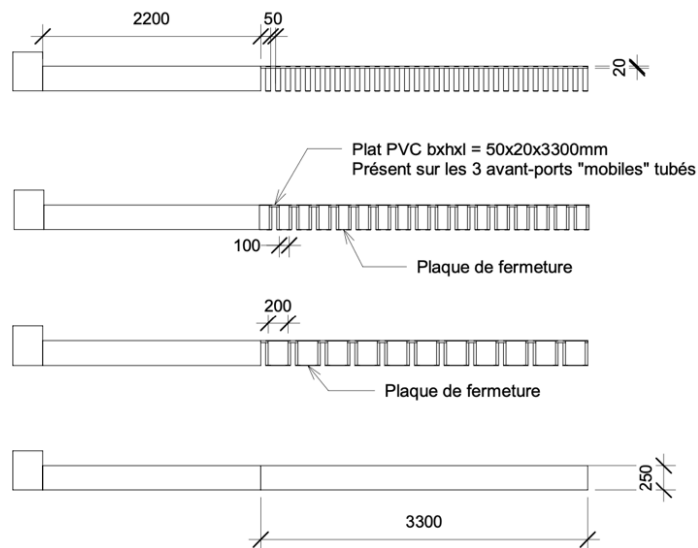


Figure 3-4 : Coupes des môles retenus

3.2.3 Pompes

Pour alimenter le modèle en eau, 2 pompes sont utilisées. L'une ayant une capacité de 250 [L/s] et une autre de capacité moindre, de 100 [L/s]. Leur débit est réglé grossièrement selon la fréquence du moteur électrique les alimentant. De 0 [Hz] (débit nul) à 60 [Hz] (débit maximal). Un réglage plus fin peut s'obtenir via des vannes papillons situées sur les conduites aval. Ces pompes (comme expliqué dans la section 3.2.1.6) débitent dans un sous bassin en amont du modèle afin de ne pas perturber l'écoulement dans ce dernier.

Bien que la fréquence du moteur alimentant ces pompes soit fixée, nous n'avons pas pu obtenir de débits constants. Deux types de variations furent observées lors des séances de mesures :

1. Des fluctuations irrégulières contenant des pics pouvant atteindre plus de 10 % de la valeur du débit désirée. Cependant les valeurs du débit moyen mesurées sur un intervalle de 30'' à 1' correspondent (à quelques [L/s] près) au débit voulu.
2. Une variation soudaine du débit moyen mesuré. Le débit moyen mesuré pouvant chuter d'une dizaine de [L/s] durant l'essai sans jamais remonter (cas rare).

Une solution pour atténuer les pics est d'allonger le temps de mesures afin de noyer ces valeurs extrêmes. Malheureusement une variation du débit moyen entrainera une invalidation de l'essai.

3.2.4 Mesure du courantométrie sur le modèle expérimental

Mesurer le courantométrie de l'écoulement avec suffisamment de précision est important afin de déterminer les gradients locaux de vitesses dans l'avant-port et de pouvoir comparer entre elles les différentes configurations étudiées. La sûreté de la navigation étant évaluée par l'avis d'experts ou par l'utilisation d'un simulateur numérique de navigation [15].

Deux techniques ont été proposées pour mesurer le courantométrie de l'écoulement :

1. Une mesure par vélocimétrie de surface au moyen de flotteurs filmés en prise de vue aérienne par des caméras digitales.
2. Des mesures ponctuelles de vitesses avec l'automatisation du déplacement d'une sonde au moyen d'un robot automate.

Finalement, seule la seconde technique fut retenue.

3.2.5 Description de l'automate

Le robot automate est un dispositif permettant le déplacement automatisé d'un instrument de mesure selon 4 axes (X, Y, Z et Θ). Il couvre une surface de 4 [m] x 8 [m], permet une course verticale de 1,5 [m] ainsi qu'une rotation de 360° autour de l'axe vertical de l'instrument. Un câble de sécurité est tendu autour du cadre de l'automate afin de prévenir d'éventuelle intrusion dans son périmètre.

La précision du positionnement est obtenue via un ensemble de mesures externes [16, p. 31] :

- Un théodolite automatique pour la position en plan (voir section 3.2.6).
- Un niveau laser automatique pour la position verticale.
- Un inclinomètre pour compenser l'influence des déformations de la structure sur la position.

Un avantage de cet automate est la possibilité de travailler dans un repère lié au modèle sans devoir faire de conversion.

Le pilotage de l'automate peut se faire manuellement via une télécommande ou par le PC de contrôle mais l'automatisation des déplacements se fait au moyen du logiciel HydroCAP3 (voir section 3.3.4). Pour se faire, l'emploi d'un maillage est nécessaire. C'est-à-dire un ensemble de coordonnées (X, Y, Z et Θ) par lesquelles l'automate va passer.

Certains comportements de l'automate sont à prendre en compte pour optimiser la conception d'un maillage [16, pp. 40, 41] :

- Lors d'un changement de coordonnées, l'automate va toujours effectuer son déplacement avec la coordonnée Z la plus haute (si $Z_1 > Z_2$, $X_1 \rightarrow X_2$ et $Y_1 \rightarrow Y_2$ puis $Z_1 \rightarrow Z_2$; si $Z_1 < Z_2$, $Z_1 \rightarrow Z_2$ puis $X_1 \rightarrow X_2$ et $Y_1 \rightarrow Y_2$).
- Lors des mouvements horizontaux, l'automate termine ses déplacements par un mouvement X et Y positif (selon les coordonnées du robot) afin de rattraper le jeu dans les pignons d'entraînement. Une séquence de mesure sera plus efficace si nous suivons ces directions.
- La vitesse de déplacement selon l'axe Y est plus rapide que celle de l'axe X. Il est donc plus rapide de parcourir les points du maillage selon l'axe Y avant de se déplacer dans l'axe X.
- Il est plus efficace d'effectuer toutes les mesures sur une verticale avant de se déplacer vers une autre position.
- Pour des déplacements horizontaux supérieurs à 250 [mm], l'automate marque un temps d'arrêt afin de vérifier sa position absolue via le théodolite.

3.2.6 Théodolite

Instrument mesurant l'inclinaison selon les plans horizontaux et verticaux. Il permet de déterminer la position exacte de l'automate par une triangulation. Pour ce faire, une cible est placée sur le robot et le théodolite, autonome dans ces mesures, va automatiquement la suivre. Ce dernier, connecté via une liaison Bluetooth avec le contrôleur de l'automate, va effectuer une mise à jour de la position de l'automate après chaque déplacement. Cette mise à jour dure en moyenne de 15'' jusqu'à 45'' voire plus dans quelques cas peu fréquents (2-3%) [16, p. 41]. Bien qu'il fasse partie intégrante de l'automate, le théodolite fait l'objet d'une section à part car ce dernier a entravé le bon déroulement des essais. En effet, nous avons pu constater différentes erreurs liées au théodolite lors de nos essais. Cette section présentera donc, tout d'abord, les différentes constatations obtenues lors des essais effectués dans le cadre de ce mémoire. Ensuite, nous poserons quelques hypothèses sur la cause de ces défaillances. Pour finir, nous essayerons de fournir quelques solutions à cette problématique.

Dans le but d'optimiser le nombre de mesures avec le temps disponibles, il a été décidé de faire fonctionner le modèle expérimental en régime continu (Ce mode opératoire sera plus détaillé dans la section 3.5). Or, nous avons constaté que l'automate s'arrêtait à la suite d'une perte de connexion avec le théodolite quelques heures après avoir lancé une séance de mesure. Le tableau en Annexe 10.3.5 récapitule toutes les *erreurs théodolites* obtenues lors des différents essais.

Deux types de défaillance peuvent être repérées :

1. Un temps anormal ($t \gg 45''$) de mise à jour de la position de l'automate.
2. Une perte de connexion entre le théodolite et le contrôleur de l'automate.

Une analyse statistique tente d'apporter une réponse quant au temps disponible du théodolite avant que ce dernier provoque une erreur et stoppe l'essais. Celle-ci donne comme résultat que le temps médian avant que le théodolite plante est de 13h13'. Quant au temps issu du 1er quartile, il est de 12h. Le temps minimal constaté est de 10h37'. La figure en Annexe 10.3.5 montre les résultats de cette analyse. Nous recommandons donc de ne pas programmer pour des essais ultérieures un temps de mesures dépassant 12h.

3.2.7 Niveau laser et émetteur laser

Le rôle du niveau laser est de mesurer la variation éventuelle de hauteur de l'automate afin qu'il puisse la corriger. Pour se faire un émetteur laser, placé en dehors de la zone d'essai, envoie à 360° un laser qui va être détecté par le niveau laser. Lui-même est fixé sur l'automate qui reçoit automatiquement un signal de correction de niveau.

Lors de la mise en place de cette modélisation expérimentale nous avons rencontré certains 2 problèmes dû à la position de l'émetteur laser.

1. La lecture du laser est obstruée par un organe de l'automate. Dans notre situation l'organe était le bras servant à dévier les câbles reliant la sonde à sa carte d'acquisition. Ce problème n'est pas survenu lors des premiers essais car la densité des points de mesures était faible. Mais lorsque la densité des points de mesure a été augmentée. La probabilité de tomber sur une zone où la lecture est altérée augmente en fonction de la densité des points de mesure. La solution fut de fixer le niveau à un autre emplacement sur l'automate et de déplacer l'émetteur dans une autre zone.
2. La lecture laser est obstruée par le câble de sécurité. Un câble tendu n'est pas parfaitement horizontal et la flèche est d'autant importante que la portée, ici de 8 [m], est grande. En essayant de palier au problème précédent, nous sommes tombés sur un autre problème. La lecture était altérée par la flèche du câble. La solution fut de surélever l'émetteur laser.

3.2.8 Supports de l'automate

L'automate, dans cette configuration, a été conçu pour reposer sur le bord du bassin d'une part et sur des pieds situés dans le bassin. Les écoulements des précédentes expérimentations du hall d'essais hydrauliques de Châtelet ne dépassaient pas les 4 [m] de largeur de l'automate. Le support du cadre de l'automate pouvait donc reposer sur des blocs de béton sans perturber l'écoulement puisque situés en dehors. Or, dans le cadre de nos essais, la largeur maximale de l'écoulement peut atteindre 8,5 [m]. Un rapide rappel des dimensions de l'automate (8 [m] x 4 [m]) montre que le l'écoulement devra donc passer dans la zone où se situe ces supports de la structure.

Pour tenter de diminuer au maximum les perturbations dans l'écoulement dus à la présence des 4 supports de la structure de l'automate, il a donc été décidé d'en concevoir et d'en fabriquer de nouveaux afin de remplacer les blocs de béton usuellement utilisés. Un plan et une coupe avec les côtes détaillées sont visibles en Annexe 10.3.3.

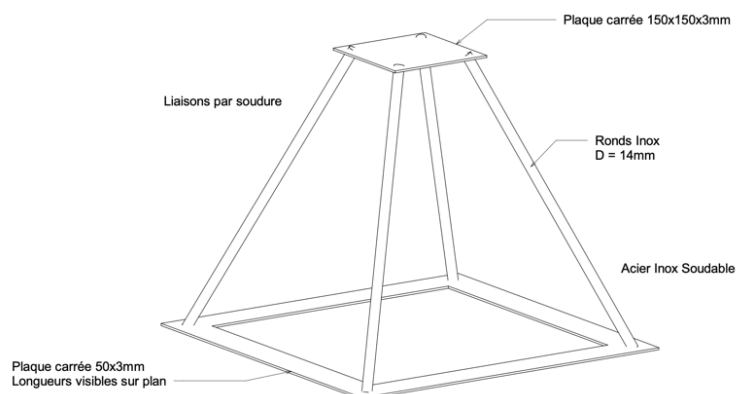


Figure 3-5 : Vue 3D des supports de l'automate

3.2.9 Supports de la passerelle amont

Toujours dans une vision d'atténuer au maximum les perturbations parasites dans l'écoulement, il fut aussi décidé de concevoir et de fabriquer de nouveaux supports plus hydrodynamiques. Un plan et une coupe avec les côtes détaillées sont visibles en Annexe 10.3.3.

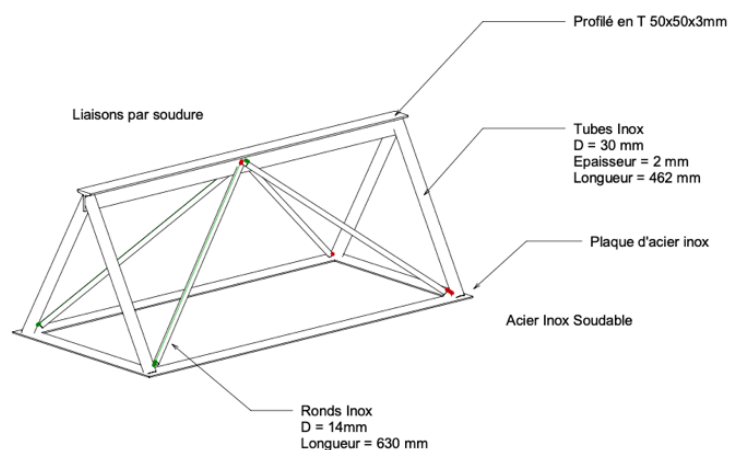


Figure 3-6 : Vue 3D des supports de la passerelle amont

3.2.10 Fuites d'eau

Plusieurs petites fuites d'eau dans le modèle ont été détectées. Celles-ci influencent la hauteur du plan d'eau dans le modèle. Or nous voulons que la surface libre soit la plus plane possible. Ces fuites influencent aussi sur les vitesses attendues. Comme nous pouvons difficilement mesurer ces pertes, les bilans de masse ne seront pas tout à fait exacts.

1. Fuite d'eau par les panneaux marins. La berge mobile n'étant pas parfaitement étanche, l'eau arrive à s'infiltrer dans la partie fermée du modèle. Cette perte devient négligeable lorsque la hauteur d'eau dans cette partie égale la hauteur d'eau dans le modèle. Malheureusement le volume à remplir étant important et la fuite petite, il n'est pas possible d'atteindre cet état d'équilibre à chaque essai.
2. Fuite au niveau des clapets des 3 vannes en aval. Normalement, l'eau devrait uniquement s'écouler par le dessus du clapet par débordement. Ici, des fuites par le dessous et les côtés du clapet sont observées. La vitesse de cet écoulement étant proportionnelle à la racine carrée de la hauteur d'eau⁴, une fluctuation du niveau d'eau dans le modèle va survenir (voir Figure 3-7).

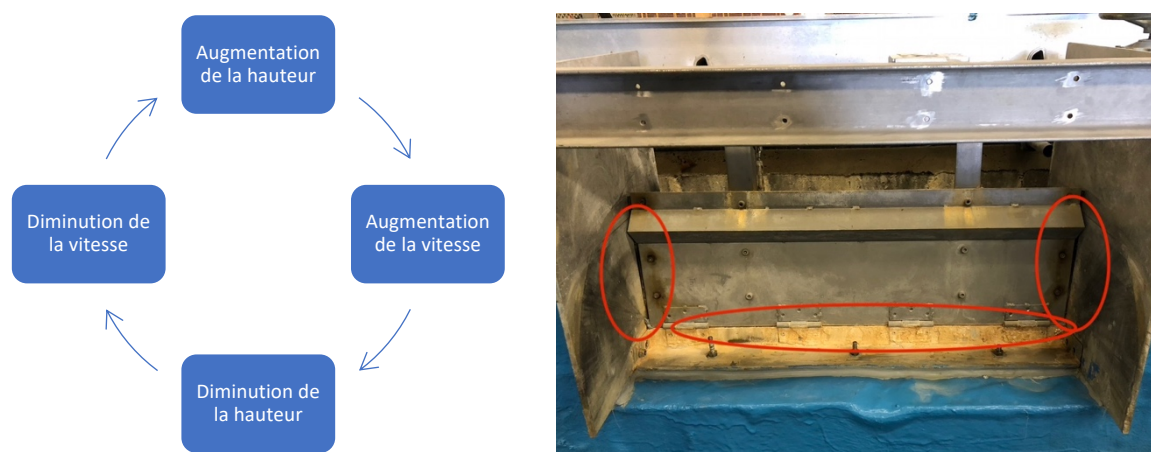


Figure 3-7 : Cycle de la variation de la hauteur du plan d'eau & positions des fuites

⁴ Rappel de la formule du principe de Torricelli : $v = \sqrt{2gh}$

3.3 Instruments de mesures

3.3.1 Sonde de vitesse électromagnétique

La sonde fixée à l'automate pour mesurer les composantes X et Y du champ de vitesse est une sonde de vitesse électromagnétique. Pour mesurer ces vitesses, un champ magnétique est généré par la sonde et deux paires d'électrodes mesurent le courant électrique généré par l'écoulement dans ce champ [16, p. 28].

3.3.1.1 Référence et caractéristiques principales de la sonde

Sonde bidirectionnelle **P-EMS-30** conçue par **WL Delft Hydraulics** (voir Figure 3-8). La tête de la sonde est un ellipsoïde de 33 [mm] de diamètre et de 11 [mm] de hauteur. Le volume de mesure est un cylindre de 50 [mm] et 5 [mm] d'épaisseur sous la sonde. Le signal de sortie +/- 10 [V] est disponible pour chaque composante de vitesse. Le fond d'échelle est paramétrable à +/- 1 [m/s] ou +/- 2,5 [m/s] via le conditionneur de la sonde [16, p. 28].

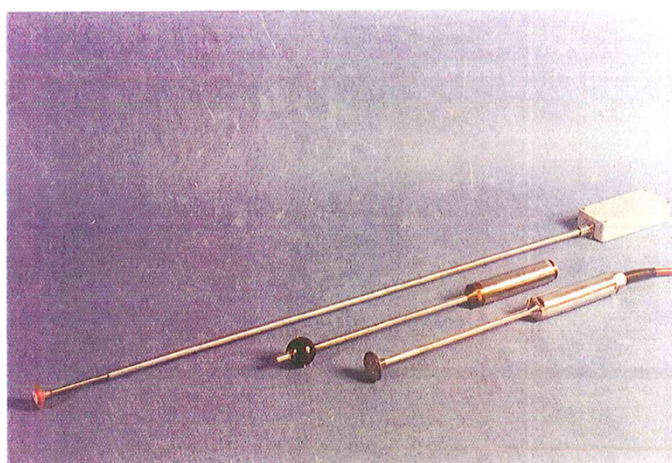


Figure 3-8 : Photo de la sonde P-EMS 30 [17]

3.3.1.2 Mode de fonctionnement utilisé

Fonction	Valeur	
Output	X & Y actual	Renvoie les valeurs mesurées mises à jour à une fréquence de 50 [Hz]
Range	1 m/s	Fixe le fond d'échelle à 1 [m/s]
Measurement	Continuous	Mesure de façon de continue
E-30 probe	Ellps30 @ Mains	Fixe la fréquence d'excitation de la sonde à 25 [Hz]. Paramètre recommandé pour la mesure de champ de vitesse [17, p. 16]

Tableau 3-4 : Paramètres sonde P-EMS 30

3.3.1.3 Recommandation d'usage

- La sonde doit être immergée plusieurs jours dans un seau d'eau.
- Une mise à zéro de la sonde est nécessaire avant chaque essai.

3.3.1.4 Problèmes survenus avec la sonde

Plusieurs anomalies ont été détectées lors des premiers essais :

Le champ de vitesse mesuré était incohérent. Des vitesses non longitudinales étaient obtenues à l'amont alors qu'un champ de vitesse longitudinale était attendu (voir Figure 3-9). L'orientation désaxée du champ de vitesses par rapport à l'écoulement combiné à des vitesses purement transversales dans la zone de l'avant-port (des vitesses quasi-nulles étaient attendues) nous ont mis sur la piste d'une défaillance de la composante Y de la sonde.

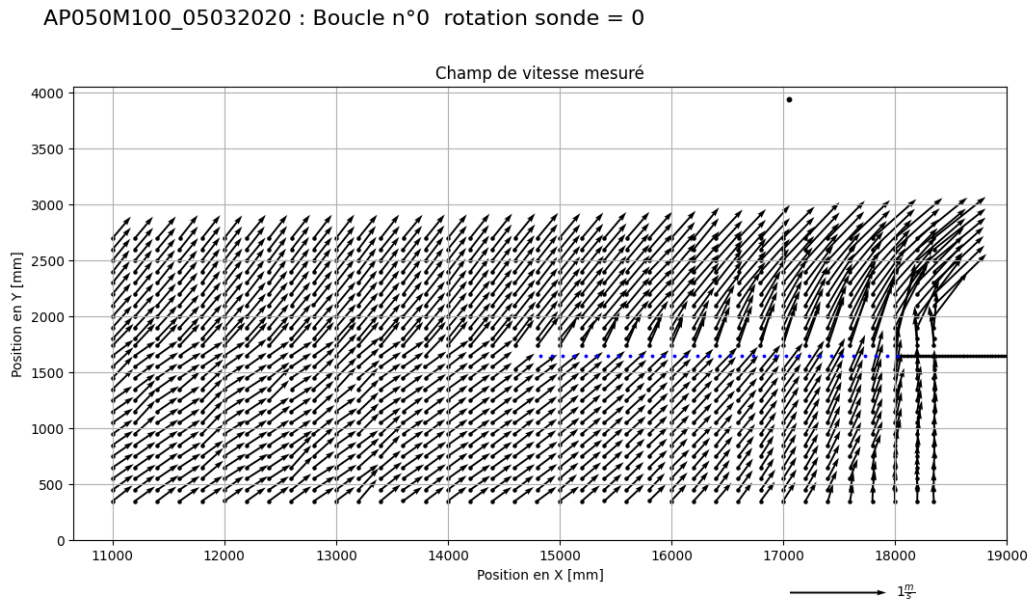


Figure 3-9 : Exemple d'une anomalie mesurée I

Pour tenter de vérifier notre hypothèse, nous avons modifié notre protocole de test en effectuant une seconde boucle de mesure lors d'un essai dans laquelle l'automate pivote la sonde de 90°. Cette hypothèse s'est vérifiée avec notre protocole de test. Lors d'un deuxième essai, avec cette fois la sonde pivotée de 90°, nous obtenons un champ de vitesse parfaitement longitudinal en amont et des vitesses purement longitudinales dans la zone aval de l'avant-port (voir Figure 3-10).

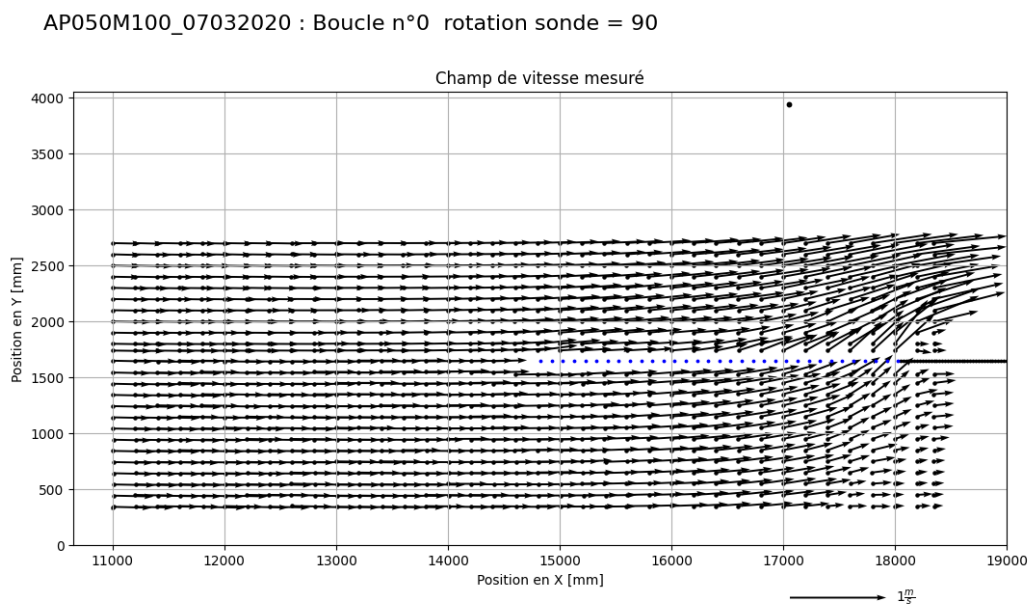


Figure 3-10 : Exemple d'une anomalie mesurée II

Pour remédier à cette défaillance, une solution était de doubler chaque essai afin de faire un passage qui mesure la composante X puis un autre mesurant la composante Y de la vitesse. Avant de procéder ainsi, une vérification de la composante X est nécessaire. Pour la vérifier, un bilan de flux sur une coupe transversale en amont fut réalisé. Le plan d'eau étant supposé plane, les fuites négligées et la largeur constante, nous nous attendons à avoir théoriquement :

$$\begin{cases} V_x = \frac{Q}{h_{eau} \cdot l_{canal}} = \frac{0,12 \left[\frac{m^3}{s} \right]}{0,15 [m] \cdot 3,4 [m]} = 0,235 \left[\frac{m}{s} \right] \\ V_y = 0 \left[\frac{m}{s} \right] \end{cases}$$

Autrement dit, un moyen de ne pas invalider les mesures est de calculer l'intégrale du profil vitesse longitudinale de la coupe transversale la plus en amont. Si le débit donné par cette dernière ne vaut pas 120 [L/s], la mesure est d'office invalidée.

Le calcul du débit pour chaque essai fut calculé comme ci :

$$Q [L/s] = \text{Intégrales des } v \left[\frac{m^2}{s} \right] \cdot \frac{\text{larg du canal } [m]}{\text{larg des mesures } [m]} \cdot h \text{ mesurée à l'amont} [m] \cdot 1000$$

Il a été calculé pour l'essai AP050M100_07/03/2020 un débit Q = 216,54 [L/s]. Le tableau en Annexe 10.3.6 donne le débit pour chaque essai et donne leur validité.

Un dernier type d'anomalie a été détecté. Contrairement au deux premiers, la sonde va ici subir une dérive durant l'essai. Cette anomalie peut être observée sur la Figure 3-11.

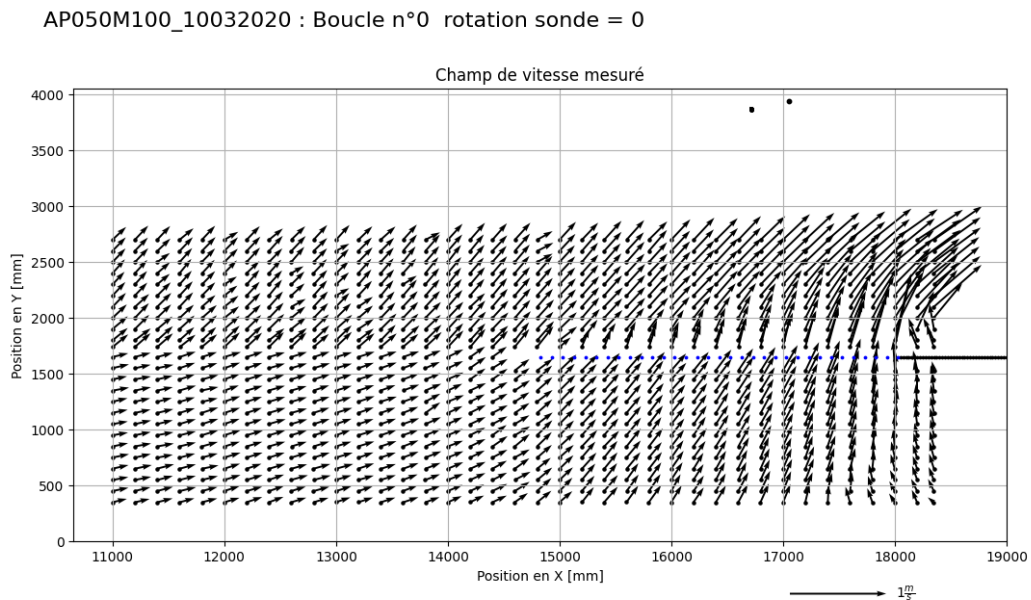


Figure 3-11 : Exemple d'une anomalie mesurée III

La sonde **PEMS-30** a été remplacée par une nouvelle le 10/04/2020. Depuis, ces défaillances n'ont plus été constatées.

3.3.2 Capteur de niveau à ultrasons

Pour connaître le niveau à l'amont et à l'aval du modèle, deux capteurs de niveau à ultrasons ont été installés : un à l'amont et l'autre à l'aval. Le principe de fonctionnement de ce type de capteur repose sur l'émission d'un train d'ondes qui sont réfléchies par la surface libre. C'est l'intervalle entre l'aller-retour de l'onde qui permet de déterminer la distance. Cette technique de mesure est plus efficace en présence d'une surface libre non perturbée [16, p. 20].

La référence des sondes utilisées est **Baumer Unam18U6903**. Ce type de sonde délivre un signal brut qui faudra traiter afin de connaître la valeur mesurée (ceci sera abordé dans la section 3.3.4).

3.3.3 Débitmètre électromagnétique

Afin de mesurer le débit injecté dans le modèle, deux débitmètres électromagnétiques sont placés respectivement sur la conduite de chaque pompe (celle de 250 [L/s] et de 100 [L/s]) entre ces dernières et le sous-bassin amont. Leur fonctionnement repose sur la mesure du courant électrique généré par l'écoulement d'un fluide conducteur au sein d'un champ magnétique. Ce courant étant proportionnel à la vitesse du fluide, la connaissance de la géométrie de la conduite permet de connaître avec précision ($\approx 0,2\%$) le débit injecté [16, p. 14].

La référence des débitmètres utilisé est **Endress-Hauser Promag 53W**. Ces sondes permettent de régler leur fond d'échelle. Ces derniers ont été fixés à la capacité maximale de chacune des pompes. Le signal sortant de ces sondes est donné en 4-20 [mA]. Il sera ensuite converti en signal 0-10 [V] via une résistance adéquate afin de pouvoir être interprété par HydroCAP3.

3.3.4 HydroCAP3

Le pilotage automatisé du robot automate et l'acquisition des mesures des différents instruments de mesure présentés ci-dessus se font via le logiciel *HydroCAP3*.

3.3.4.1 Pilotage du robot automate

L'automatisation du robot se fait via la lecture d'un fichier texte par *HydroCAP3* où chaque ligne représente un jeu de coordonnées (X, Y, Z, Θ) d'un point sur lequel le logiciel va déplacer l'automate. L'algorithme de déplacement se faisant comme suit :

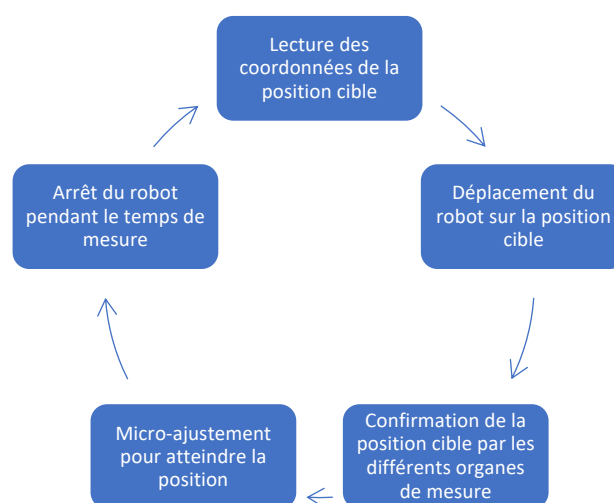


Figure 3-12 : Algorithme de déplacement du robot automate

3.3.4.2 Acquisition des données

Pour recueillir les mesures des différents instruments, les différents instruments de mesures sont connectés à une carte d'acquisition. Ce type de carte permet de convertir le signal analogique en signal numérique. La carte d'acquisition utilisée lors de ces essais permet de traduire le signal 0-10 [V] analogique en signal 0-10 [V] numérique. C'est le logiciel *HydroCAP3* qui va lire et interpréter ce signal numérique en une grandeur physique.

HydroCAP3 interprète le signal transmit par la carte d'acquisition comme une relation linéaire. Cette relation lie la grandeur physique mesurée X comme ceci :

$$X = a.V + b \quad \text{Où } V \text{ est la tension mesurée ; } a \text{ et } b \text{ des constantes.}$$

Pour ce type d'interprétation, il est donc nécessaire de fournir à *HydroCAP3* les valeurs des constantes a et b pour chacun des instruments de mesures utilisés. Ceux-ci sont fournis au logiciel dans un fichier texte de calibration. Les gammes de mesures, le niveau de référence, Etc... changeant entre chaque étude (ajoutez à ça une possible dérive des capteurs). Il est nécessaire de faire une campagne de calibration sur chaque capteur afin de recueillir des points références de mesure. Points qui permettent d'obtenir les constantes a et b via une régression linéaire.

L'enregistrement des données se fait dans un fichier texte. Un fichier est créé par point de mesure. Dans ce fichier, sont consignés les valeurs des instruments de mesure interprétées par *HydroCAP3*, la position du robot automate et l'heure à laquelle la mesure a été prise. Comme précisé plus haut, la durée des mesures relevées par *HydroCAP3* est fixée par l'utilisateur. La fréquence d'échantillonnage l'est aussi. Il y a donc dans chaque fichier texte de mesure ponctuelle $T_{mesure} \cdot f_{échantillonnage}$ relevés. A la fin de l'essai, lorsque le logiciel aura piloté le robot et relevé les mesures sur tous les points du maillage, *HydroCAP3* va créer un dernier fichier texte : appelé fichier *_sum*. Ce fichier est une synthèse des relevés de mesures. Pour chaque point : sera consigné l'heure à laquelle la mesure a commencé, la position du robot automate, la moyenne de la mesure interprétée et son écart-type.

3.4 Essais programmés et effectués

Dans le cadre de cette étude, 20 essais sont programmés. Chaque essai correspondant à une configuration d'avant-port spécifique. Un rapport AP et M spécifiques. Le Tableau 3-5 récapitule les différents essais programmés dans le cadre de ce travail.

N°	Nom de l'essai	Rapport AP	Rapport M
1	AP050M100	1/2	1
2	AP050M050	1/2	1/2
3	AP050M033	1/2	1/3
4	AP050M000	1/2	0
5	AP040M100	2/5	1
6	AP040M050	2/5	1/2
7	AP040M033	2/5	1/3
8	AP040M000	2/5	0
9	AP033M100	1/3	1
10	AP033M050	1/3	1/2
11	AP033M033	1/3	1/3
12	AP033M000	1/3	0
13	AP025M100	1/4	1
14	AP025M050	1/4	1/2
15	AP025M033	1/4	1/3
16	AP025M000	1/4	0
17	AP020M100	1/5	1
18	AP020M050	1/5	1/2
19	AP020M033	1/5	1/3
20	AP020M000	1/5	0

Tableau 3-5 : Essais programmés

Le nombre d'essais programmé n'égal pas le nombre d'essais effectués. Plusieurs pré-essais ont été effectués afin de déterminer :

- Le maillage optimal à utiliser.
- La hauteur du plan de mesure.

De plus, comme expliqué dans la Section 3.3.1.4, des problèmes de répétabilité et de vitesses mesurées par la sonde ont entraîné une multiplication des séances de mesure pour un même essai. Le Tableau 10-2 récapitule les essais effectués lors de cette modélisation expérimentale.

3.5 Mesures réalisées

3.5.1 Essais préliminaires

Avant de lancer les mesures pour les différents essais programmés, des pré-essais ou essais préliminaires sont nécessaires afin de confirmer le protocole de test.

Un premier essai est lancé sur un maillage peu dense. Ce dernier a comme objectif de s'assurer le bon déplacement du robot et de donner un premier aperçu du champ de vitesse. Comme nous pouvons le voir sur la Figure 3-13, ce premier essai a mesuré un champ de vitesse totalement incohérent. L'hypothèse que la sonde n'a pas été suffisamment immergée dans une eau calme fut émise et un second essai fut programmé 2 jours plus tard.

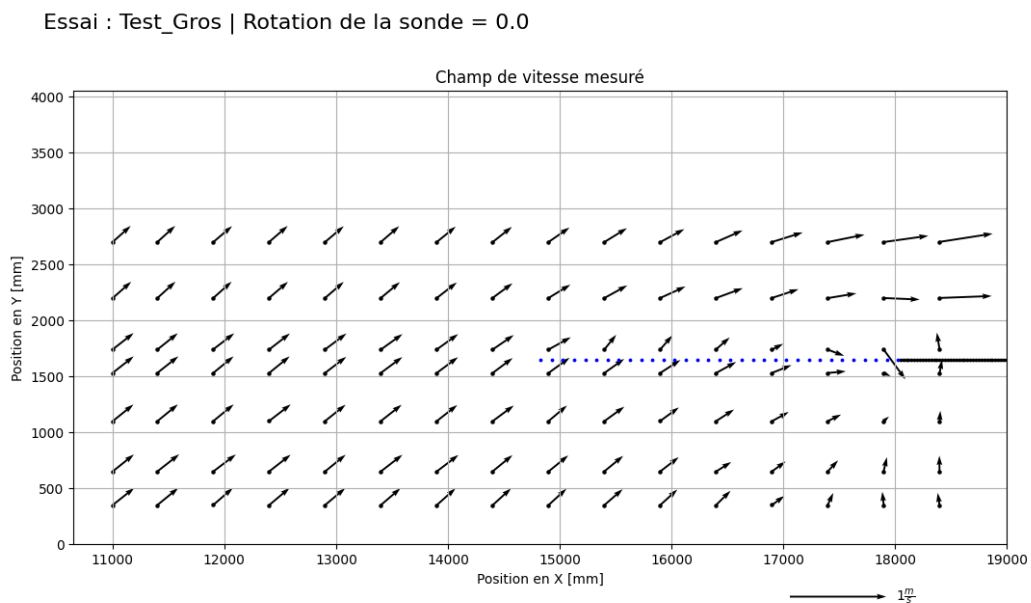


Figure 3-13 : Pré-essais - Champ de vitesse mesuré I

Un maillage plus optimal a été mis en place pour ce second essai. Moins dense à l'amont où un profil de vitesse purement longitudinal est attendu. Plus dense vers l'aval dans la zone de l'avant-port. L'allure de champ de vitesse mesuré correspond à celle attendue. Cependant la densité du maillage n'a pas été jugée assez grande pour offrir suffisamment de précision. La Figure 3-14 représente le champ de vitesse mesuré.

Essai : Test_Fin | Rotation de la sonde = 0.0

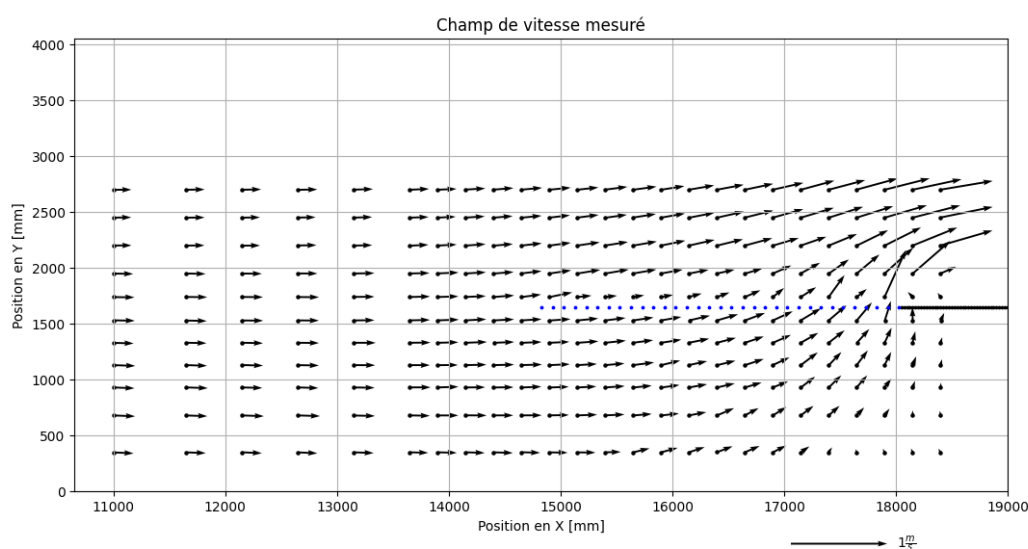


Figure 3-14 : Pré-essais - Champ de vitesse mesuré II

Avant de commencer les différents essais avec des maillages plus denses, il faut aussi s'intéresser aux profils verticaux de vitesses. En effet, si ces profils sont suffisamment semblables entre eux, les mesures des champs de vitesse peuvent rester en plan. Pour se faire, des zones ont été délimitées selon les caractéristiques des vitesses mesurées ($\approx U$, $\approx V$, $\approx \Theta$). Quatre points ont été retenus. Les zones et les 4 points sont visibles sur la Figure 3-15.

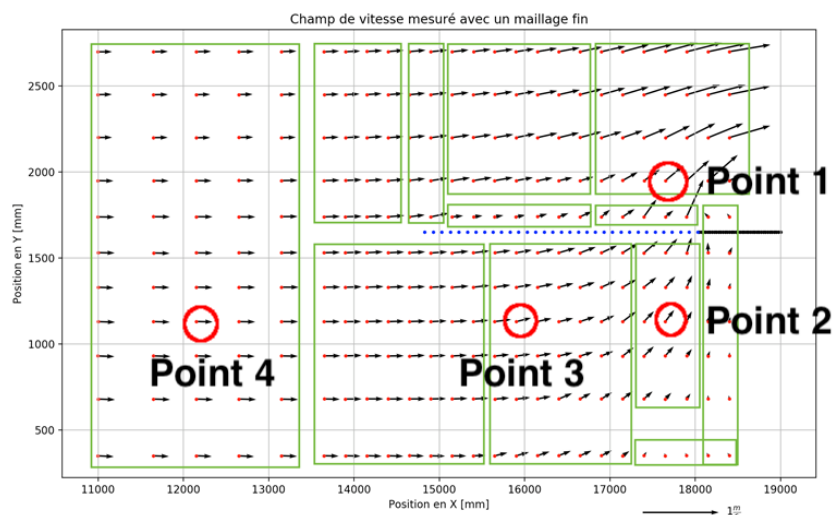


Figure 3-15 : Pré-essais - Choix des points pour mesures profils verticaux de vitesse

3.5.2 Essai profils verticaux de vitesse

Cet essai a eu trois buts. Le premier fut de valider une mesure en plan. C'est-à-dire une mesure à hauteur Z constant. Le deuxième fut de déterminer quelle hauteur Z est pertinente. Le dernier quant à lui est de définir le temps de mesure. Pour accomplir cela, il a été décidé de prendre des mesures tous les 1,5 [cm] de la surface libre ($Z = 15$ [cm]) à 1,5 [cm] pour chacun des 4 points présentés sur la Figure 3-15. Le temps de mesures de ces 40 points (4 x 10 points) de mesures choisies est de 5'.

La Figure 3-16 montre les profils verticaux de vitesses des 4 points retenus. Les verticales orange donnent les valeurs des vitesses moyennes de ces différents profils. Une certaine incohérence sur les vitesses pour les mesures où $Z = 150$ [cm] peut être observée. Il est, en effet, attendu d'avoir des vitesses au niveau de la surface libre qui égalent ou soient légèrement plus faibles que celles situées juste en dessous de la surface libre. Ce phénomène est dû à la friction entre l'eau et l'air. Cette incohérence est expliquée par la géométrie de la sonde qui, dû à sa taille, nécessite d'être immergée d'au moins >1 [cm] (Rappel : la hauteur de la surface libre du modèle est de 15 [cm]). Les valeurs mesurées aux points $Z = 150$ [mm] n'ont donc pas été prises en compte pour le calcul des valeurs moyennes. La faible différence entre les valeurs mesurées et la valeur moyenne conforte notre idée de mesurer le champ de vitesse du modèle en plan. La hauteur de mesure choisie fut 80 [mm] car c'est la hauteur à laquelle la vitesse mesurée \approx la vitesse moyenne dans les 4 profils verticaux établis.

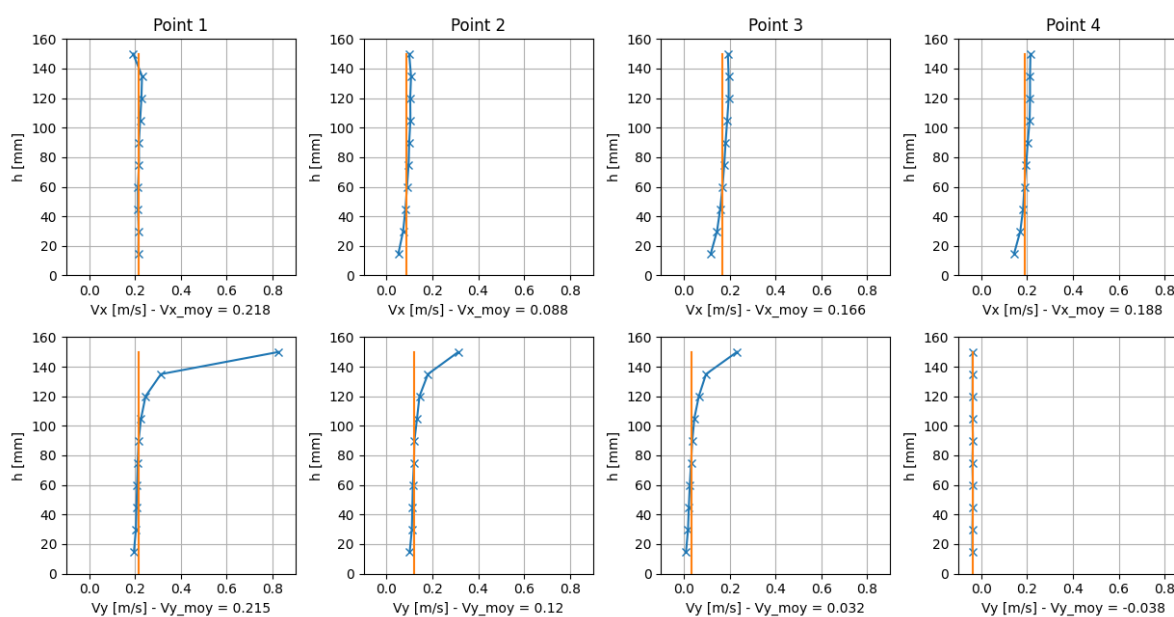


Figure 3-16 : Profils verticaux de vitesse des 4 points retenus

Comme abordé précédemment, beaucoup d'imprécisions surviennent lors d'une mesure. Il y a tout d'abord les imprécisions liées aux différents instruments. Ensuite, il y a les imprécisions liées au modèle expérimental (variation du débit, variation de la hauteur d'eau...) et pour finir les imprécisions liées à l'écoulement en lui-même. Il faut donc déterminer le temps de mesure minimal permettant d'approcher la valeur exacte. Pour déterminer ce temps minimal, nous avons fait des moyennes glissantes de 30'', 60'' et 120'' sur les 40 mesures de 5'. Puis nous avons calculé les écart-types entre ces moyennes et la valeur de référence : la valeur moyenne mesurée sur 5'. La Figure 3-17 montre cette procédure. Elle met aussi en évidence le bruit d'une mesure non moyennée. Vous trouvez en Annexe 10.3.7 un tableau reprenant toutes les valeurs calculées.

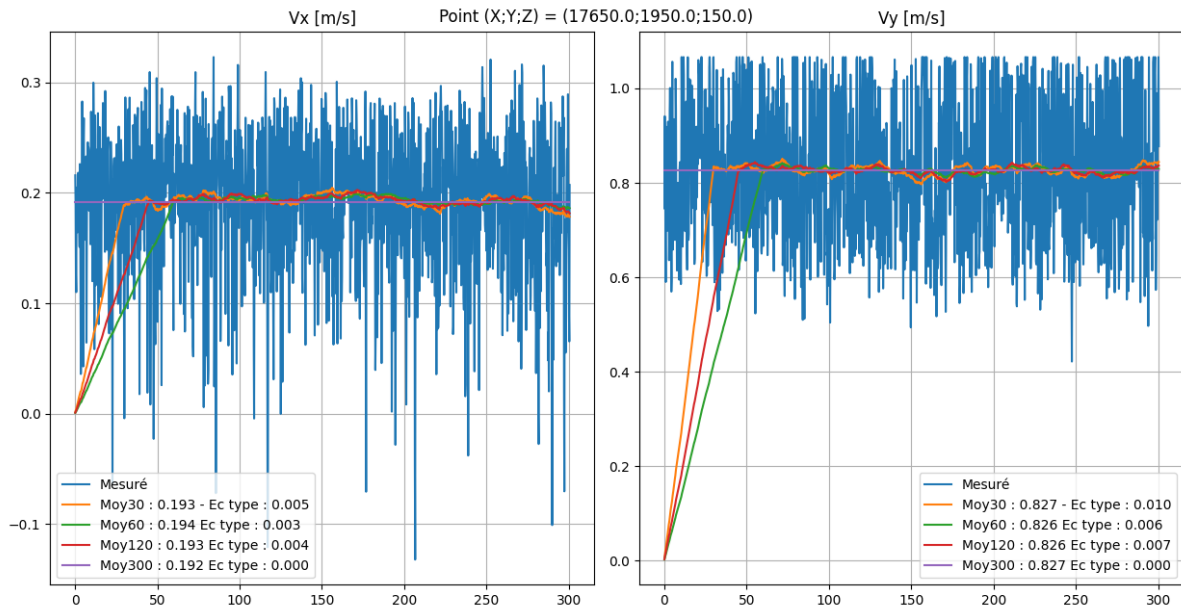


Figure 3-17 : Exemple de moyenne glissante

Une analyse via les diagrammes en boîte (voir Figure 3-18) permet de conclure qu'un temps de 30'' est suffisant. En effet, le coût temporel de prendre des mesures sur 60'' ou 120'' ne vaut pas le maigre gain obtenu.

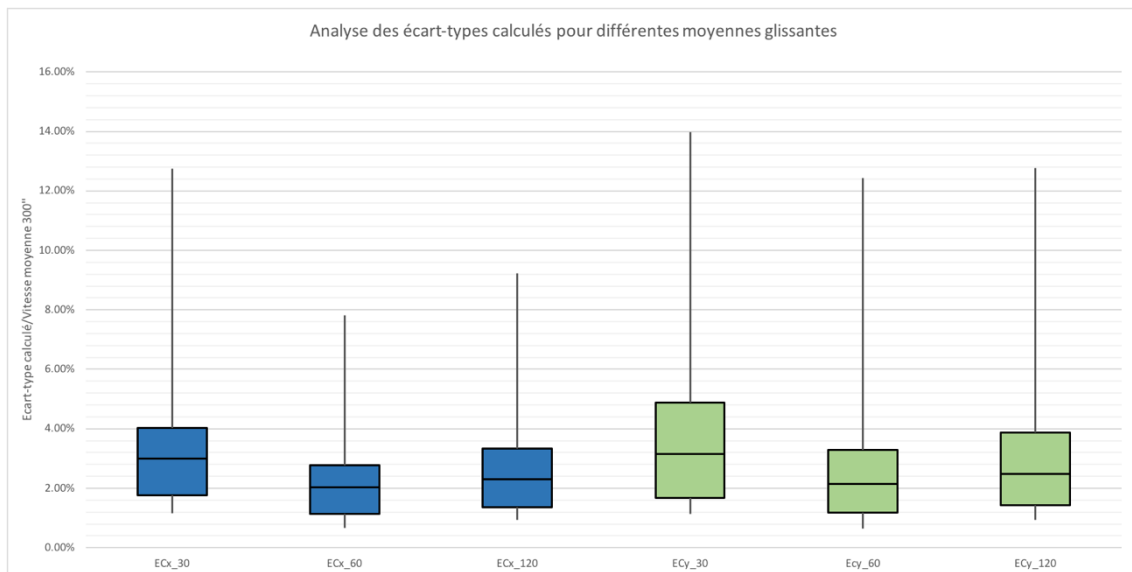


Figure 3-18 : Diagramme en boîte des écart-types calculés

3.5.3 Essais AP050M100

Après avoir validé via l'essai précédent (voir Section 3.5.2) que le courantométrie de l'écoulement puisse se faire par une mesure ponctuelle en plan, le maillage définitif pour chacune des 20 configurations fut créé. Ce dernier forme un rectangle de 7,4 [m] par 2,35 [m]. Le Δ_y entre chaque mesure est de 10 [cm] et le Δ_x est de 20 [cm]. Il y a au total 930 points de mesure destinés à établir le courantométrie. Afin de s'assurer que la sonde ne dérive pas durant l'essai, 7 points de mesures sur la même position, dans un seau d'eau calme, ont été ajoutés au milieu de l'essai. La Figure 3-19 montre ce maillage ainsi que le sens du parcours de la sonde (étape de 1 à 5).

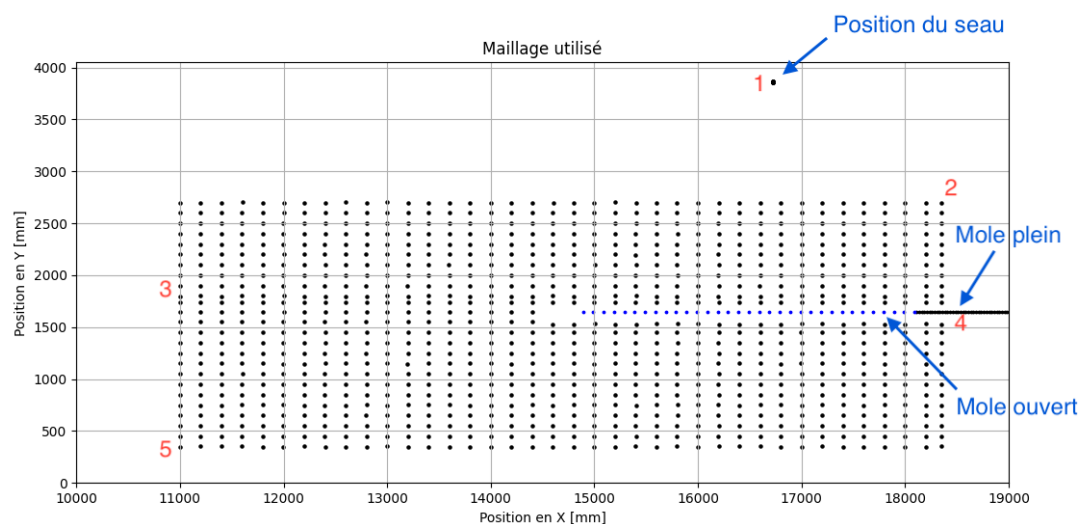


Figure 3-19 : Maillage plan utilisé

Bien que l'essai précédent (voir section 3.5.2) nous ait montré qu'un temps de mesure plus long aurait permis d'affiner nos mesures, la durée de mesure ponctuelle a été fixée à 30''. Un temps plus long aurait posé des problèmes au niveau du théodolite. Comme expliqué dans la section 3.2.6, le théodolite impose un temps d'essai inférieur à 12h.

Durant ces premiers essais *AP050M100* nous avons rencontré des anomalies lors des différentes mesures effectuées. Ces anomalies étaient dues à une des composantes de mesure de la sonde (la composante Y). En attendant le remplacement de cette dernière nous avons dédoublé les essais. Un premier essai pour mesurer les vitesses longitudinales avec la composante X de la sonde (supposée fonctionnelle). Un second passage avec la sonde pivotée de 90° pour mesurer les vitesses transversales. D'autres résultats de ces mesures sont montrés en Annexe 10.3.8.

Par suite de ces résultats non cohérents et de la non-répétabilité de ces essais, aucune de ces mesures ne fut retenues.

3.5.4 Essais *AP050M100* avec la nouvelle sonde

Après le changement le sonde, 3 essais ont été réalisés. Le résultat d'une de ces mesures est visible sur Figure 3-20. D'autres sont exposés en Annexe 10.3.9.

Pour valider ces 3 essais, un bilan de débit a été fait sur la coupe transversale la plus en amont (en $X=11000$ [mm]). Ces essais respectent ce critère (voir Annexe 10.3.6).

Ensuite, le critère de répétabilité est déterminé par les écart-types des vitesses (scalaires, longitudinales et transversales) et de l'orientations. Un écart-type inférieur à 5% de la vitesse moyenne mesurée au point pour les vitesses et inférieur à 5° pour l'orientation fut décidé comme critère assurant la répétabilité.

Essai : AP050M100_10042020 | Rotation de la sonde = 0.0

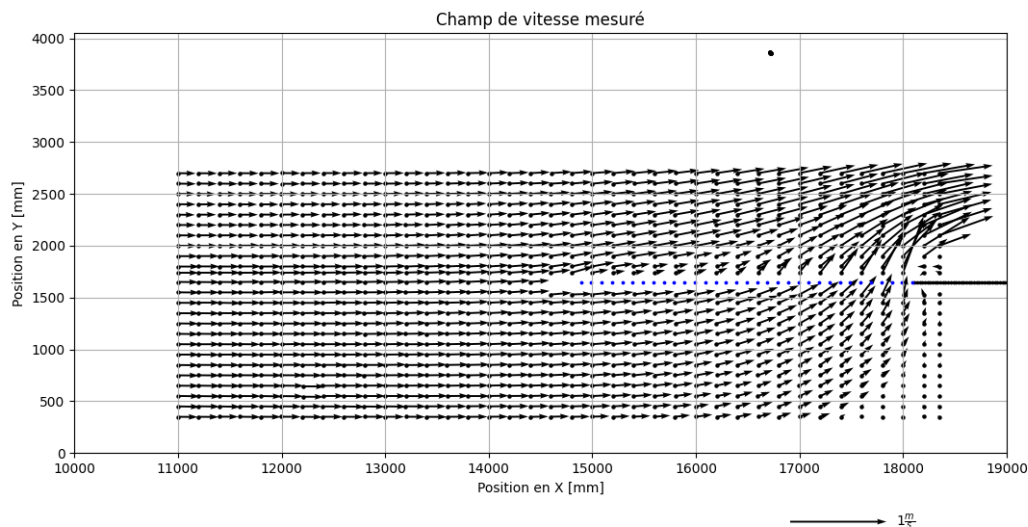


Figure 3-20 : Champ de vitesses mesuré I - AP050M100 - 10/04/20

La Figure 3-21 montre que ce critère est respecté sur la quasi-totalité des points de mesures. Deux zones ne respectent cependant pas ce critère. La première se trouve dans la partie aval de l'avant-port. Cette incertitude est provoquée par une diminution de la vitesse scalaire moyenne qui tend vers 0 [m/s] dans la partie la plus en aval de l'avant-port. La seconde zone se trouve au-dessus du mole plein dans le canal ouvert. C'est une zone de turbulence.

La Figure 3-22 et la Figure 3-23 montrent les écart-types sur les composantes des vitesses mesurées respectivement longitudinales et transversales. Les écart-types sur la composante longitudinale de ces vitesses montrent des résultats similaires aux écarts-types des vitesses scalaires. Ceci est dû à la caractéristique de l'écoulement présent qui est fortement longitudinal. Les écart-types sur la composante transversale de ces vitesses respectent le critère de répétabilité uniquement dans les zones où cette composante est plus marquée.

La Figure 3-24 corrobore les interprétations données aux 3 dernières figures. En effet, nous pouvons constater que les écart-types deviennent important uniquement dans la zone où les vitesses scalaires deviennent nulles et dans la petite zone de turbulence située en dehors de l'avant-port et proche du mole plein.

A la vue de ces éléments, ces essais sont validés.

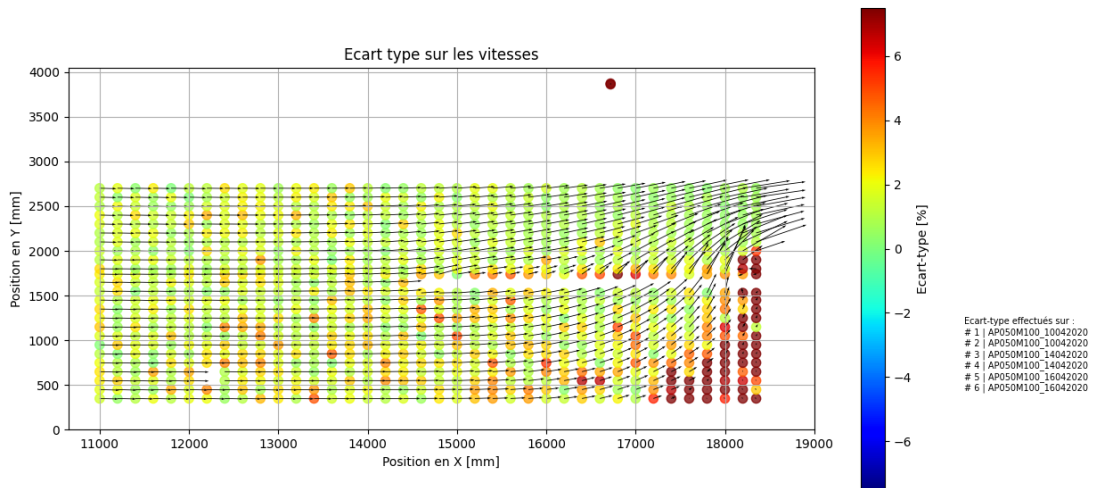


Figure 3-21 : Ecart-type sur les vitesses scalaires - AP050M100

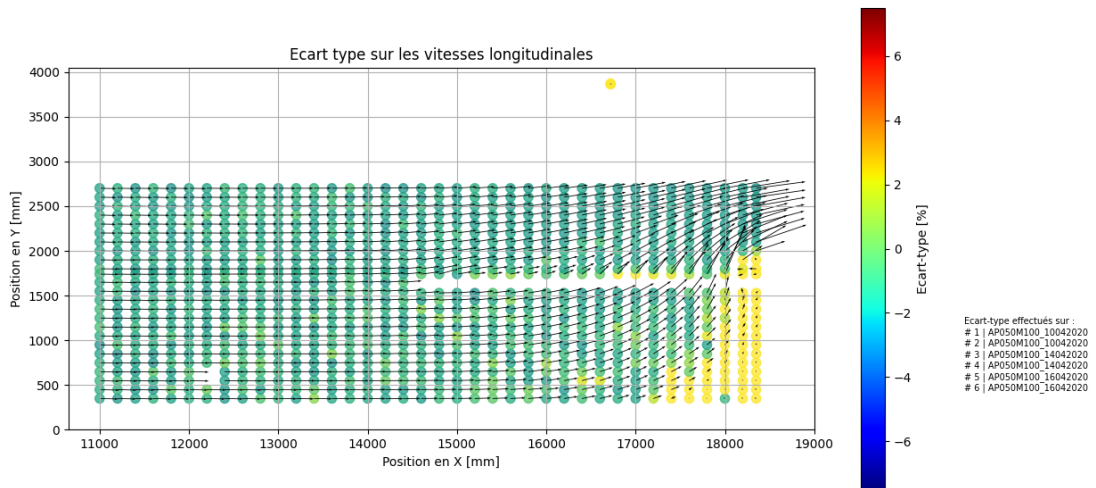


Figure 3-22 : Ecart-type sur les vitesses longitudinales - AP050M100

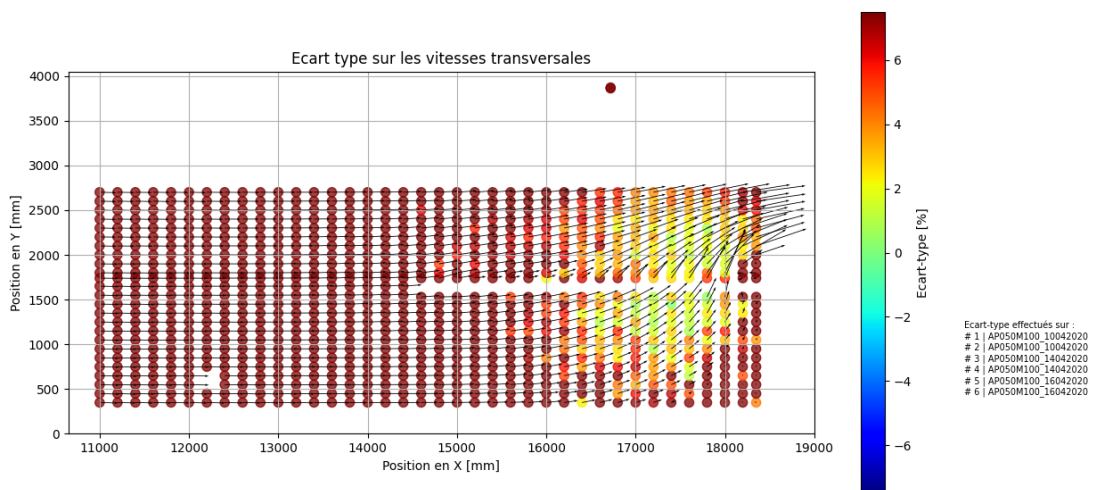


Figure 3-23 : Ecart-type sur les vitesses transversales - AP050M100

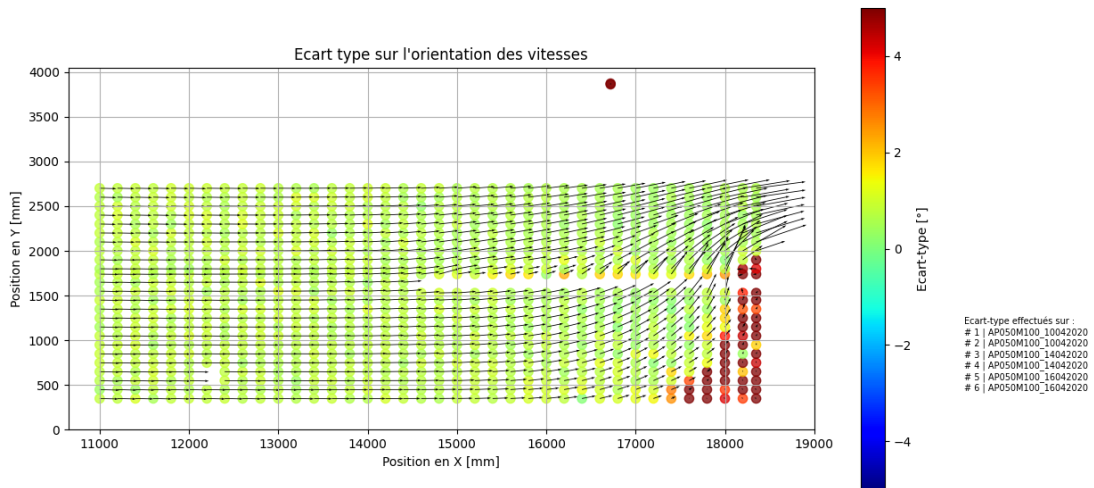


Figure 3-24 : Ecart-type sur l'orientation des vitesses - AP050M100

3.5.5 Essais AP050M033

Cet essai est le premier changement de géométrie. Le môle ajouré M=1 est remplacé par le môle ajouré M=1/3. Deux séries de mesures ont pu être réalisées. Un affichage de ces résultats est visible sur la Figure 3-25. L'autre est visible en Annexe 10.3.9.

Essai : AP050M033_27042020 | Rotation de la sonde = 0.0

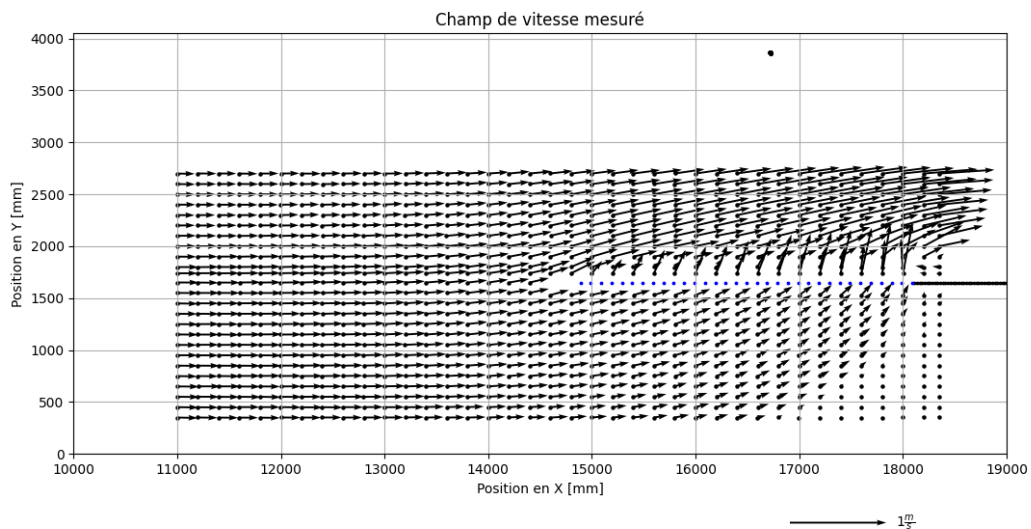


Figure 3-25 : Champ de vitesses mesuré I - AP050M033 - 27/04/20

Afin de valider ces essais, nous allons utiliser le même protocole de validation exposé lors de la validation des mesures pour la configuration AP050M100.

Tout d'abord le critère portant sur le bilan de débit pour la coupe la plus en amont (X=11000 [mm]). Ces essais respectent ce critère (voir Annexe 10.3.6).

Ensuite il faut examiner que les critères sur les écart-types sont aussi valides. (Rappel : l'écart absolu entre les vitesses < 5% et l'écart entre les orientations < 5°). Ces critères sont validés pour une majorité des mesures. Comme pour la configuration précédente, les mesures où ces critères ne sont pas valides

3 Modélisation expérimentale

sont celles où les vitesses sont quasi nulles ou situées dans une zone de turbulence. Il faut aussi prendre en compte que ces écart-types ont été calculé à partir de 2 essais. Les résultats sont visibles sur les Figure 3-26 à Figure 3-29.

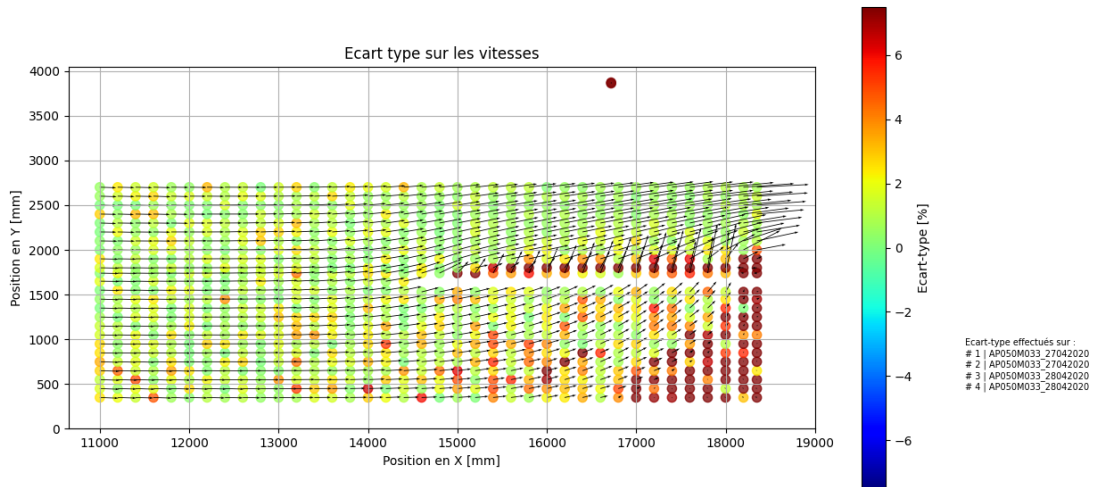


Figure 3-26 : Ecart-type sur les vitesses scalaires - AP050M100

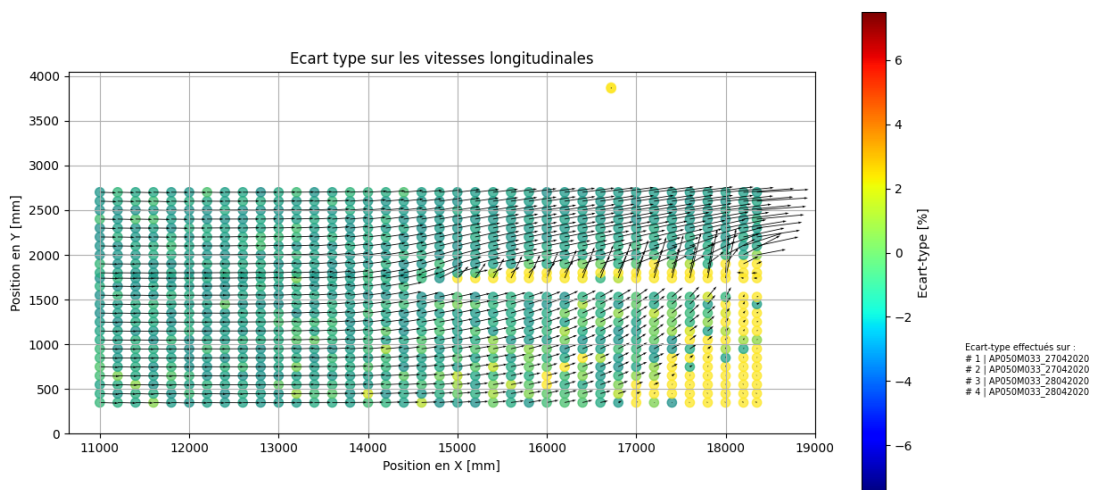


Figure 3-27 : Ecart-type sur les vitesses longitudinales - AP050M033

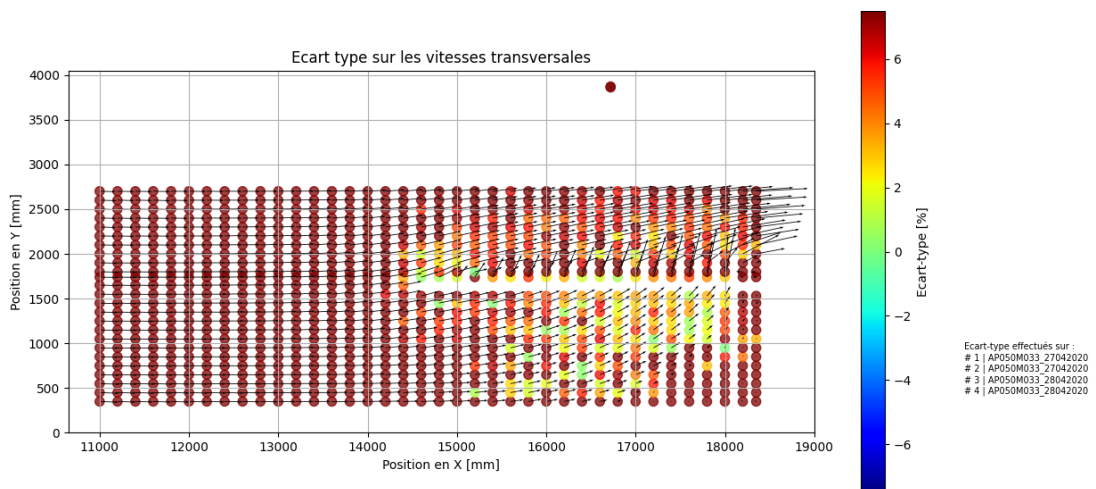


Figure 3-28 : Ecart-type sur les vitesses transversales - AP050M033

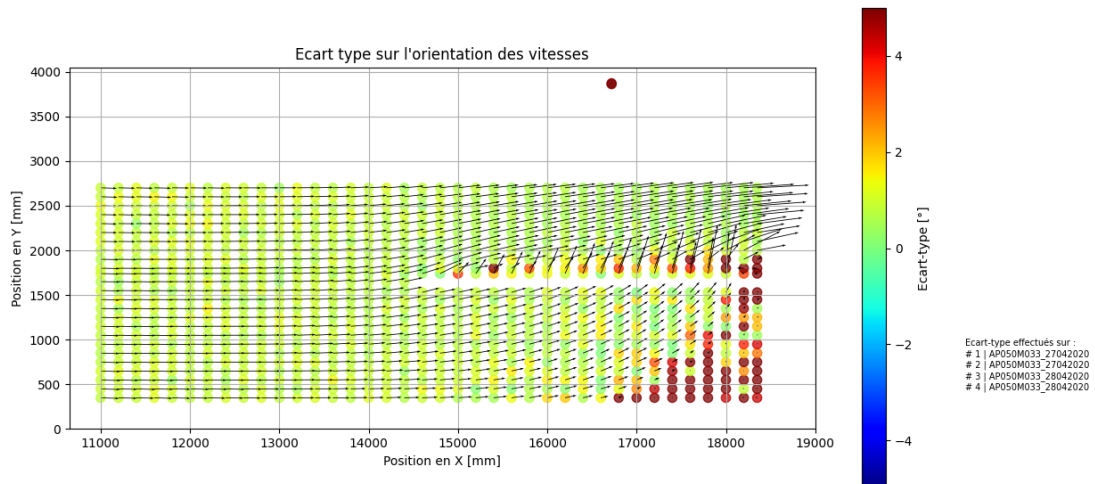


Figure 3-29 : Ecart-type sur l'orientation des vitesses - AP050M033

3.6 Conclusion de la modélisation expérimentale

Cette modélisation expérimentale était le moyen que nous nous étions donnés pour répondre aux objectifs de cette étude. Comme ce chapitre le montre, le retard dû aux différents problèmes rencontrés et la crise sanitaire de 2020 n'ont permis d'obtenir que 2 essais valides. Ce qui est insuffisant pour répondre aux objectifs de cette étude.

Elle n'aura cependant pas été vaine puisque les 2 résultats validés ont servi de calibration à un modèle numérique détaillé au chapitre suivant.

4 Modélisation numérique

4.1 Introduction

Ce chapitre détaille la modélisation numérique des modèles étudiés dans cette étude. Il commence par une courte contextualisation de cette modélisation et s'en suit une présentation des différentes géométries étudiées. Ensuite, les 3 étapes de processing y sont développées.

4.2 Contexte

Cette modélisation numérique survient à la suite des événements survenus en 2020 avec la crise du COVID-19. Au départ, il avait été pris comme parti de mesurer la variation des champs de vitesses sur un modèle expérimental. Malheureusement, cette crise a empêché l'accès au laboratoire où s'effectuait les essais. Une solution trouvée pour mener à bien ce travail fut de basculer sur des simulations numériques.

4.3 Géométries étudiées

Le changement de méthodologie n'implique pas de changement des géométries étudiées. Nous étudions donc toujours les mêmes configurations présentées dans la Section 3.2.1. Ces configurations partagent les mêmes caractéristiques : rapports AP et M, longueurs, largeurs, débits, Etc... qu'elles soient modélisées physiquement ou numériquement. De plus d'autres configurations se sont ajoutées car les premiers résultats montraient leur intérêt dans la compréhension de l'évolution du champ de vitesses. Le Tableau 4-1 liste l'ensemble des modélisations numériques réalisées.

N°	Nom de l'essai	Rapport AP	Rapport M
1	AP050M---	1/2	/Sans môle ouvert
2	AP050M100	1/2	1
3	AP050M066	1/2	2/3
4	AP050M050	1/2	1/2
5	AP050M033	1/2	1/3
6	AP050M000	1/2	0
7	AP040M---	2/5	/Sans môle ouvert
8	AP040M100	2/5	1
9	AP040M066	2/5	2/3
10	AP040M050	2/5	1/2
11	AP040M033	2/5	1/3
12	AP040M000	2/5	0
13	AP033M---	1/3	/Sans môle ouvert
14	AP033M100	1/3	1
15	AP033M066	1/3	2/3
16	AP033M050	1/3	1/2
17	AP033M033	1/3	1/3
18	AP033M000	1/3	0
19	AP025M---	1/4	/Sans môle ouvert
20	AP025M100	1/4	1
21	AP025M066	1/4	2/3
22	AP025M050	1/4	1/2
23	AP025M033	1/4	1/3
24	AP025M000	1/4	0
25	AP020M---	1/5	/Sans môle ouvert
26	AP020M100	1/5	1
27	AP020M066	1/5	2/3
28	AP020M050	1/5	1/2
29	AP020M033	1/5	1/3
30	AP020M000	1/5	0

Tableau 4-1 : Liste des configurations modélisées numériquement

4.4 Le *pre-processing*

Le *pre-processing* est la première étape dans la modélisation d'écoulement numérique. Elle consiste à créer et générer les données qui vont être traitées par le solveur. Dans cette modélisation, elle consiste à générer les maillages d'éléments finis et établir les conditions limites du modèle.

4.4.1 Blue Kenue

Blue Kenue est une interface graphique de *pre-processing* et de *post-processing* développé par le *Canadian Hydraulics Center*. Ce logiciel permet de générer les maillages d'éléments finis, de définir les conditions frontières du problème et de générer les fichiers requis pour le fonctionnement du solveur utilisé : Telemac2D. Il permettra aussi d'obtenir une interprétation graphique des résultats issus de Telemac2D.

4.4.2 Modélisation des géométries et génération des maillages

Telemac2D résout les problèmes hydrodynamiques bidimensionnels par la résolution des équations de Saint-Venant en utilisant la méthode des éléments finis (Cette résolution sera plus détaillée dans la Section 4.5.2). La méthode des éléments finis consiste à résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles sur un domaine continu qui aura été discrétisé sous la forme d'un maillage triangulaire. Une discrétisation des géométries étudiées est donc nécessaire.

Blue Kenue permet à partir de cette discrétisation de créer un maillage triangulaire. Il permet aussi de générer des *sous-maillages* ayant une densité plus grande d'éléments triangulaires. La densité de maillage fait ici référence à aux longueurs des côtés des éléments triangulaires formant le maillage d'éléments finis. Une densité plus importante signifie des longueurs des côté plus petites.

Ceci est fort utile pour augmenter la précision de la simulation dans certaine zone du modèle. Ces zones d'intérêts sont :

1. La **zone de l'avant-port**. C'est la zone étudiée. Une densité de maillage de ≈ 5 [cm] a été fixée. Elle est fixe. C'est-à-dire qu'elle n'évolue pas selon les différentes configurations.
2. La **zone du môle**. C'est une zone où est attendue de la turbulence. La densité de maillage fixée varie entre 1 [mm] et 5 [cm]. Cette zone est sujette a de légère modification entre les différentes configurations afin d'épouser au mieux les formes du môle. La génération du maillage proche du môle suit la logique suivante : commencer le maillage adjacent avec une densité de 1 [mm] puis croître avec un taux de croissance de 1,2.

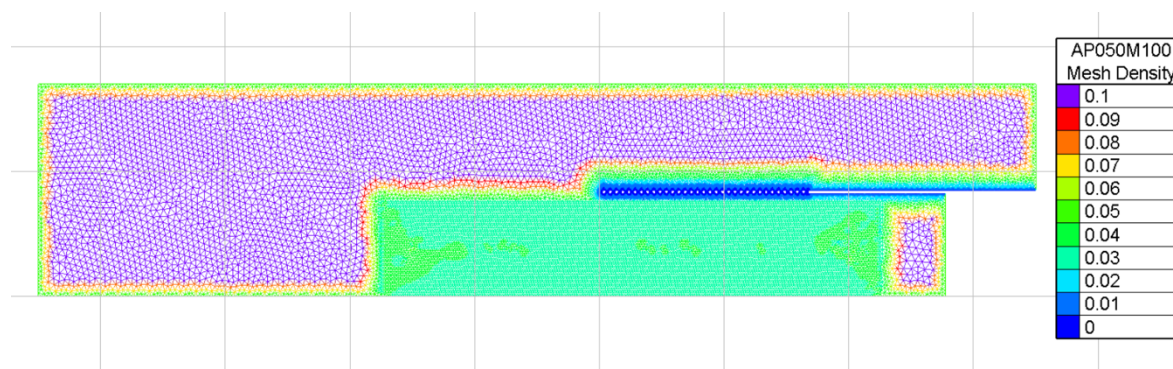


Figure 4-1 : Densité du maillage utilisé - Configuration AP050M100

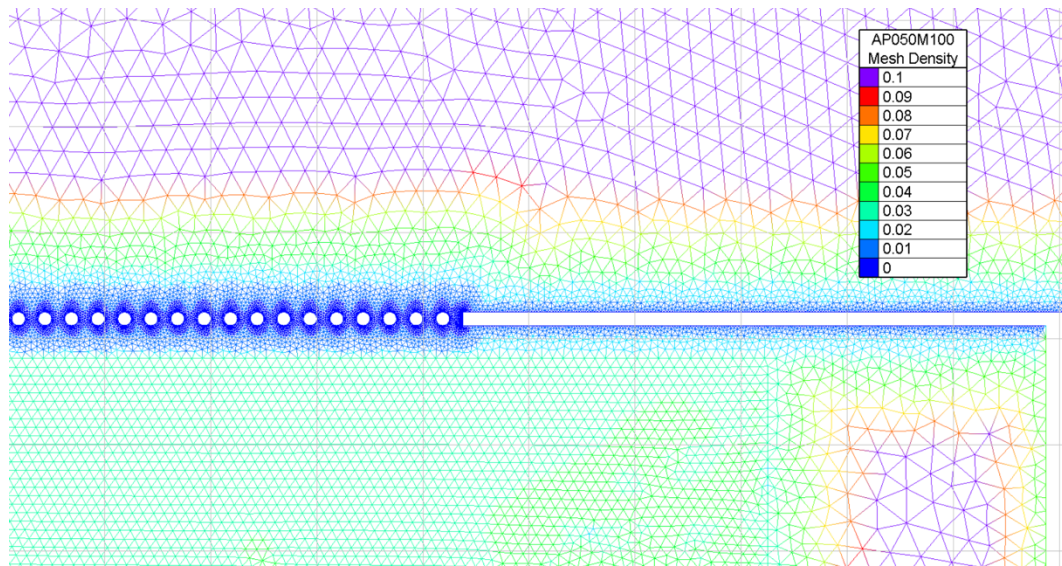


Figure 4-2 : Zoom sur la densité du maillage utilisé - Configuration AP050M100

La bathymétrie associée à chaque nœud interne du maillage vaut 0 afin de définir une surface plane. Les modèles étudiés étant idéalisés et ne représentent aucun cas réel. Quant aux nœuds externes, ils sont associés à 3 types de frontières. A l'amont, ils forment l'entrée du liquide par un débit Q imposé constant. A l'aval, ils forment la sortie du liquide par une hauteur h imposée constante. Les nœuds frontières restants forment une frontière physique imperméable au liquide (voir Figure 4-3). L'interprétation par Telemac2D et la signification mathématique de ces 3 types de frontières seront détaillées dans la Section 4.5.4.

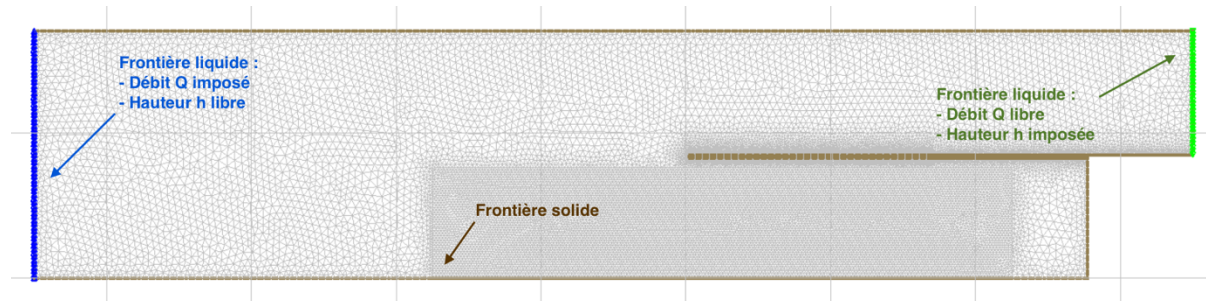


Figure 4-3 : Représentation des frontières du modèle - Configuration AP050M100

4.5 La simulation numérique

4.5.1 Telemac2D

Telemac2D est un **solveur** qui va résoudre les **équations de Saint-Venant**. Ce sont les équations caractérisant l'écoulement en eau peu profonde. Ce solveur a été développé initialement par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (France) et la division *Recherche & Développement d'EDF*. Il est maintenant géré par un consortium d'entreprises et d'instituts de recherche regroupé sous : *open-TELEMAC*.

C'est un logiciel assez brut de décoffrage. C'est-à-dire qu'il ne possède pas d'interface graphique et nécessite donc l'utilisation de logiciel de *pre/post-processing* comme Blue Kenue afin de pouvoir modéliser les problèmes et lire les résultats.

Pour pouvoir simuler les différentes configurations, Telemac2D a besoin de 3 fichiers :

1. Le **steering file**. C'est un fichier texte reprenant toutes les instructions pour le solveur et définissent les différents paramètres numériques du calcul. Ces paramètres seront détaillés en détail dans la Section 4.5.5 et un exemple est mis en Annexe 10.4.1.
2. Le **geometry file**. C'est un fichier binaire généré par un logiciel de pre-processing. Il contient toutes les informations concernant le maillage de la géométrie étudiée.
3. Le **boundary conditions file**. C'est un fichier texte définissant de quel type est chaque frontière.

4.5.2 Aspect théorique

Comme nous venons de le voir, Telemac2D résout les équations de Saint-Venant en 2 dimensions. Elles permettent d'obtenir pour tous les points du maillage⁵ les composantes U et V de la vitesse ainsi que la hauteur de la surface libre. Les 3 équations de Saint-Venant solutionnées par Telemac2D [18, pp. 10,11] [19] sont :

$$\begin{cases} \frac{\partial h}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(h) + h \cdot \text{div}(\mathbf{u}) = S_h & \text{(Equation de continuité)} \\ \frac{\partial u}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(u) = -g \frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} \text{div}(h \cdot \mathbf{v}_t \cdot \nabla \mathbf{u}) & \text{(Equation quantité de mouvement selon } x) \\ \frac{\partial v}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(v) = -g \frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} \text{div}(h \cdot \mathbf{v}_t \cdot \nabla \mathbf{v}) & \text{(Equation quantité de mouvement selon } y) \end{cases}$$

h	Profondeur d'eau et inconnue	[m]
u	Composante X de la vitesse et inconnue	[m/s]
v	Composante Y de la vitesse et inconnue	[m/s]
g	Gravité	[m/s ²]
v_t	Coefficient de diffusion de la quantité de mouvement	[m ² /s]
Z	Élévation de la surface libre	[m]
t	Temps	[s]
x	Coordonnée spatiale X	[m]
y	Coordonnée spatiale Y	[m]

S_h , S_x et S_y sont des termes sources. Ils représentent le vent, la force Coriolis, la friction du fond, une source ou une perte de la quantité de mouvement.

⁵ D'où l'intérêt d'avoir des zones de maillage plus dense.

Une étape de calcul pour un pas de temps suit ce schéma :

1. Advection de h , u et v .
2. Propagation, diffusion et calcul des termes sources des équations.

Telemac2D va devoir résoudre 2 équations aux dérivées partielles supplémentaires. Comme il le sera abordé dans la Section 4.5.6, nous utilisons le modèle de turbulence **K-epsilon**. Ces 2 équations sont [18, pp. 11,40-42] :

$$\begin{cases} \frac{\partial k}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(k) = \frac{1}{h} \cdot \text{div} \left(h \cdot \frac{v_t}{\sigma_k} \cdot \nabla k \right) + P - \varepsilon + P_{kv} & (1) \\ \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \mathbf{u} \cdot \nabla(\varepsilon) = \frac{1}{h} \cdot \text{div} \left(h \cdot \frac{v_t}{\sigma_\varepsilon} \cdot \nabla \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (c_{1\varepsilon} \cdot P - c_{2\varepsilon} \cdot \varepsilon) + P_{\varepsilon v} & (1) \end{cases}$$

Où K représente la quantité de turbulence due à l'énergie cinétique (1^{ère} équation) et ε la quantité de turbulence dissipée (2^e équation). Le membre de droite de ces équations représente la production et la destruction de turbulence.

4.5.3 Condition initiale

La condition initiale imposée sur tout le domaine est une hauteur de la surface libre de 15 [cm].

4.5.4 Conditions limites

Notre modèle numérique possède 3 types de conditions limites :

1. La **frontière liquide amont** où nous imposons un débit Q constant (selon la configuration modélisée) sur toute la durée de la simulation. Numériquement ça revient à imposer une condition limite libre (*Dirichlet*) sur la hauteur h et une condition limite imposée (*Neumann*) pour Q_x et Q_y .
2. La **frontière liquide aval** où, inversement, nous imposons une hauteur $h=15$ [cm] sur toute la durée de la simulation. Numériquement ça revient à imposer une condition limite libre (*Dirichlet*) pour Q_x et Q_y et une condition limite imposée (*Neumann*) sur la hauteur h .
3. La **frontière solide** qui numériquement signifie une *frontière* du domaine.

Il a été constaté une anomalie dans l'application de ces frontières lorsqu'elle était appliquée de manière *stricte*. Cette anomalie peut être observée sur la Figure 4-4 où nous pouvons voir 2 zones d'émission de débit $\gg Q_{\text{imposé}}$. Nous constatons aussi une émission non orthogonale à la frontière amont. Une solution trouvée fut d'appliquer la *méthode de Thomson* [18, p. 31]. Dans ce cas-ci les conditions limites ne sont plus *imposées* de façon stricte mais *suggérées*. Cette méthode permet d'offrir au solveur une plus grande liberté dans sa résolution.

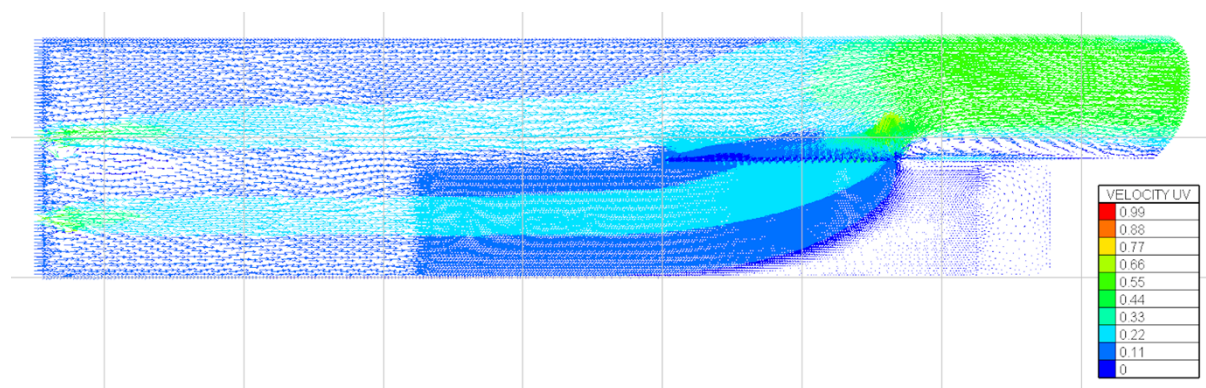


Figure 4-4 : Anomalie observée lorsque les conditions limites étaient appliquées de façon stricte

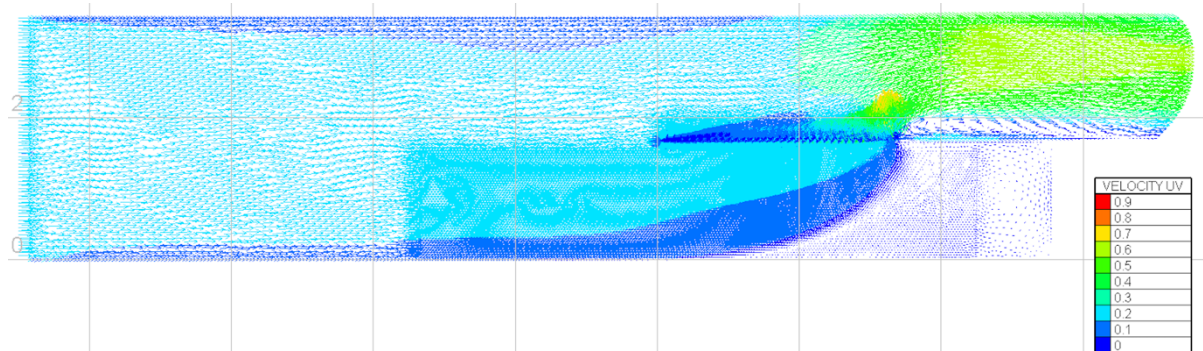


Figure 4-5 : Suppression de l'anomalie en appliquant les conditions limites par la méthode de Thomson

4.5.5 Paramètres de la simulation

4.5.5.1 Paramètres temporels

Le **pas de temps** fut fixé à 5 millisecondes afin de garantir un nombre de Courant⁶ suffisamment faible. La **durée** de la simulation quant à elle varie entre 10' (600'') et 30' (1800'') selon les configurations étudiées. Ceci permet à la simulation d'atteindre un écoulement quasi établi (où les fluctuations deviennent imperceptibles). La Figure 4-6 et la Figure 4-7 montrent une fluctuation des vitesses pour les 4 points de références (voir Figure 3-15). Ces simulations prennent entre 25' et 5h pour être calculée sur un ordinateur personnel.

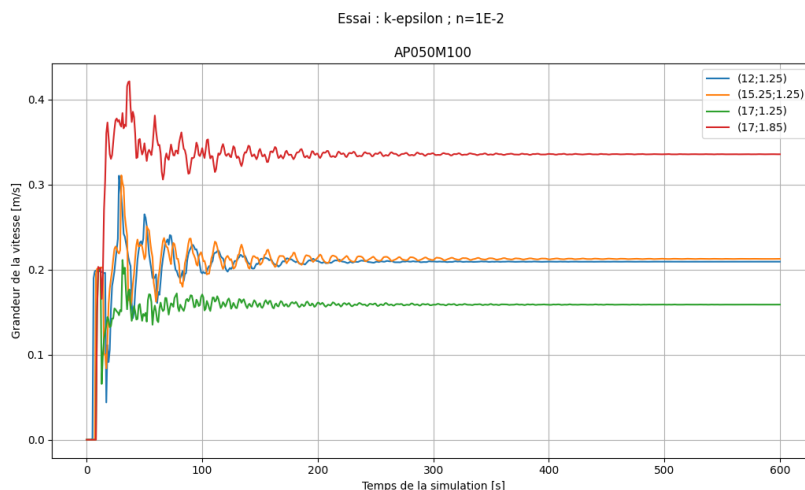


Figure 4-6 : Fluctuation des vitesses pendant la simulation - Configuration AP050M100

⁶ Richard Courant. Nombre adimensionnel servant à donner une condition numérique sur la stabilité du calcul numérique.

Condition de stabilité si $Co = \Delta t \cdot \left(\frac{U}{\Delta x} + \frac{V}{\Delta y} \right) < 1$.

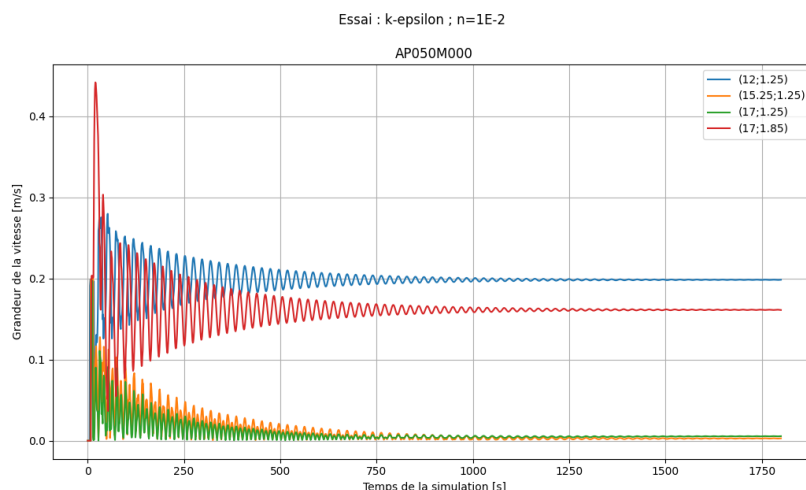


Figure 4-7 : Fluctuation des vitesses pendant la simulation - Configuration AP050M000

4.5.5.2 Paramètres physiques

La **loi de rugosité du fond** est celle du modèle de *Manning*. Étant donné que le fond du modèle physique est une chape de béton, le **coefficient de friction** du fond a été fixé à 0,013 [20].

Le modèle de turbulence retenu est **K-Epsilon** avec un régime turbulent pour les frontières solides utilisant la loi de rugosité de Manning. Les frontières solides du modèle expérimental étant des panneaux de bois marins et des murets recouvert d'une peinture époxy, le coefficient retenu est 0,010. D'autres modèles de turbulence ont été testées. Elles seront évoquées dans la Section 4.5.6.

4.5.6 Validation

Afin de valider les paramètres de la simulation, une comparaison entre *l'essai AP50M100* a été faite. La simplicité de la géométrie du modèle expérimental fait que le paramètre le plus impactant est celui du modèle de turbulence. Deux modèles ont été envisagés. Le Tableau 4-2 montre les différents essais effectués afin de valider les meilleurs paramètres numériques.

N°	Modèle	Paramètre	Valeur
1	Viscosité constante	Coefficient de diffusivité	1E1
2	Viscosité constante	Coefficient de diffusivité	1E-2
3	Viscosité constante	Coefficient de diffusivité	1E-3
4	Viscosité constante	Coefficient de diffusivité	1E-4
5	Viscosité constante	Coefficient de diffusivité	1E-5
6	Viscosité constante	Coefficient de diffusivité	1E-6
7	K-Epsilon	Coefficient de Manning des bords	1E-2
8	K-Epsilon	Coefficient de Manning des bords	1E2

Tableau 4-2 : Liste des pré-essais numériques

Les Figure 4-8 à Figure 4-11 montrent les comparaisons entre les mesures relevées sur le modèle expérimental et les simulations le plus probantes. Ces comparaisons se font sur différentes coupes transversales et comparent les vitesses U et V . Il faut signaler qu'un décalage longitudinal entre le modèle expérimental et numérique a été constaté. Ce décalage vaut 740 [mm] vers l'amont et a été corrigé. La position des coupes indiquée sur chaque figure correspond au repère expérimental. L'Annexe 10.4.2 montre les comparaisons avec les 8 pré-essais numériques.

4 Modélisation numérique

A la vue de ces comparaisons, le modèle de turbulence retenu est le modèle **K-Epsilon** avec un coefficient de Manning des bords valant *0,01*.

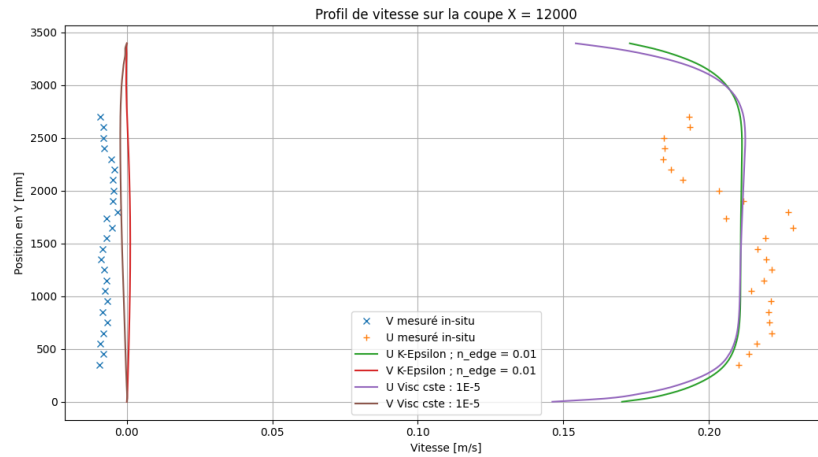


Figure 4-8 : Comparaison des vitesses sur la coupe transversale X=12000 [mm]

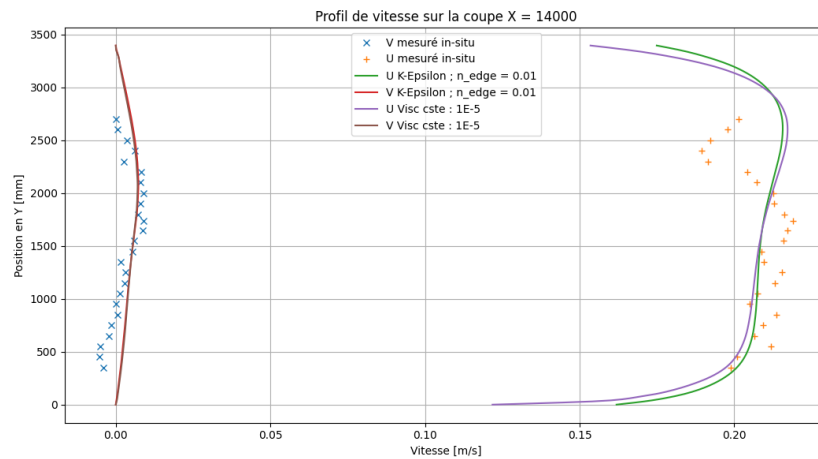


Figure 4-9 : Comparaison des vitesses sur la coupe transversale X=14000 [mm]

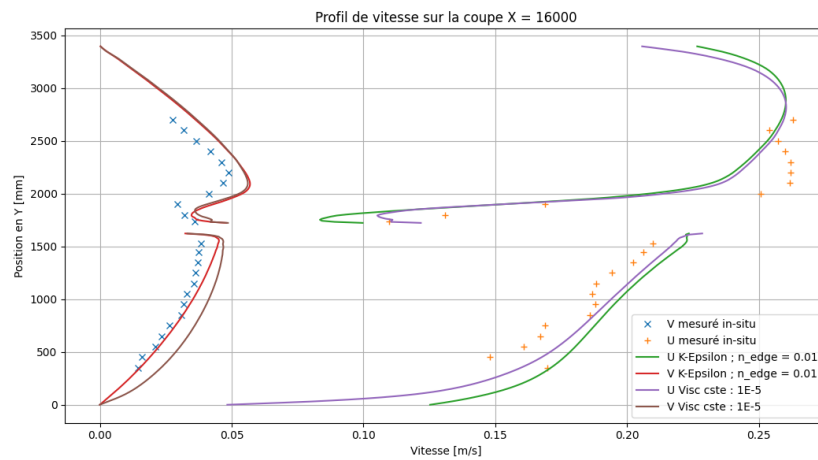


Figure 4-10 : Comparaison des vitesses sur la coupe transversale X=16000 [mm]

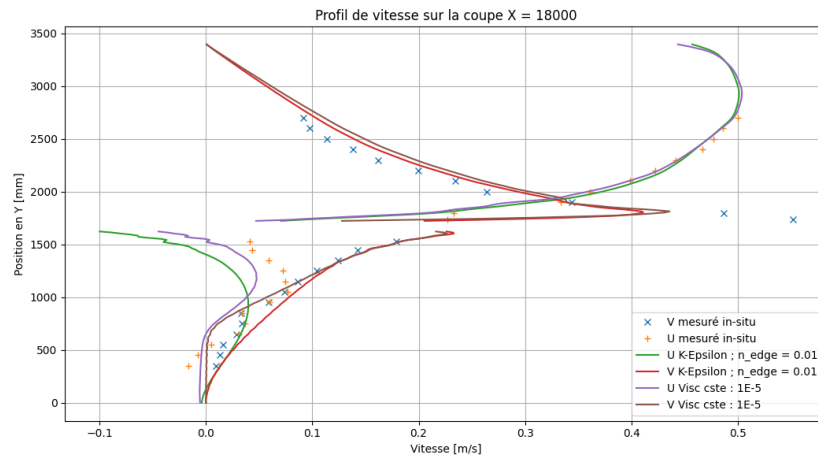


Figure 4-11 : Comparaison des vitesses sur la coupe transversale X=18000 [mm]

La comparaison avec la seconde configuration mesurée se trouve en Annexe 10.4.1.

4.6 Le *post-processing*

La dernière étape de la modélisation numérique est le *post-processing*. Elle consiste à rendre les résultats de *Telemac2D* compréhensibles et interprétables. En effet, *Telemac2D* retourne le résultat de sa simulation sous la forme d'un fichier binaire. Dans ce fichier, le solveur va y enregistrer pour chaque point du domaine l'évolution temporelle de \mathbf{U} , \mathbf{V} , la hauteur de la surface libre, la profondeur, le nombre de Froude⁷ et le nombre de Courant.

Cette étape a consisté pour chaque simulation à :

1. Extraire sous la forme d'un fichier texte l'évolution temporelle des 4 points de référence afin de s'assurer d'avoir une simulation suffisamment stabilisée (voir Section 4.5.5.1).
2. Extraire le champ de vitesse sous la forme d'un fichier texte le champ de vitesses calculé afin de pouvoir étudier les champs, les profils longitudinaux et transversaux de vitesses (sera abordé dans la Section 5).
3. Créer un affichage graphique du champ de vitesse calculé (voir Annexe 10.5.1).

4.7 Conclusion de la modélisation numérique

Tout d'abord, la modélisation numérique permet de modéliser facilement différents cas d'étude avec des moyens modestes. Contrairement à la modélisation expérimentale qui nécessite une infrastructure importante (laboratoire, matériel, personnel, ...).

Ensuite, elle présente l'avantage d'offrir une répétabilité et une conservation exacte de tous les résultats. En effet, il suffit de conserver uniquement les paramètres utilisés pour pouvoir à nouveau reproduire les résultats. Ce qui est un atout lorsqu'un nouveau paramètre supplémentaire doit être étudié sur le moment ou a posteriori comme les rapports M_{---} et $M066$ qui se sont rajoutés.

Ce type de modélisation possède aussi des revers. Il nécessite une bonne compréhension des modèles et des équations des écoulements hydrodynamiques. Sans cette compréhension, l'utilisateur n'aura pas le recul suffisamment nécessaire pour garantir ses résultats. Un autre revers est la nécessité de comprendre les complexités et les subtilités des environnements numériques du *pré/post-processing* et du *solveur*.

En conclusion, la modélisation numérique est un outil puissant pour qui sait s'en servir et surtout s'il est couplé à une modélisation expérimentale. En effet, sans cette dernière il est très difficile de justifier la validité des hypothèses de modélisation prises.

⁷ Nombre adimensionnel caractérisant l'importance à l'énergie cinétique des particules d'un fluide par rapport à leur énergie potentielle. $Fr = \frac{v}{\sqrt{gL_c}}$ Où L_c est la longueur caractéristique de l'écoulement.

5 Analyse des vitesses

5.1 Introduction

Ce chapitre analyse de manière qualitative l'impact des rapport AP et M sur les vitesses. Cette analyse se concentre particulièrement sur une section correspondant à une trajectoire prise par un bateau traversant l'avant-port.

5.2 Issus des modélisations expérimentales et numériques

5.2.1 Observation des champs de vitesses

Cette section présente les différents champs de vitesses obtenus pour chacune des configurations étudiées après leurs simulations. L'affichage de ces champs de vitesses se trouve en Annexe 10.5.1.

L'observation la plus évidente et attendue est l'augmentation de la vitesse longitudinale dans le canal adjacent à l'avant-port lorsque le rapport AP augmente. Ceci est facilement expliqué par la conservation du débit. Comme la surface libre forme un plan quasi-horizontale à hauteur constante ($h \approx 15$ [cm]), le débit entrant à l'amont doit évaluer le débit sortant à l'aval. Les vitesses longitudinales sont donc logiquement plus importantes. Un calcul simplifié (ne prenant pas en compte les phénomènes hydrodynamiques pouvant être présent) illustre cette explication :

$$\begin{aligned} \frac{Q}{h_{surf.libre}} &= v_{amont} \cdot L_{riviere} = v_{aval} \cdot \frac{L_{riviere}}{AP} \\ \Rightarrow v_{amont} &= \frac{Q}{h_{surf.libre}} \cdot L_{riviere} \\ \Rightarrow v_{aval} &= \frac{Q}{h_{surf.libre}} \cdot \frac{L_{riviere}}{AP} \\ v_{aval} &> v_{amont} \text{ car } AP \in]0 ; 1] \end{aligned}$$

Des zones de vitesses quasi-nulles peuvent aussi être observées dans la partie aval de l'avant-port. Ces zones sont peu impactées par les variations des rapport AP et M. Il faut cependant constater que cette zone de vitesses quasi-nulles à l'air d'être liée à la partie pleine du môle. En effet, nous pouvons constater un déplacement de cette zone vers l'amont lorsque le rapport M vaut 0 (il n'y a plus d'ouvertures dans le môle).

Une dernière observation peut être constatée à partir de ces champs de vitesses, c'est l'apparition de gyres (zones de recirculation) plus ou moins importants⁸ à l'aval du canal adjacent à l'avant-port. Ces gyres sont constatés pour un rapport AP $\geq 0,33$. Il n'y a pas encore de d'explication trouvée pour ces phénomènes. Même si les essais expérimentaux ont mis en évidence l'apparition de petits gyres au même endroit (voir Figure 3-20 et Figure 3-25), nous n'avons pas pu vérifier si ces gyres importants sont dus à la simulation et notamment aux conditions aval imposées ou s'ils apparaissent aussi physiquement.

5.2.2 Analyse des profils de vitesses

Il faut garder à l'esprit que le but de ce travail est de voir les impacts qu'ont le rapports AP et le rapport M sur les **conditions de navigation** dans l'avant-port. Les champs de vitesses permettent de se rendre compte que dans la zone qui nous intéresse, l'avant-port, le gradient de vitesses varie peu selon une

⁸ Ces gyres importants peuvent être observés sur les configurations : AP020M050 ; AP020M066 ; AP025M033 ; AP025M066 ; AP025M100 ; AP033M050 ; AP033M066.

orientation transversale. A l'inverse, ce dernier varie beaucoup selon une orientation longitudinale. Ces propos sont illustrés sur la Figure 5-1. La Figure 5-2 montre la position des différents profils longitudinaux dans l'avant-port.

Les profils de vitesses présentés dans cette section ont été obtenus par une interpolation cubique des champs de vitesses simulés. Les droites verticales noires sont des repères visuels du môle.

Rappel : La partie ouverte du môle commence en $X=14050$ [mm], la partie fermée commence en $X=17350$ [mm] et la porte de l'écluse (la fin de l'avant-port) se situe en $X=19550$ [mm].

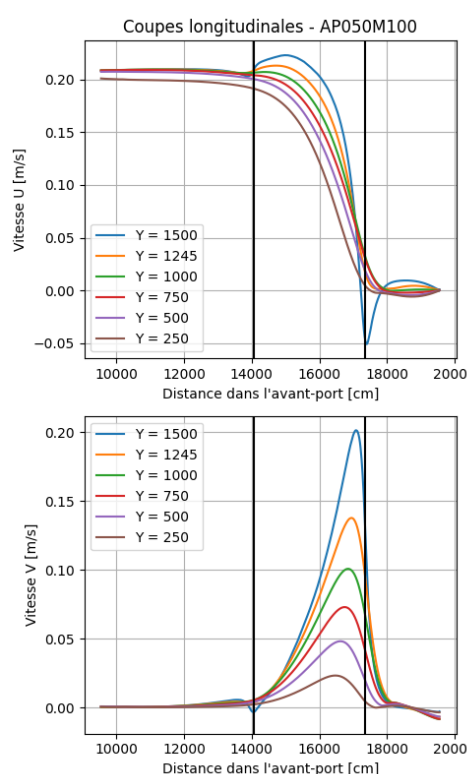


Figure 5-1 : Profils de vitesses sur coupe longitudinale - AP050M100

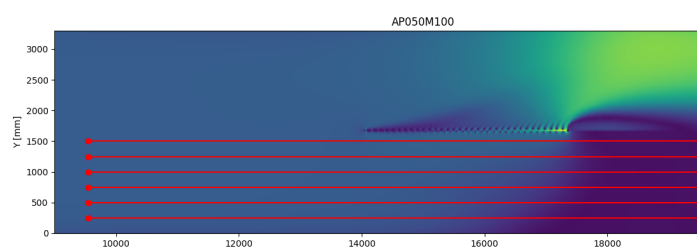


Figure 5-2 : Position des profils de vitesses sur l'interpolation du champ de vitesse scalaire - AP050M100

Pour analyser l'impact des différentes configurations sur le champ de vitesses, nous allons prendre un profil longitudinal similaire à un axe de navigation dans l'avant-port. Toujours dans l'optique d'analyser l'impact, nous prendrons le cas le plus défavorable. C'est-à-dire le profil longitudinal où $Y=1245$ [mm].

Remarque : Le profil où $Y=1245$ [mm] n'est pas un *axe de navigation* car un bateau ne pourrait pas le suivre faute d'espace disponible à bâbord (il butterait sur le môle de l'avant-port).

Tout d'abord, la Figure 5-3 et la Figure 5-4 confirment l'impact qu'à l'augmentation du *rapport AP* sur les vitesses. Nous pouvons en effet observer que les profils sont *semblables* mais s'amplifie avec l'augmentation du *rapport AP*. De plus, les vitesses transversales semblent plus impactées par l'augmentation du *rapport AP* que les vitesses longitudinales.

Un autre phénomène a été mis en évidence par l'analyse de ces profils de vitesses. Nous pouvons observer qu'une variation du *rapport M* permet d'*aplatir* le profil de vitesse transversale. En effet, nous pouvons voir sur la Figure 5-7 et la Figure 5-8 deux pics de vitesses transversales sur un même profil. Un important visible à l'aval du môle ouvert et un faible pic visible à l'entrée de l'avant-port.

5 Analyse des vitesses

Lorsque le rapport M diminue, le pic aval va diminuer et le pic amont va s'accroître. Ce phénomène à l'air de suivre une logique de transition. Sur la Figure 5-7, nous pouvons observer que le profil de vitesse pour la configuration $AP050M000$ (môle fermé jusqu'en $X=14050$) et la configuration $AP050M---$ (môle fermé jusqu'en $X=17350$) sont identiques mais translatés de 3300 [mm] vers l'amont.

Un premier élément de réponse à notre interrogation sur l'existence d'un **rapport M optimal** est visible sur la Figure 5-5 et la Figure 5-6. Nous pouvons voir que pour un rapport $M=0,33$, le profil de vitesse transversale passe par un *état plat* (c'est-à-dire que les 2 pics observés sont à la même hauteur) lors de sa transition de l'aval vers l'amont quand le *rapport AP* diminue. Il semble donc exister un *rapport M optimal* pour *aplatir* le profil de vitesse transversale qui soit directement lié au *rapport AP*.

Pour finir, nous pouvons observer qu'un môle trop perméable (qui possède un *rapport M* élevé) a quasiment le même profil de vitesse qu'une configuration sans môle ouvert ($M---$). Cette observation est visible sur toutes les configurations où $M=1$.

Toutes ces observations sont aussi présentes pour les autres configurations. Elles sont visibles en Annexe 10.5.2.

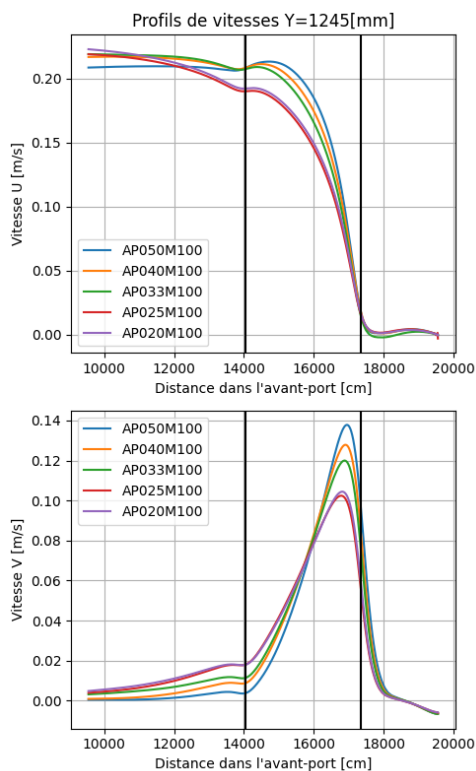


Figure 5-3 : Comparaison des profils de vitesses selon AP avec M100

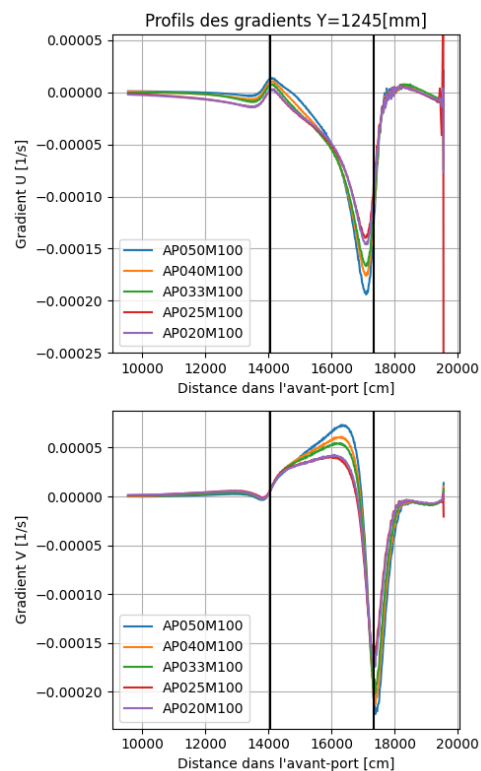


Figure 5-4 : Comparaison des gradients de vitesses selon AP avec M100

5 Analyse des vitesses

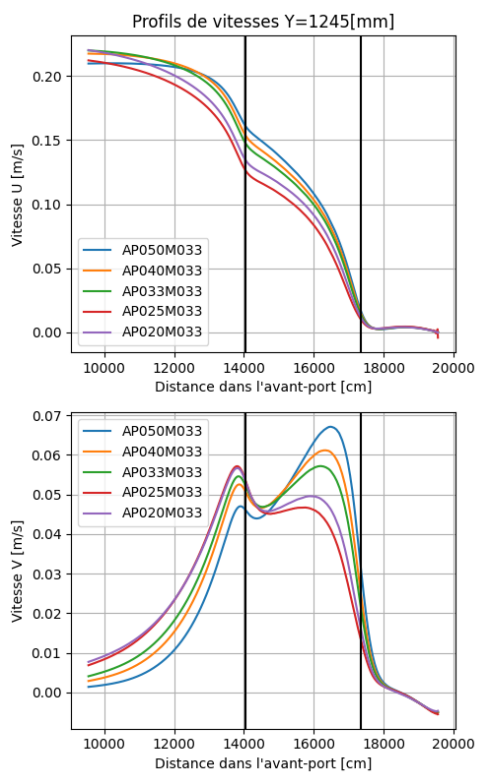


Figure 5-5 : Comparaison des profils de vitesses selon AP avec M033

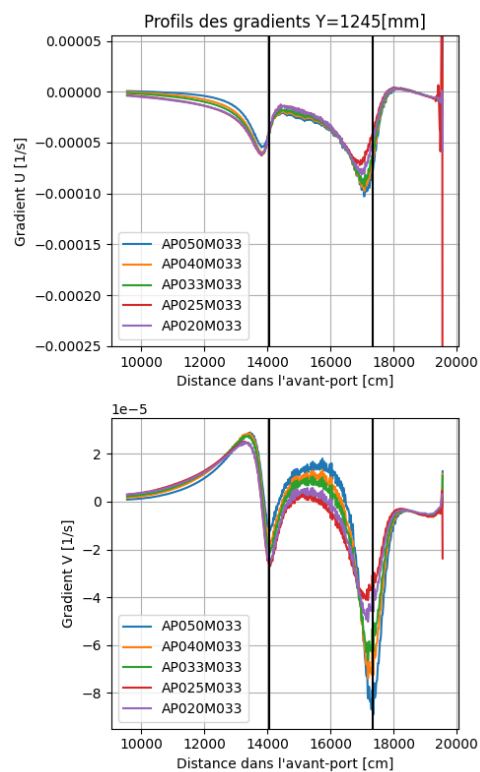


Figure 5-6 : Comparaison des gradients de vitesses selon AP avec M033

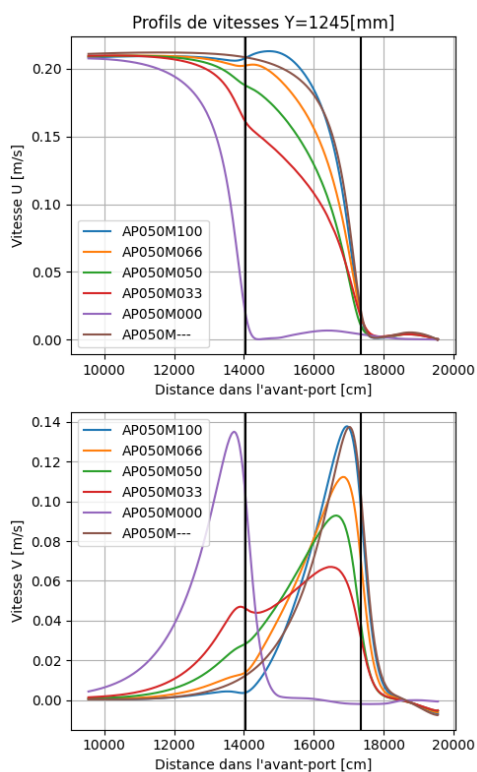


Figure 5-7 : Comparaison des profils de vitesses selon M avec AP050

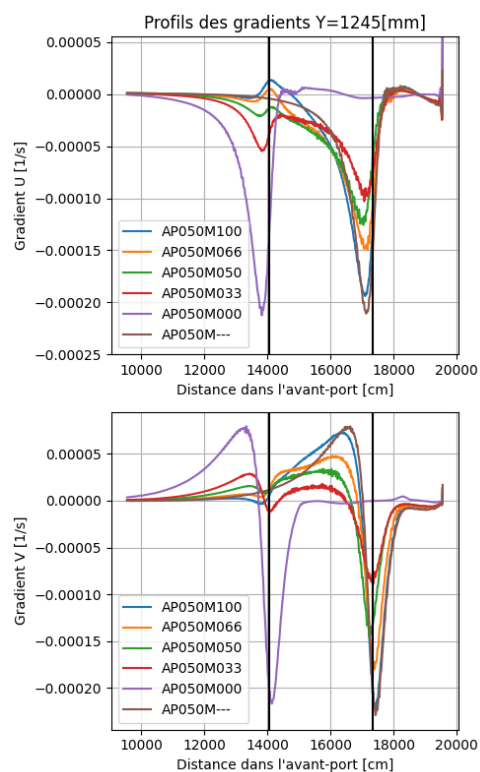


Figure 5-8 : Comparaison des gradients de vitesses selon M avec AP050

5.3 Profils de vitesses issus de la littérature

Dans cette section, nous allons observer divers profils de vitesses obtenus lors d'anciennes expérimentations réalisées par le *Service Publique de Wallonie*. Ces mesures ont été réalisées sur des modèles réduits expérimentaux. Étant donné que, dans ce travail, toutes les mesures sur modèle réduit n'ont pas pu être toutes réalisées, il est intéressant de savoir si nos constatations issues de la modélisation numérique se retrouvent aussi dans des modèles de situations existantes.

5.3.1 Ampsin-Neuville

Cette étude de 2012 portait sur la modification de l'avant-port afin de permettre la création d'une nouvelle écluse de 225 [m] x 25 [m] à côté d'une écluse déjà existante de 136 [m] x 16 [m]. L'implantation de ce nouveau projet est visible sur la Figure 5-9. Nous pouvons y trouver l'intérêt de ce mémoire en constatant que le *rapport AP* de cet avant-port augmente de $\approx 0,25$ à $\approx 0,36$.

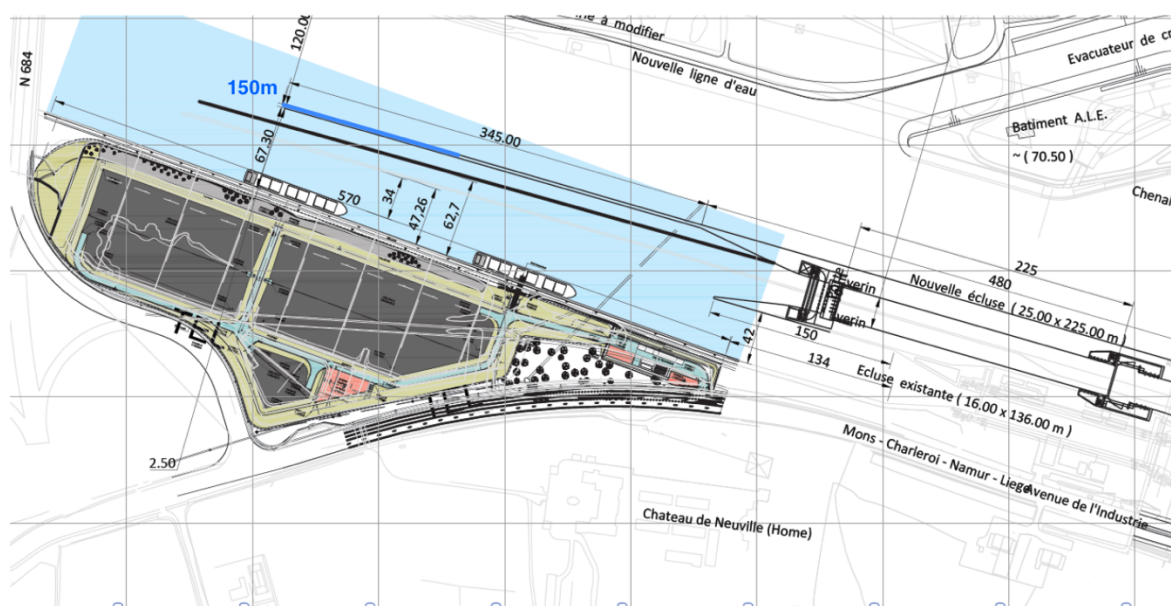


Figure 5-9 : Implantation de la nouvelle écluse amont d'Ampsin-Neuville [21]

Le modèle réduit de la nouvelle situation, réalisé au Laboratoire des Recherches Hydrauliques de Châtelet, fut construit à l'échelle 1/60. Les résultats exposés sont à l'échelle prototype. C'est-à-dire que les vitesses et les dimensions sont celles de la situation réelle.

5.3.1.1 Présentation des géométries du môle de l'avant-port

Nom de la géométrie	Rapport AP	Rapport M	Longueur du môle ouvert [m]	Longueur du môle fermée [m]	Angle ouverture [°]
A0	$\approx 0,36$	0	0	150 + 200	-
A1	$\approx 0,36$	0	0	90 + 200	-
A2	$\approx 0,36$	0	0	30 + 200	-
B0a	$\approx 0,36$	$\approx 0,55$	120	30 + 200	60
B0b	$\approx 0,36$	$\approx 0,37$	72	78 + 200	60
B1a	$\approx 0,36$	$\approx 0,55$	120	30 + 200	45
B1b	$\approx 0,36$	$\approx 0,375$	72	78 + 200	45
B2a	$\approx 0,36$	$\approx 0,55$	120	30 + 200	30
B2b	$\approx 0,36$	$\approx 0,375$	72	78 + 200	30
B3a	$\approx 0,36$	$\approx 0,55$	120	30 + 200	15

Tableau 5-1 : Géométries étudiées pour Ampsin-Neuville [22]

Les différentes géométries du môle de l'avant-port amont d'Ampsin-Neuville sont reprises dans le Tableau 5-1. Afin de comprendre leurs spécificités, elles sont exposées en Annexe 10.5.3. La position des 150 [m] amont du môle est colorié en bleu sur la Figure 5-9.

5.3.1.2 Analyse des profils de vitesses

Comme pour l'analyse des profils de vitesses du modèle idéalisé, nous allons observer les profils de vitesses transversales et longitudinales le long d'un axe de navigation. Ici l'axe de navigation est l'axe de la nouvelle écluse. Cet axe est visible sur la Figure 5-10. Il faut aussi garder à l'esprit que les résultats sont mesurés à partir d'une modélisation expérimentale qui représente une situation réelle. Ceci va impliquer de ne pas avoir des résultats aussi *propres* que par la modélisation numérique.

Le débit choisi pour cette analyse est $Q=1600$ [m³/s]. C'est un débit de grande crue. Dans ce cas, l'écoulement ne respecte pas les conditions favorables de navigation abordées dans la Section 2.2.3.

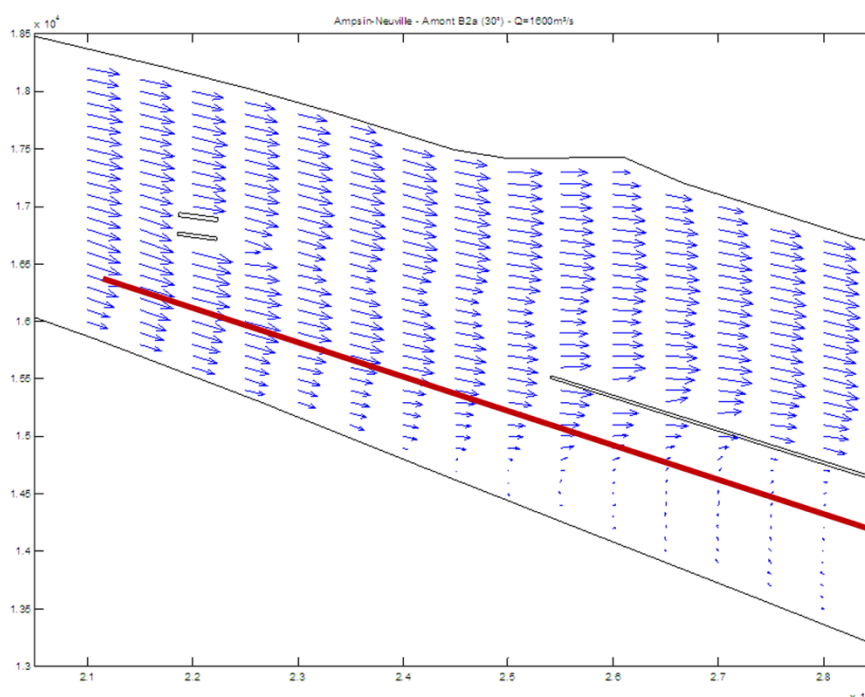


Figure 5-10 : Position de l'axe sur le champ de vitesse – Ampsin-Neuville B2a [22]

La première observation que nous pouvons faire est l'évidence du lien entre la position de la partie pleine du môle et la position de vitesses quasi-nulles. Cependant, contrairement à ce que nous pouvons observer sur la Figure 5-7 où un allongement du môle plein provoque une translation du profil vers l'amont, nous n'observons pas cette translation dans ce cas-ci. Comme nous le voyons sur la Figure 5-11, un raccourcissement du môle plein ne translate pas le profil de vitesse mais provoque un gradient de vitesse longitudinale plus important. Une tentative d'explication peut se trouver dans l'élargissement de la section de la Meuse présent au-dessus de la tête du môle (voir Figure 5-10).

Nous observons aussi ici (voir Figure 5-15 et Figure 5-16) une diminution de la vitesse transversale maximale (les pics constatés sur le modèle idéalisé) lorsque le rapport M passe de $\approx 0,55$ à $\approx 0,37$. Cette étude a étudié un autre paramètre : l'angle d'incidence de l'ouverture. Cette dernière aurait une influence sur la perméabilité du môle ($\text{rapport } M$) et donc sur le profil de vitesse transversale.

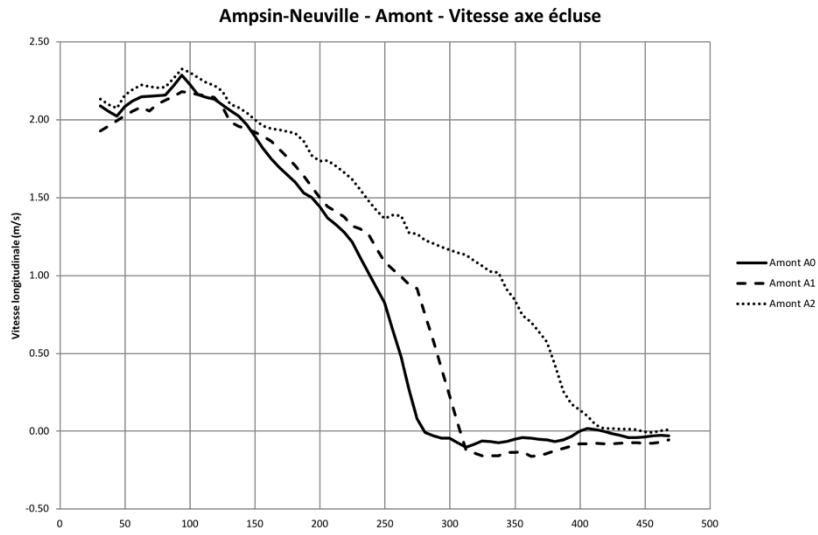


Figure 5-11 : Profils de vitesses longitudinales - Ampsin-Neuville I [22]

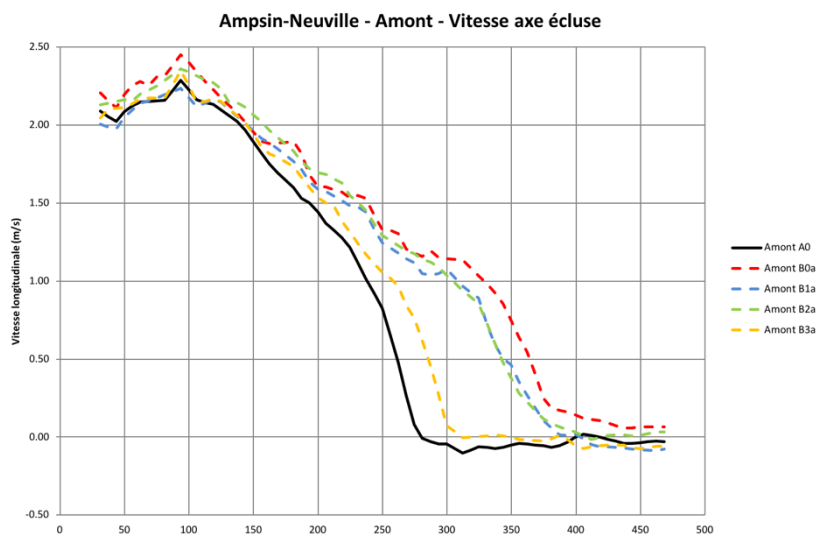


Figure 5-12 : Profils de vitesses longitudinales - Ampsin-Neuville II [22]

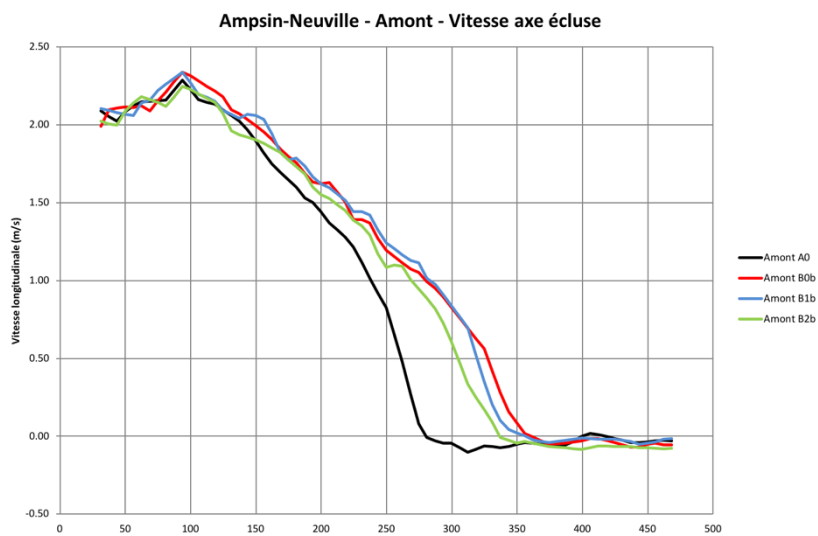


Figure 5-13 : Profils de vitesses longitudinales - Ampsin-Neuville III [22]

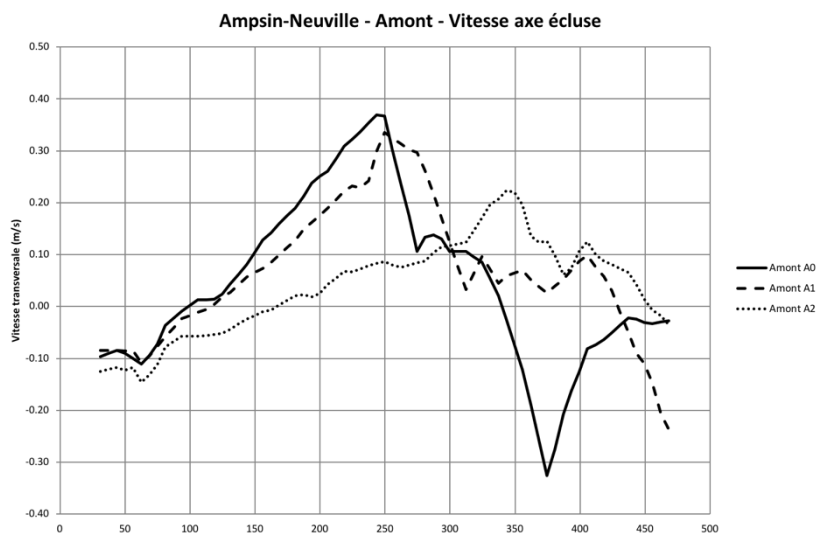


Figure 5-14 : Profils de vitesses transversales - Ampsin-Neuille I [22]

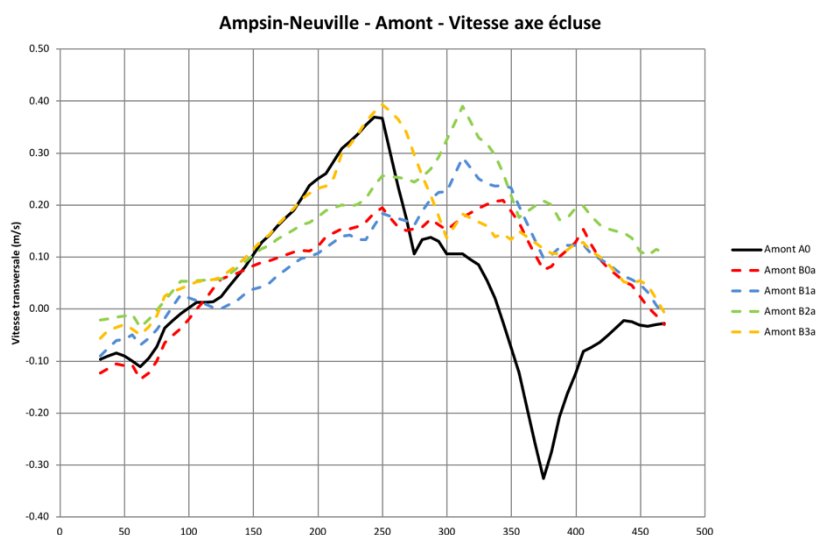


Figure 5-15 : Profils de vitesses transversales - Ampsin-Neuille II [22]

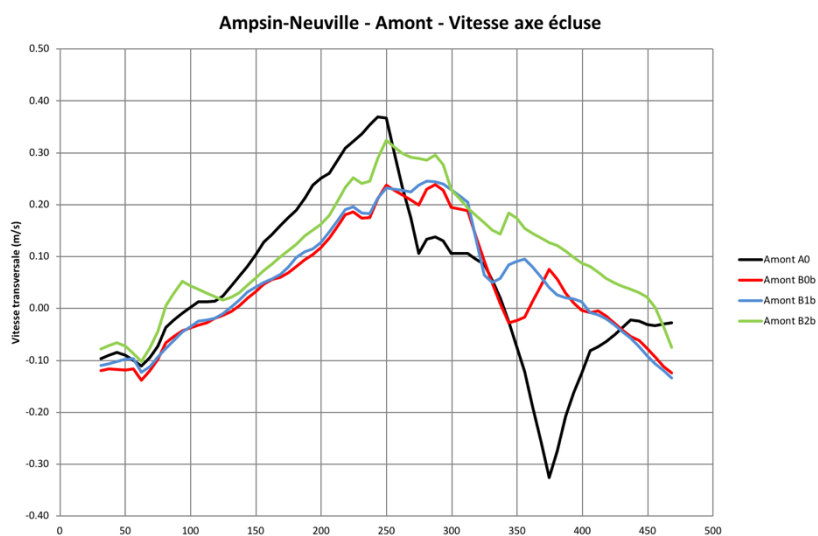


Figure 5-16 : Profils de vitesses transversales - Ampsin-Neuille III [22]

5.3.2 Auvelais

Cette étude de 2016 portait sur la modification du tracé du môle amont afin de faciliter le passage de convois de classe Va. La particularité du môle existant est qu'il est courbé à l'amont. L'avant-port a un rapport AP $\approx 0,4$ sur la Basse-Sambre. Les dimensions de l'écluse sont : 6,3 [m] x 12,5 [m]. La situation existante est présentée sur la Figure 5-17.

Afin de trouver la géométrie optimale du môle, un modèle réduit à l'échelle 1/50 fut réalisé au *Laboratoire des Recherches Hydrauliques de Châtelet*.

Cette étude propose 3 catégories de solution :

1. Un raccourcissement du môle.
2. Un raccourcissement du môle avec des modifications sur le nombre d'ouvertures.
3. Une rectification du môle.

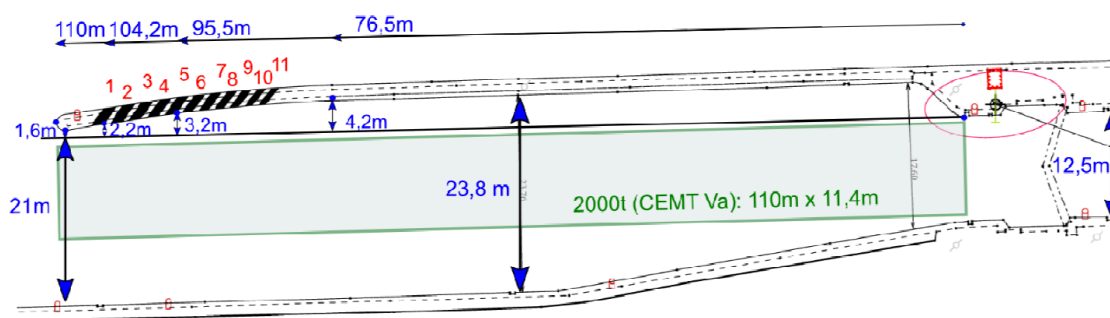


Figure 5-17 : Schéma du môle amont actuel de l'écluse d'Auvelais [23]

5.3.2.1 Présentation des géométries du môle de l'avant-port

Les différentes géométries du môle de l'avant-port amont pour Auvelais sont reprises dans le Tableau 5-2. Afin de comprendre leurs spécificités, toutes ces géométries sont exposées en Annexe 10.5.4.

Nom de la géométrie	Légende	Rapport AP	Rapport M	Longueur du môle [m]	Angle ouverture [°]
Môle existant	MAct	$\approx 0,4$	$\approx 0,56$	110	inconnu
Môle raccourci 10 ouvertures	M10o	$\approx 0,4$	$\approx 0,5$	104,2	inconnu
Môle raccourci 3 ouvertures	M3o	$\approx 0,4$	$\approx 0,15$	95,5	inconnu
Môle raccourci 7 ouvertures	M7o	$\approx 0,4$	$\approx 0,35$	95,5	inconnu
Môle droit	MNA	$\approx 0,4$	0	124	-
Môle droit ajouré par 9 ouvertures	M9o	$\approx 0,4$	$\approx 1,13$	124	45
Môle droit ajouré par 5 ouvertures	M5o	$\approx 0,4$	$\approx 0,63$	124	45

Tableau 5-2 : Géométries étudiées pour Ampsin-Neuville [23]

5.3.2.2 Analyse des profils de vitesses

Cette analyse des profils de vitesses sur la section longitudinale correspondant à un axe de navigation qui va suivre la même démarche que celle faite dans la Section 5.3.1.2. Cette section est visible en bleu sur la Figure 5-18. Ces profils donnent les vitesses pour un débit prototype de $100 \text{ [m}^3/\text{s}]^9$.

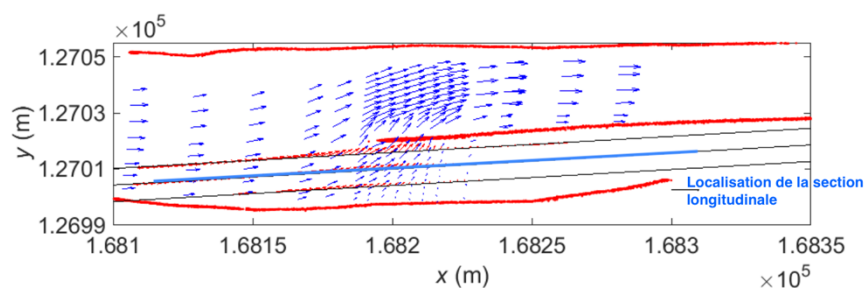


Figure 5-18 : Position de la section longitudinale – Auvélais [23]

Remarque : les verticales présentes sur les graphes des profils de vitesses marquent la délimitation de la partie ajourée. En bleu les délimitations pour le môle actuel ; en rouge celles pour le môle court ajouré de 8 ouvertures et en noir celles pour le môle droit.

La première constatation que nous pouvons faire c'est que la géométrie complexe de môle ne permet pas d'observer de manière évidente les observations faites pour le modèle idéalisé. Cependant, nous retrouvons le lien entre la position des vitesses quasi-nulles et la position du môle fermé. Ce lien est bien visible sur les profils de vitesses avec môle droit (voir Figure 5-20 et Figure 5-22).

La seconde observation est la diminution de la vitesse transversale maximale lorsque le rapport M diminue (voir Figure 5-21 et Figure 5-22).

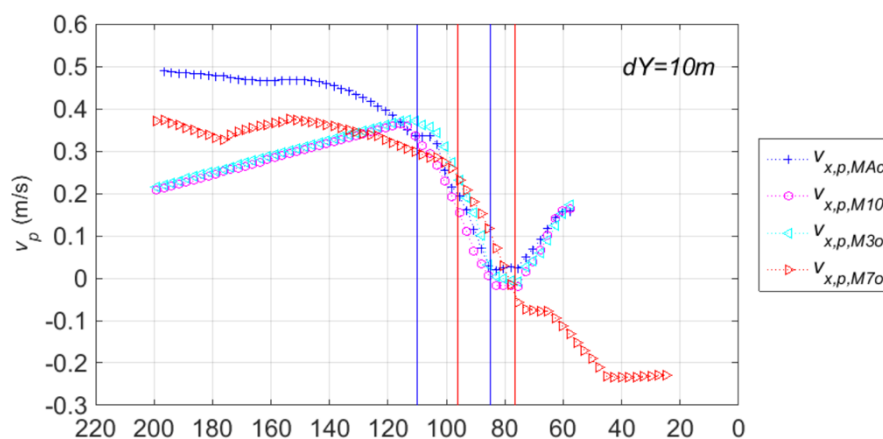


Figure 5-19 : Profils de vitesse longitudinale I – Auvélais [23]

⁹ Petite précision : les mesures vitesses ont été effectuées avec un débit prototype de $200 \text{ [m}^3/\text{s}]$. Ces vitesses ont ensuite été ramenées pour un débit de $100 \text{ [m}^3/\text{s}]$ [19, pp. 24, 25]

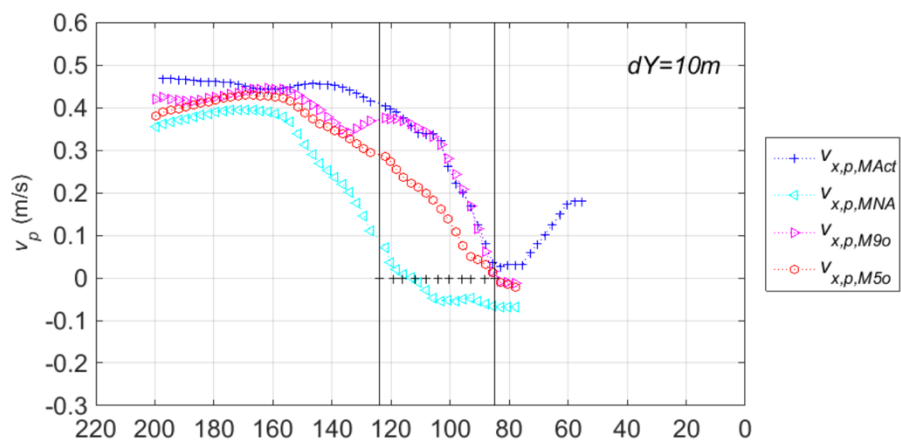


Figure 5-20 : Profils de vitesse longitudinale II – Auvélais [23]

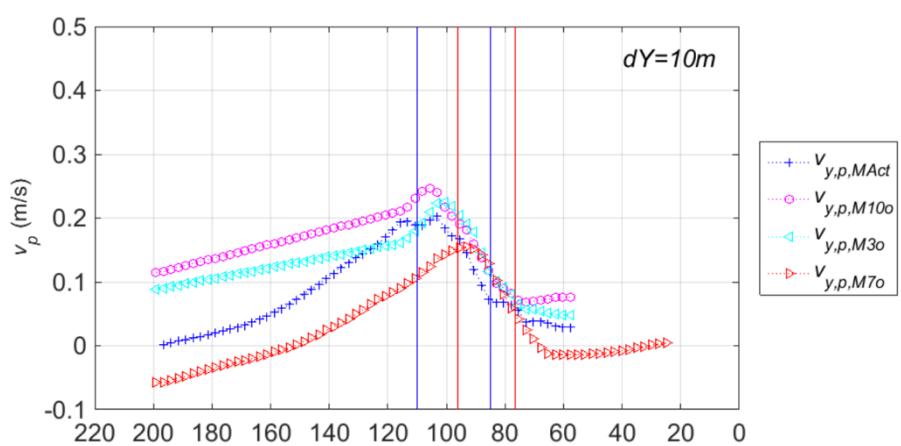


Figure 5-21 Profils de vitesse transversale I – Auvélais [23]

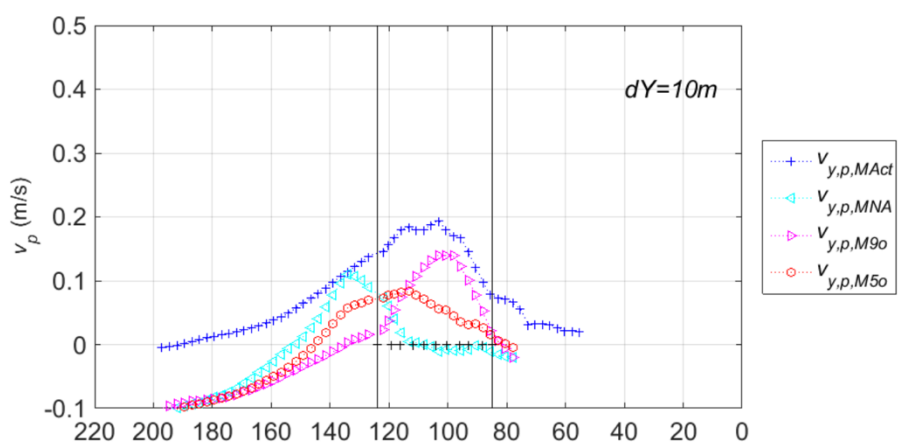


Figure 5-22 Profils de vitesse transversale II – Auvélais [23]

6 Analyse des forces et des moments de forces

6.1 Introduction

Le chapitre 5 tente de décrire l'impact des *rappports* AP et M sur le champ de vitesse dans l'avant-port. Ces descriptions n'ont pas pour but de trouver le rapport qui permettrait d'obtenir les conditions de navigations sûres comme décrites à la Section 2.2.3. Afin d'apporter une analyse plus qualitative sur l'impact des *rappports* étudiés, ce chapitre va analyser l'**impact des forces** et des **moments de forces** sur une barge lorsqu'il traverse notre avant-port modélisé.

6.2 Démarche

Pour simuler la traversée d'une barge dans l'avant-port modélisé, il faut tout d'abord définir les dimensions caractéristiques de notre modèle. La première dimension caractéristique que nous devons définir est la dimension de la barge. Notre choix s'est porté sur une **classe Va** de type **Grand Rhéna**. La deuxième dimension caractéristique est l'échelle du modèle réduit. L'**échelle** du modèle est de **3/100**. C'est-à-dire que les 110 [m] de longueur d'un Grand Rhéna représente 330 [cm] dans le modèle. Un schéma reprenant la situation est visible sur la Figure 6-1. Cette situation représente un avant-port d'une écluse à 2 sas. Ceci permet d'avoir un axe de navigation plus proche du môle et par conséquent d'avoir des forces transversales plus marquées. En effet, comme le montre la Section 5.2.2, les vitesses transversales sont d'autant plus importantes que la coupe est proche du môle. Le lien entre le champ de vitesses et le champ de pression est expliqué ci-dessous.

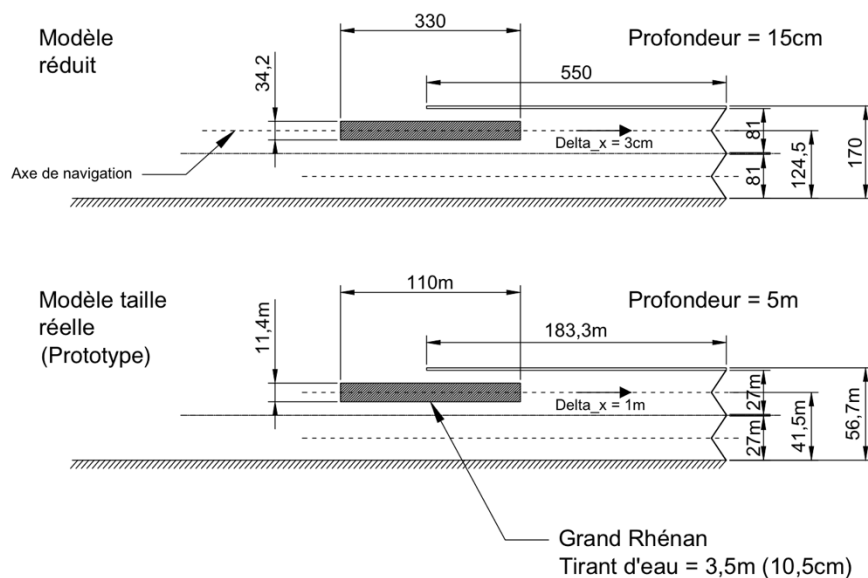


Figure 6-1 : Schéma de la situation du modèle réduit

Pour calculer les forces et les moments de forces qui vont s'appliquer sur la barge le long de sa traversée dans l'avant-port, nous allons intégrer le champ de pression qui s'applique sur les axes transversaux et longitudinaux de la barge (voir schéma à la Figure 6-2). Ceci est une grosse hypothèse simplificatrice car en réalité la présence de la barge modifie localement le champ de pression. Ce schéma permet aussi de se rendre compte encore une fois de l'impact des courants transversaux sur la barge et donc sur la navigation.

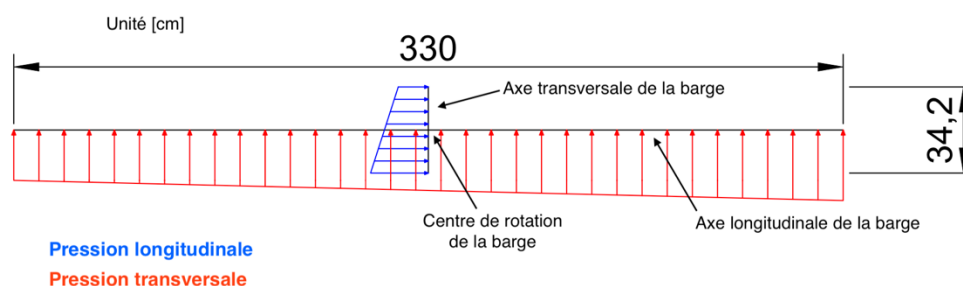


Figure 6-2 : Schéma de compréhension pour le calcul des F et M

Le champ de pression est dérivé du champ de vitesse. Le théorème de Bernoulli¹⁰ permet de donner le lien entre le champ de vitesses et le champ de pression. En prenant l'hypothèse que la densité volumique d'énergie potentielle de gravité est constante ($e_z = \rho \cdot g \cdot z = \text{constante}$), le champ de pression agissant sur la barge due au champ de vitesses vaut :

$$p(x, y) = \frac{v(x, y)^2}{2} \cdot \rho$$

Où ρ est la masse volumique de l'eau ($\approx 1000 \text{ [kg/m}^3\text{]}$).

6.3 Profils des forces et des moments de forces

L'analyse des profils de vitesses au Chapitre 5 permet d'observer les liens entre les deux rapports étudiés et leurs impacts sur l'écoulement. L'analyse des profils de forces et des moments de forces va cette fois permettre d'observer les liens entre les deux rapports étudiés et leurs impacts sur la navigation. En effet, cette nouvelle comparaison forces permet de visualiser pour chaque position du navire dans l'avant-port les forces et moments de forces agissant sur lui. La trajectoire suivie par notre barge est visible sur la Figure 6-1.

La première observation sur les Figure 6-3 à Figure 6-17 que nous pouvons constater la diminution des forces transversales et maximales lorsque le *rapport AP* diminue. La diminution de ce rapport provoque aussi une réduction de l'amplitude des profils des moments de forces. Cependant à la vue de ces figures, il semble que cette diminution de forces et de moments ne suit pas cette logique pour les rapports AP les plus petits (0,2 et 0,25). La Figure 6-5, la Figure 6-10 et la Figure 6-15 présentent les évolutions de ces profils pour des configurations sans môles ajourés et permettent de retrouver cette logique.

La seconde observation que nous pouvons tirer de ces figures est qu'il est possible de diminuer fortement les forces et l'amplitude des moments de forces s'appliquant au navire. La Figure 6-11 montre que les forces transversales peuvent être réduites de moitié (cette valeur est donnée à titre qualitative et non quantitative) si le môle présente un *rapport M* valant 0,33 au lieu d'un môle plein. Ceci répond aussi à notre interrogation issue de la synthèse de l'étude de STOCKSTILL à la Section 2.4.2. En effet nous voyons que pour des *rapports AP* élevé (supérieur à 0,25), le *rapport M* de 0,6 prescrit par STOCKSTILL n'est plus correct. Nous pouvons déduire en comparant la Figure 6-7 et la Figure 6-12 aux autres figures que le *rapport M optimal* augmente lorsque le *rapport AP* diminue.

Remarque : Les verticales noires représentent les extrémités du *môle ouvert*.

¹⁰ Principe de Bernoulli : $\frac{v^2}{2} + g \cdot z + \frac{p}{\rho} = \text{constante}$

6 Analyse des forces et des moments de forces

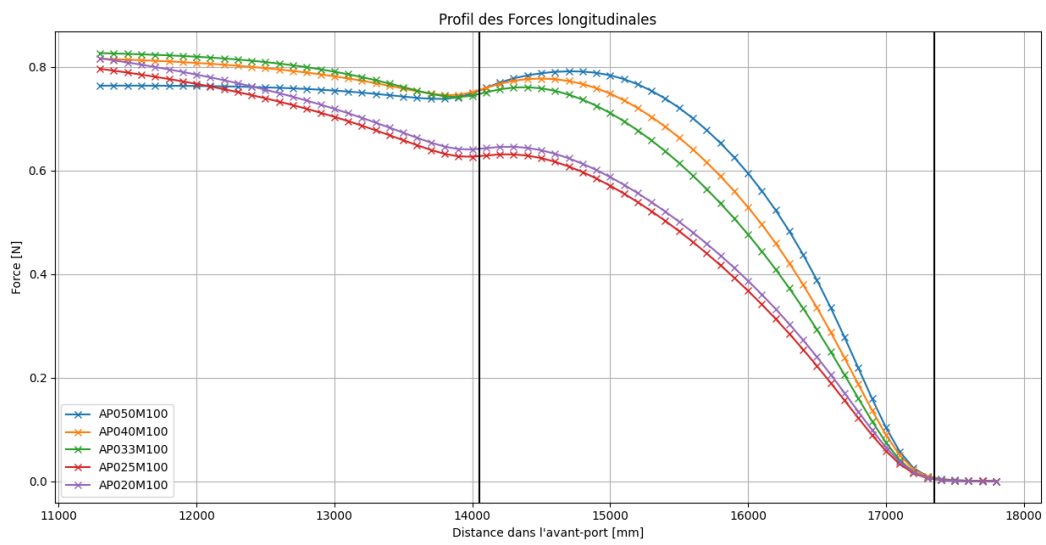


Figure 6-3 : Profils des forces longitudinales I

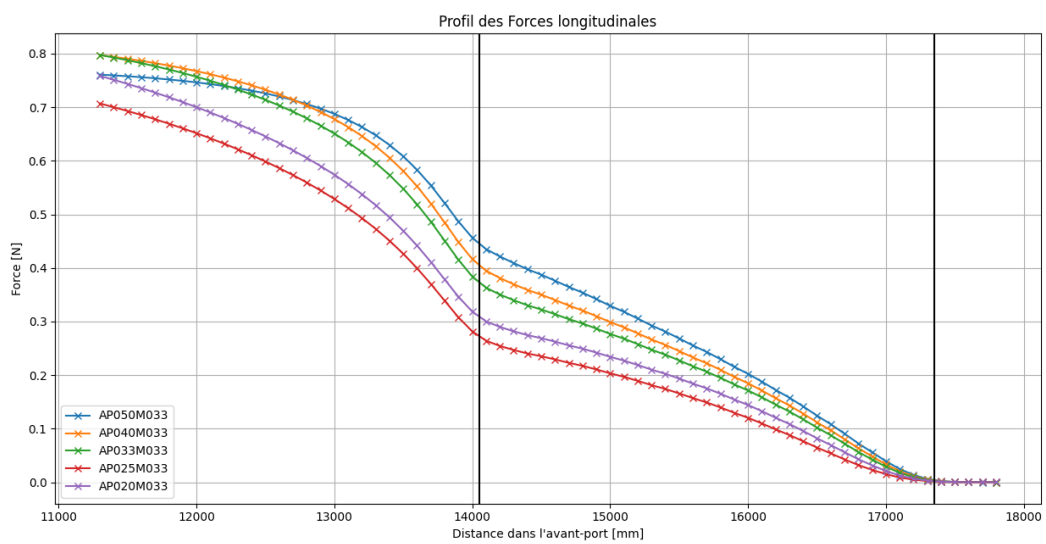


Figure 6-4 : Profils des forces longitudinales II

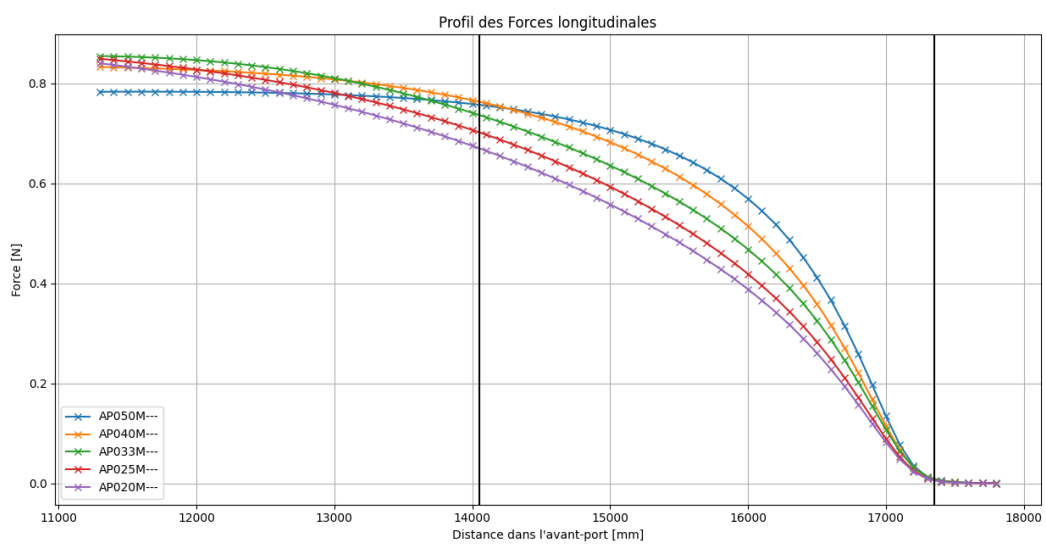


Figure 6-5 : Profils des forces longitudinales III

6 Analyse des forces et des moments de forces

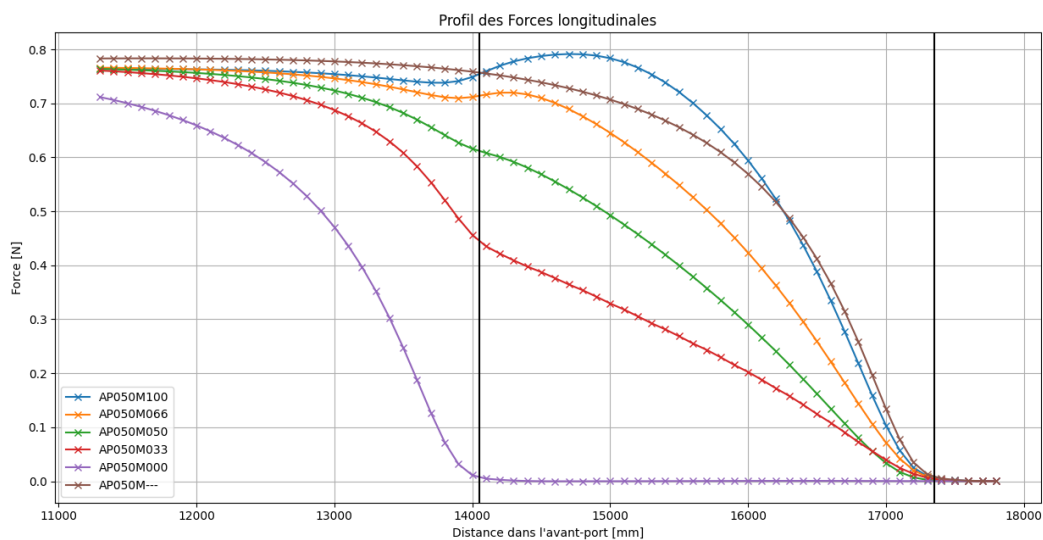


Figure 6-6 : Profils des forces longitudinales IV

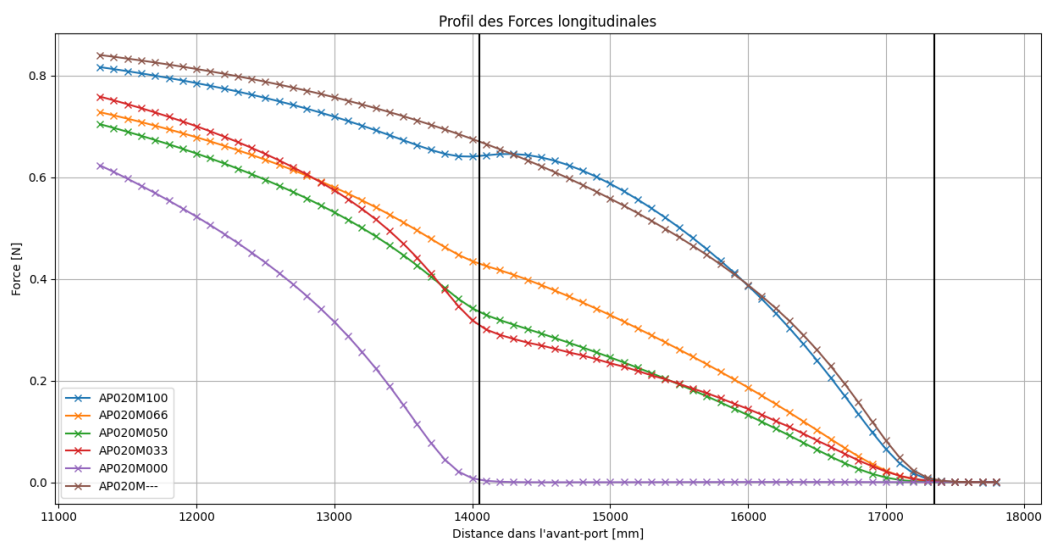


Figure 6-7 : Profils des forces longitudinales V

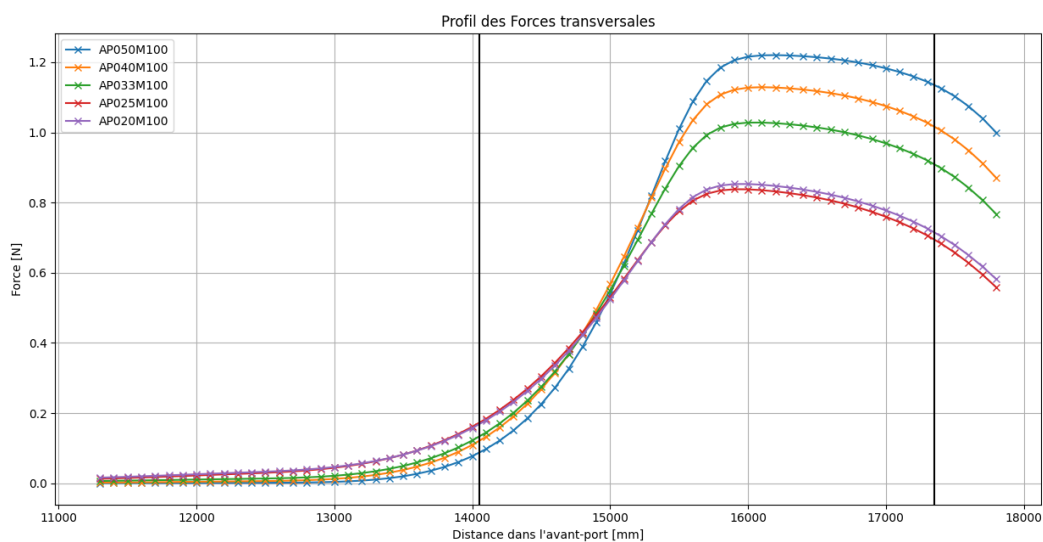


Figure 6-8 : Profils des forces transversales I

6 Analyse des forces et des moments de forces

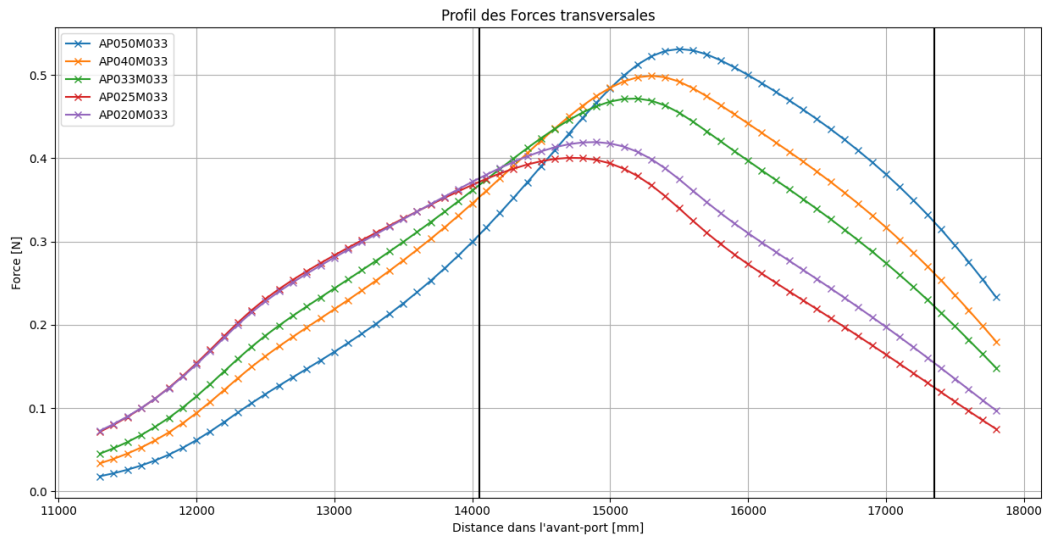


Figure 6-9 : Profils des forces transversales II

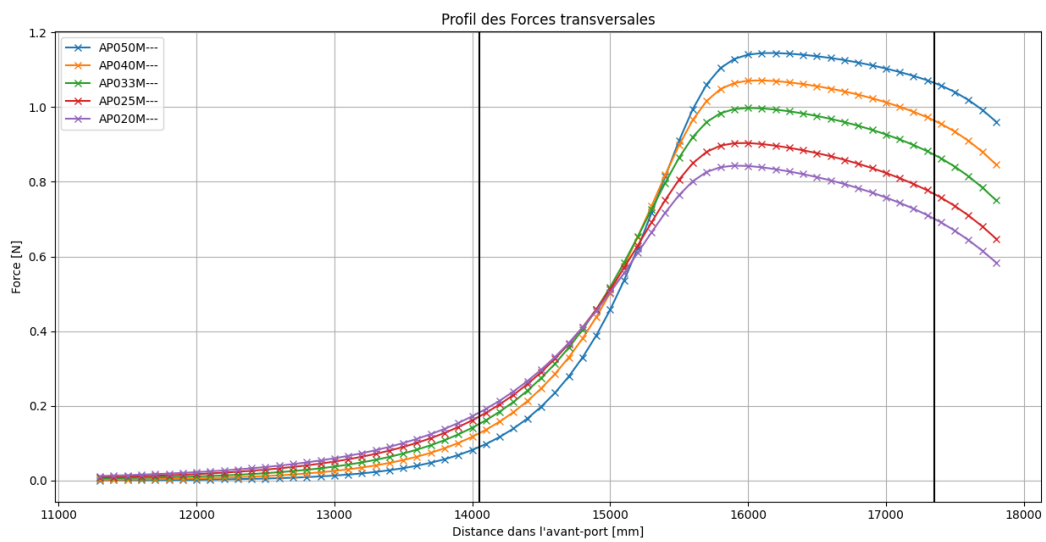


Figure 6-10 : Profils des forces transversales III

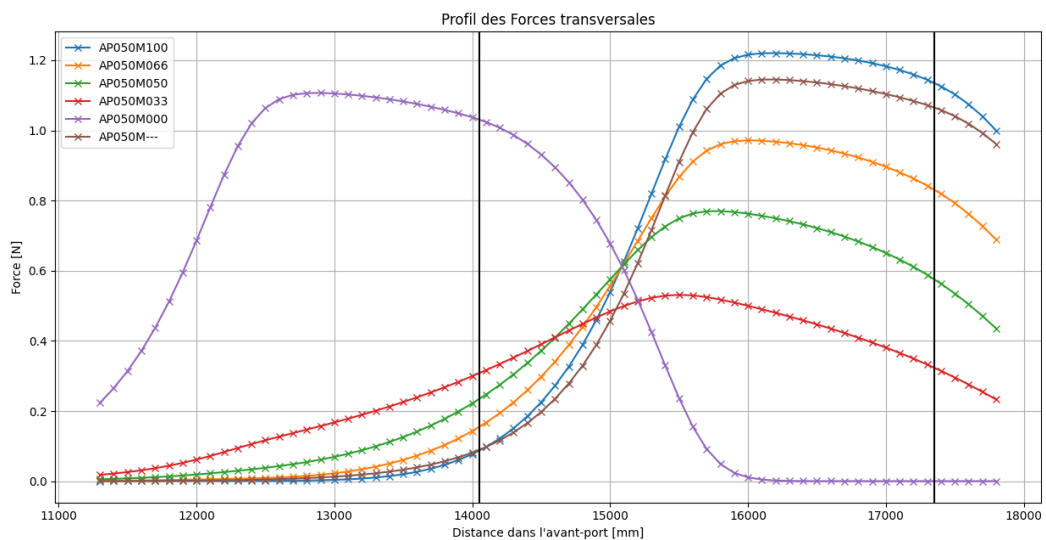


Figure 6-11 : Profils des forces transversales IV

6 Analyse des forces et des moments de forces

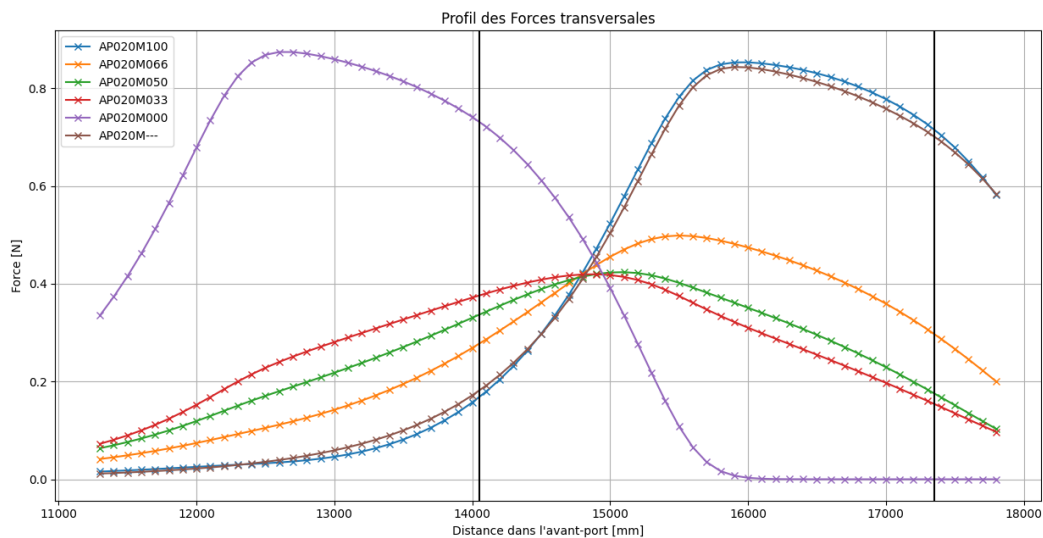


Figure 6-12 : Profils des forces transversales V

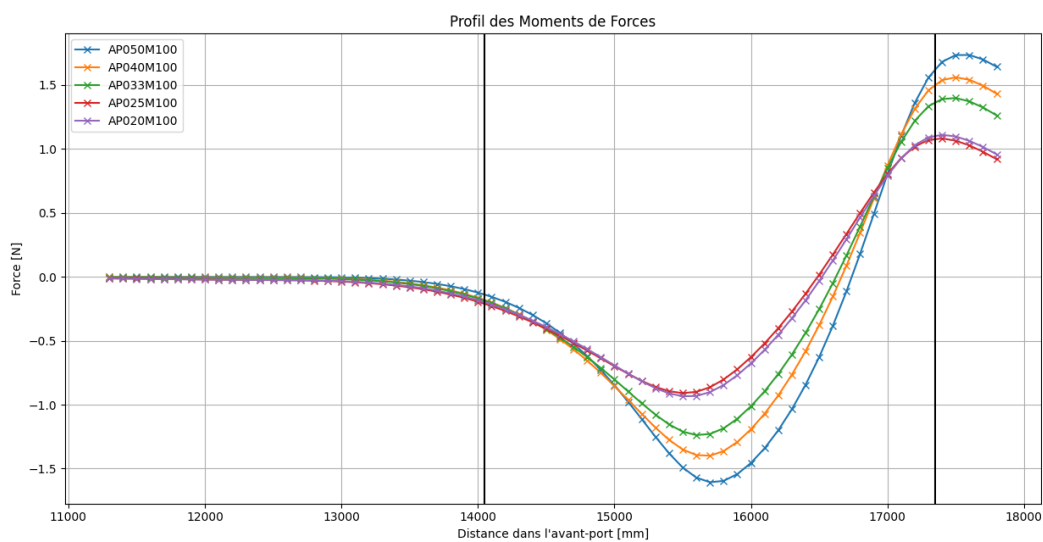


Figure 6-13 : Profils des moments de forces I

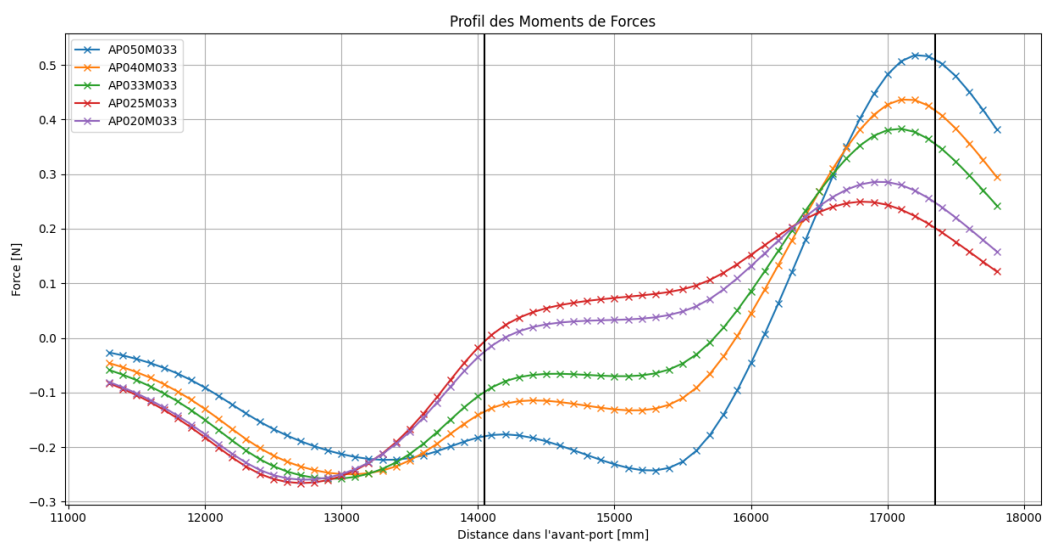


Figure 6-14 : Profils des moments de forces II

6 Analyse des forces et des moments de forces

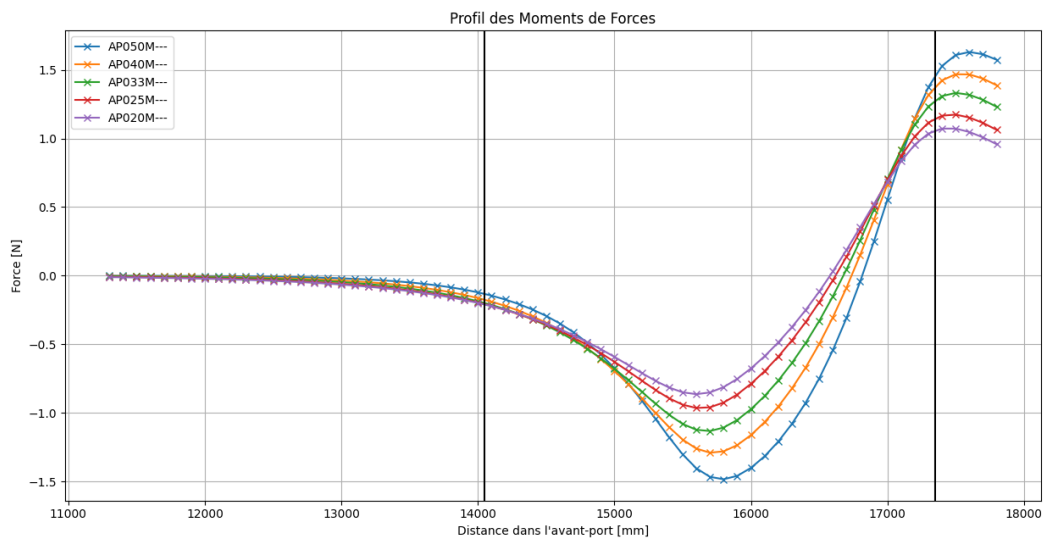


Figure 6-15 : Profils des moments de forces III

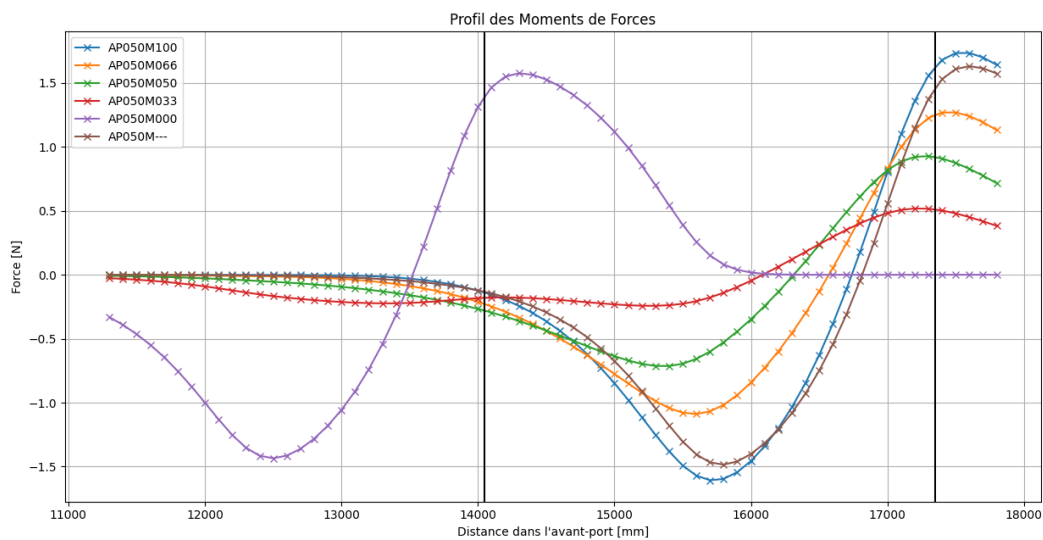


Figure 6-16 : Profils des moments de forces IV

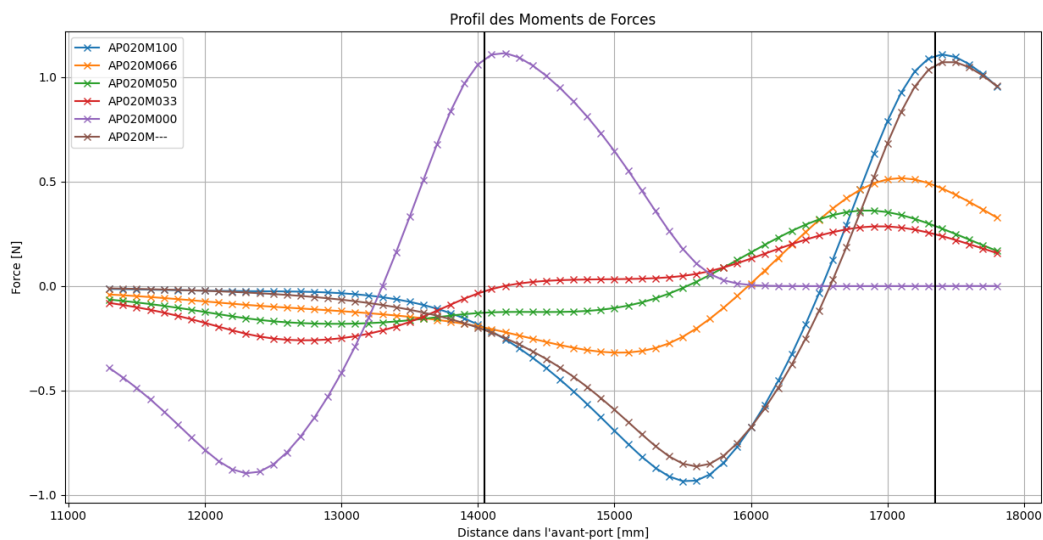


Figure 6-17 : Profils des moments de forces V

6.4 Comparaison des effets entre les différentes géométries

Dans cette section, nous allons essayer de classer qualitativement les configurations entre elles selon plusieurs critères. Le premier critère la force maximale (transversale et longitudinale) agissant sur la barge lors de son déplacement dans l'avant-port. Le second critère est le moment absolu maximal. Le dernier critère est la valeur de l'intégrale des profils de force présentés dans la Section 6.3. Cette intégrale représente « le travail » (Force x déplacement dans l'avant-port) que va subir la barge lors de sa traversée. Ces valeurs sont affichées sur les Figure 6-18 à Figure 6-20.

Ces résultats mettent en évidence qu'il existerait un **rapport M optimal** permettant une diminution du « travail » du aux **forces transversales** pour un **rapport AP** donné. Pour des **rapports AP** inférieurs à 0,25 ce rapport optimal serait compris entre 0 (exclu) et 0,5.

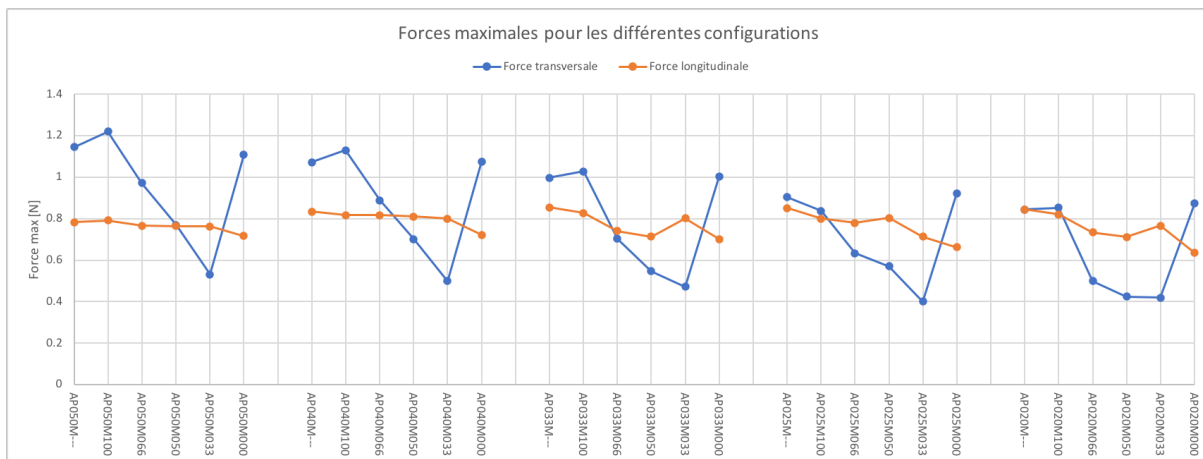


Figure 6-18 : Forces maximales pour les différentes configurations

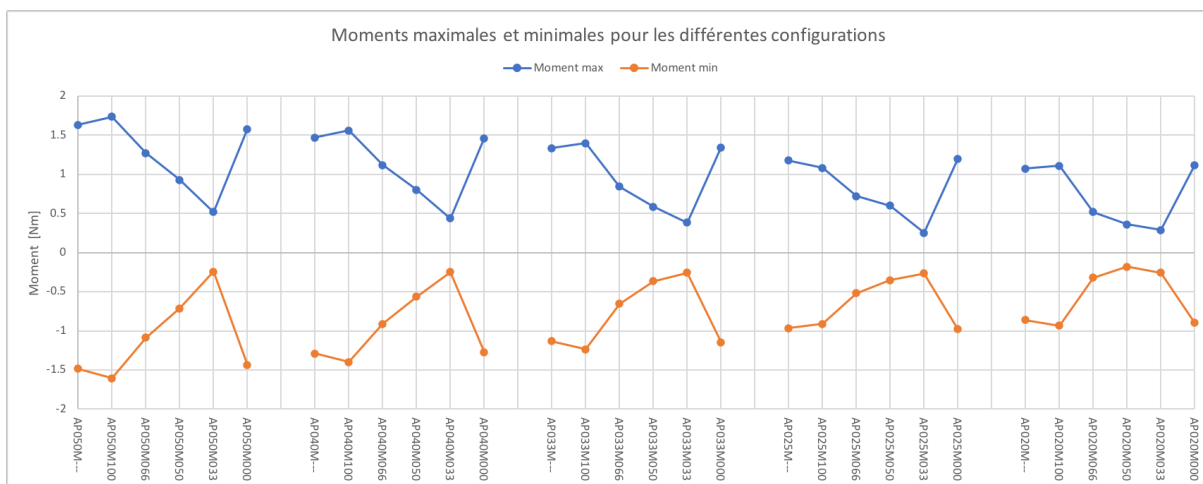


Figure 6-19 : Moments maximaux pour les différentes configurations

6 Analyse des forces et des moments de forces

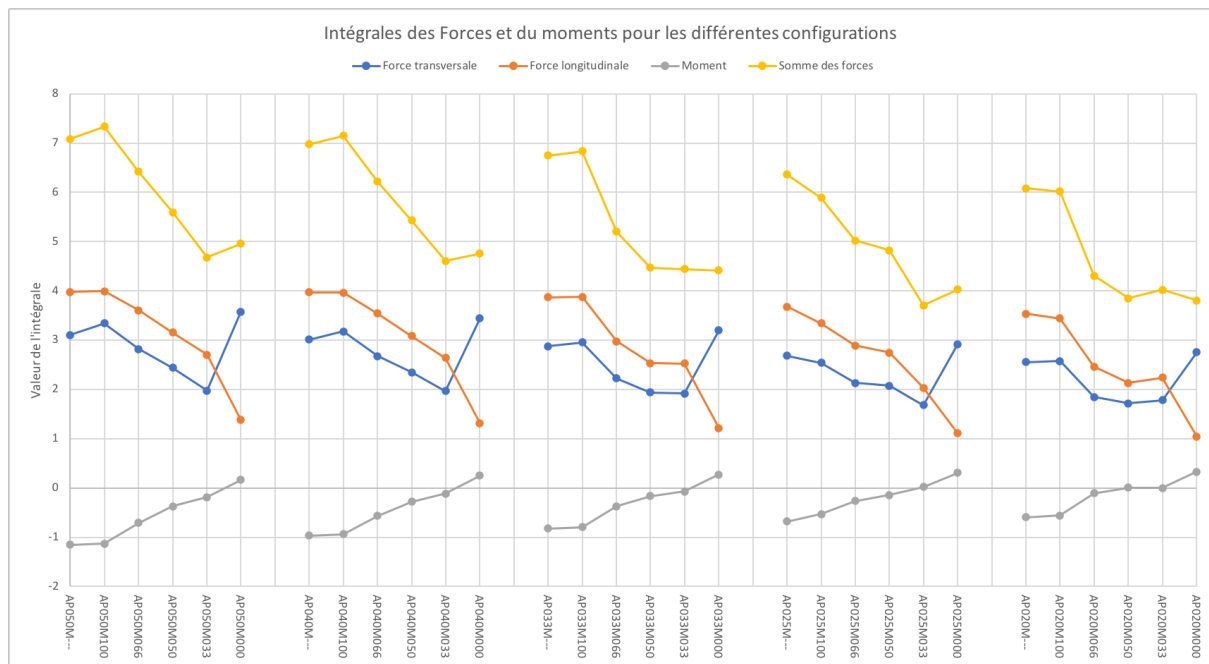


Figure 6-20 : Valeurs des intégrales de F longitudinales et transversales et de M

7 Perspectives

Ce chapitre donne dans un premier temps d'apporter des pistes d'améliorations pour la modélisation d'écoulement dans l'avant-port. Dans un second temps il avance des idées d'approfondissement pour déterminer les paramètres permettant de contribuer à de meilleures conditions de navigations.

7.1 Modélisation

Une première piste d'amélioration est de comparer les résultats numériques avec les résultats expérimentaux. La méthodologie de l'étude ayant changé au cours de ce travail, il y a uniquement deux configurations de géométries qui ont pu être mesurées expérimentalement (sur les 20 prévues initialement). Comparer les résultats numériques avec plus de résultats expérimentaux permettrait d'affirmer encore plus la validité des résultats numériques. Ceci pourrait aussi lever nos interrogations sur les gyres constatés dans le canal drainant sur certaines configurations (voir la Section 5.2.1).

La deuxième piste est de terminer quelques essais expérimentaux prévus permettrait d'affiner la modélisation numérique. Plus particulièrement les essais se concentrant sur la géométrie du môle (rapport M). En effet, comme nous l'avons vu, la modélisation numérique est un atout très puissant pour observer l'impact d'un paramètre sur le champ de vitesses. Avec un modèle plus fin, il peut être intéressant de modéliser des môles ajourés de rapport M entre 0,5 et 0 afin de pouvoir cibler avec une plus grande précision le rapport M optimal.

7.2 Paramètres

Pour ce travail nous avons étudié l'influence de la perméabilité globale du mole ajouré caractérisé par le rapport M . Il en est ressorti que pour des avant-ports interceptant plus d'un quart du cours d'eau, le rapport M favorisant des conditions de navigations sûres se situe entre 0,5 et 0. L'analyse des profils de vitesses issus de la modélisation d'Ampsin-Neuville et d'Auvelais mette en évidence que les profils de vitesses varient selon l'angle des ouvertures du môle ajouré. Il serait donc intéressant de déterminer si une variation locale de l'angle des ouvertures ou une variation locale des ouvertures permettrait d'optimiser encore plus les conditions de navigation. En effet, Les profils de vitesses pour les rapports M optimaux présentent deux pics de vitesses élevées. L'idée serait de voir si une variation locale de la perméabilité atténuerait ces pics. Ces potentiels profils optimaux sont visibles en rouge pointillé sur la Figure 7-1.

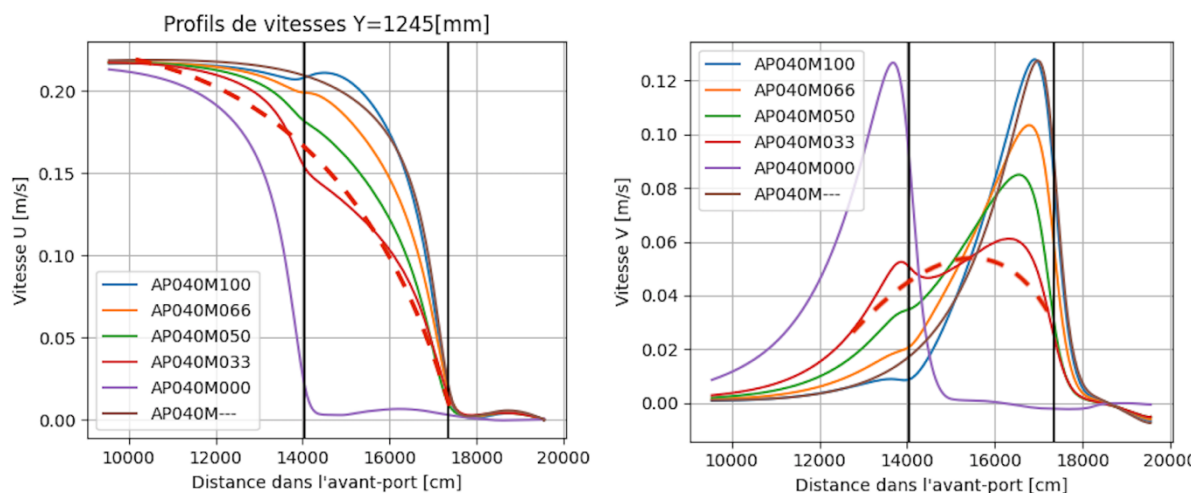


Figure 7-1 : Perspective de profils optimaux.

8 Conclusion

Rappelons tout d'abord la problématique qui a donné un intérêt pour ce travail. Nous sommes dans le contexte du développement du transport fluvial wallon. Ce développement passe par l'accueil d'un trafic de barges plus important et d'une élévation de la Classe des cours d'eau wallons. Dans ce cas, la construction de nouvelles écluses ou la modification de môles existant sont donc requises. Ceci implique la modification de l'avant-port et donc du champ de vitesses dans ce dernier. En parallèle, des études montrent l'impact négatif sur la navigation lorsqu'un avant-port intercepte une plus large section de la voie d'eau.

Dans un premier temps, ce travail était chargé de confirmer l'augmentation des courants au droit d'un môle ajouré lorsque le rapport entre la largeur de l'avant-port sur la largeur du cours d'eau augmente. Dans un second temps, ce travail devait étudier l'impact de la perméabilité du môle ajouré sur le champ de vitesses afin de voir s'il est possible de réduire les courants transversaux dans l'avant-port.

Pour mener cette étude, il a d'abord été envisagé de concevoir un modèle expérimental. Ce modèle fut développé au *Laboratoire des Recherches Hydrauliques de Châtelet*. Il fut prévu d'étudier 5 rapports d'interception et 4 perméabilités de môle différentes (Pour un total de $5 \times 4 = 20$ configurations). Malheureusement à la suite de divers problèmes techniques et à la crise sanitaire de 2020, nous n'avons pu mesurer que 2 champs de vitesses uniquement. Grâce à ces 2 mesures validées expérimentalement, l'étude a quand même pu se poursuivre sur un modèle numérique.

Le modèle numérique reprend les mêmes caractéristiques et dimensions que le modèle expérimental. La simulation de l'écoulement s'est effectuée avec le logiciel Telemac2D. Bien qu'au départ le modèle numérique fut une solution alternative au modèle prévu pour cette étude, sa flexibilité a permis de tester un plus grand nombre de paramètres. C'est un total de 30 configurations qui ont pu être étudiées.

Impact de la section de la voie d'eau interceptée par l'avant-port (rapport AP) :

Ce travail vérifie l'augmentation des courants longitudinaux et surtout des courants transversaux dans l'avant-port lorsque la section du cours d'eau interceptée augmente.

Impact de la perméabilité du môle (rapport M) :

Cette étude montre qu'il est possible de réduire les courants transversaux et d'améliorer les conditions de navigations à l'intérieur de l'avant-port par l'emploi d'un môle ajouré. Les perméabilités étudiées ont montré qu'une perméabilité trop élevée (c'est-à-dire un rapport $M = 1$) n'offre aucun bénéfice sur les conditions de navigation. Les champs de vitesses entre un môle trop perméable et l'absence de môle sont forts semblables.

Cette étude devrait permettre d'éclairer les futures conceptions d'avant-ports amont en donnant une gamme de paramètres optimaux sur la perméabilité du môle. La perméabilité optimale pour des situations où le rapport AP est supérieur à 0,25 se situe entre 0 (exclu) et 0,5. Quant aux situations où le rapport où le rapport AP est inférieur à 0,25, la perméabilité optimale se situe entre 0,5 et 1 (exclu).

9 Bibliographie

- [1] J.-C. GOYON, Transports par voie d'eau et organisation étatique de la vallée du Nil à l'époque pharaonique, MOM Editions, 1986.
- [2] J. JUPRELLE, «Demande de transport terrestre et répartition modale (MAJ le 01/06/2020),» www.iweeps.be, 2020.
- [3] Service Public de Wallonie, «Voies Hydrauliques de Wallonie,» [En ligne]. Available: <http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/promotion/transport/>. [Accès le 2020].
- [4] AirParif, «Bilan 2015 des émissions atmosphériques – Ile-de-France,» AIRPARIF, 2015.
- [5] AWSR, «Rapport thématique : les camions en Wallonie,» Wallonie sécurité routière, 2018.
- [6] Service Public de Wallonie, «Un réseau fluvial pleinement opérationnel,» 2020. [En ligne]. Available: <http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr/promotion/divers/news/index.html#1586252640000>. [Accès en 2020].
- [7] VNF, «COVID-19 : Sur le réseau VNF, le transport fluvial contribue au maintien de l'activité économique du pays,» 01 04 2020. [En ligne]. Available: <https://www.vnf.fr/vnf/covid-19-sur-le-reseau-vnf-le-transport-fluvial-contribue-aussi-au-maintien-de-lactivite-economique-du-pays/>. [Accès en 2020].
- [8] ITB, Institut pour le Transport par Batellerie, 2008. [En ligne]. Available: https://www.itb-info.be/fr/gp_types-de-bateaux-en-navigation-interieure_18.aspx. [Accès en 2020].
- [9] C. f. T. a. N. Rijkswaterstaat, J. U. Brolsma et K. Roelse, Waterway Guideline 2011, Directorate-General for Public Works and Water Management, Rijkswaterstaat, 2011.
- [10] Walké et Semhur, «Enfoncement dynamique,» [En ligne]. Available: [https://fr.wikipedia.org/wiki/Squat_\(navire\)](https://fr.wikipedia.org/wiki/Squat_(navire)). [Accès en 2020].
- [11] R. L. STOCKSTILL, «Modeling Navigation Conditions at Lock Approaches,» US Army Corps of Engineers, 2001.
- [12] R. L. STOCKSTILL, J. J. E. HITE et H. E. PARK, «Hydraulics Design of Upper Approach Walls to Navigation Locks,» *PIANC Magazine AIPCN n°118*, pp. 17-25, Janvier 2005.
- [13] U. A. C. o. Engineer, USACE Design of shallow draft waterways, 1980.
- [14] «Vac-U-Boat,» [En ligne]. Available: http://www.vac-u-boat.com/Old_River_Bills_Site/Barges.htm. [Accès en 2020].
- [15] D. BOUSMAR et J.-M. HIVER, «Mesures courantométriques sur modèle physique,» Direction des Recherches Hydrauliques, Service Public de Wallonie, 2009.
- [16] B. Didier, «HydroCAP3 - RAPPORT DE STAGE - Automatisation des mesures sur modèle réduit hydraulique,» Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports, 2008.
- [17] W. D. Hydraulics, P-EMS programmable electromagnetic liquid velocity meter (Manual), Delft: WL Delft Hydraulics, 2001.
- [18] openTELEMAC, Telemac2D - User Manuel, openTELEMAC, 2020.
- [19] J.-M. HERVOUET, Hydrodynamics of free surface flows. Modelling with the finite element method., Paris: John Wiley & Sons, Ltd, 2007.
- [20] D. Muyldermans, C. Manfroid, L. Gilson et M. Poncin, 2013. [En ligne]. Available: https://sites.uclouvain.be/didacticiel-hydraulique/Lecons/Lecon_II_1/Tableau_n.htm. [Accès en 2020].
- [21] G. T. PIB, «Simulations Navigation Ampsin - Meuse - Poste 1.1: Nouvelle écluse d'Ampsin, Avant-Projet initial,» SOFICO, 2013.
- [22] D. G. O. d. l. M. e. d. V. Hydrauliques, «Mod. 059 - Ampsin-Neuville : modèle des avant-ports,»

Service Public de Wallonie (SPW), 2012.

- [23] C. Swartenbroeckx, «Mod. 058/9 - Modélisation physique du môle amont de l'écluse d'Auvelais,» Service Publique de Wallonie, 2016.
- [24] D. BOUSMAR et J.-M. HIVER, Mesures courantométriques sur modèle physique, Colloque SHF, 2009.
- [25] initiativesfleuves, «Le transport fluvio-maritime en période de Covid-19 : crise et opportunité ?,» initiativesfleuves, 11 05 2020. [En ligne].
Available: <https://www.initiativesfleuves.org/actualites/transport-fluvio-maritime-periode-de-covid-19-crise-opportunite/>. [Accès en 2020].

10 Annexes

10.2 Annexes du Chapitre État de l'art

10.2.1 Tableau des configurations modélisées par STOCKSTILL

Config.	Largeur rivière [m]	Largeur. avant-port [m]	Rapport AP	Ouverture totale [m ²]	Section trans. [m ²]	Rapport M
2	516	76,2	≈0,15	0	975,4	0
3	516	76,2	≈0,15	1463	975,4	1,5
4	516	76,2	≈0,15	877,8	975,4	0,9
5	516	76,2	≈0,15	585,2	975,4	0,6
6	516	76,2	≈0,15	390,1	975,4	0,4
7	516	76,2	≈0,15	585,2	975,4	0,6
8	516	76,2	≈0,15	1072,9	975,4	1,1
9	516	76,2	≈0,15	3218,7	975,4	3,3
10	516	76,2	≈0,15	1950,7	975,4	2
11	516	76,2	≈0,15	1268	975,4	1,3
12	516	76,2	≈0,15	877,8	975,4	0,9
13	516	76,2	≈0,15	1365,5	975,4	1,4
14	516	76,2	≈0,15	2340,9	975,4	2,4
15	516	76,2	≈0,15	682,8	975,4	0,7
16	516	76,2	≈0,15	1560,6	975,4	0,8
17	516	152,4	≈0,30	975,4	1950,7	0,5
18	516	152,4	≈0,30	585,2	1950,7	0,3
19	516	152,4	≈0,30	3511,3	1950,7	1,8
20	516	152,4	≈0,30	2145,8	1950,7	1,1
21	516	152,4	≈0,30	1365,5	1950,7	0,7
22	516	152,4	≈0,30	1170,4	1950,7	0,6
23	516	152,4	≈0,30	780,3	1950,7	0,4
24	516	152,4	≈0,30	390,1	1950,7	0,2
25	516	152,4	≈0,30	2535,9	1950,7	1,3
26	516	152,4	≈0,30	1560,6	1950,7	0,8
27	516	152,4	≈0,30	975,4	1950,7	0,5

Tableau 10-1 - Configurations modélisées par STOCKSTILL

10.3.2 Photos du modèle expérimentale



Figure 10-1 : Photo de l'automate



Figure 10-2 : Photo du modèle dans l'axe de l'écoulement



Figure 10-3 : Photo de l'ensemble du modèle expérimentale



Figure 10-4 : Photo d'une séance de mesure



Figure 10-5 : Photo des môles ajourés mobiles

10.3.3 Plans des supports de l'automate et de la passerelle

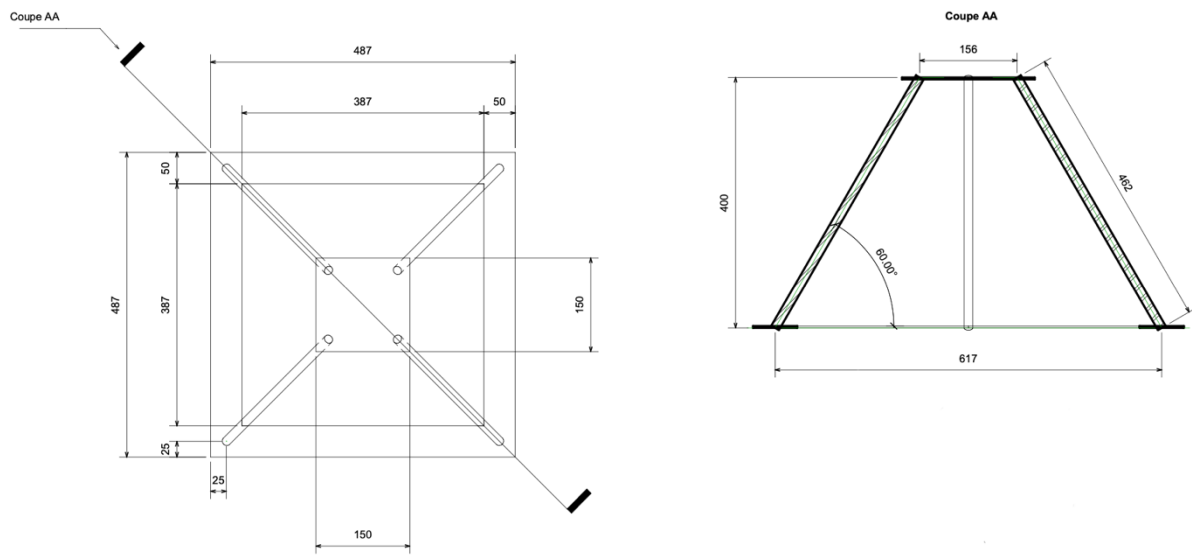


Figure 10-6 : Plan et coupe des supports de l'automate

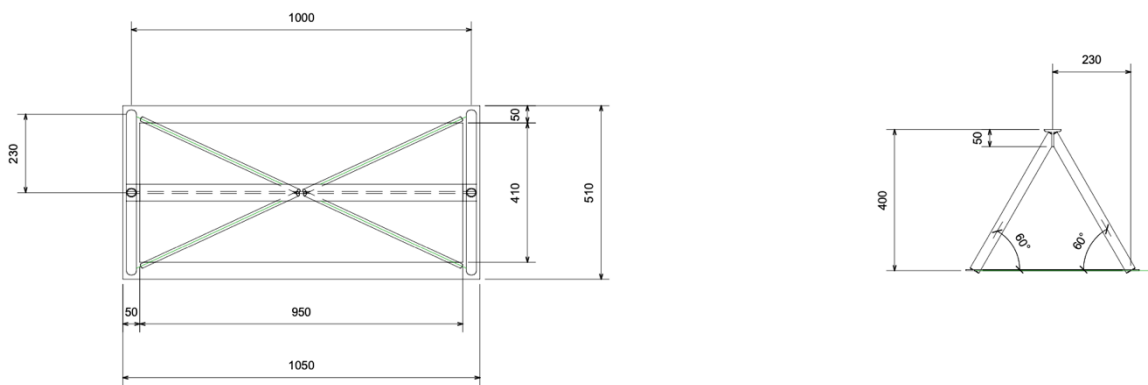


Figure 10-7 : Plan et coupe des supports de la passerelle amont

10.3.4 Planning de la modélisation physique

N°	Nom de l'essai	AP	M	Points validés	Durée ponctuelle	Durée totale	Date	Remarques
1	Test_Gros	1/2	1	115	25''		18/02/20	/Mesures V incohérentes
2	Test_Fin	1/2	1	278	30''		20/02/20	/Mesures U et V cohérentes
3	Ratio_0_5_Mole_R_1_Essai_verticales	1/2	1	41	5'		25/02/20	
4	AP050M100_05032020	1/2	1	1076	30''		05/03/20	/Mesures V incohérentes
5	AP050M100_07032020	1/2	1	2029	45''		07/03/20	/Mesures U incohérentes
6	AP050M100_10032020	1/2	1	2275	30''		10/03/20	/Erreur théodolite, fin de l'essai relancé le 11/03/20 /Mesures U et V incohérentes cohérentes /Dérive sonde dû à la durée
7	AP050M100_12032020	1/2	1	1137	30''		12/03/20	/Champ perturbé
8	AP050M100_13032020	1/2	1	1082	30''		13/03/20	/Mesures U et V cohérentes
9	AP050M100_16032020	1/2	1	983	30''		16/03/20	/ Mesures V incohérentes
10	AP050M100_10042020	1/2	1	1013	30''		10/04/20	/Changement de sonde /U et V cohérentes
11	AP050M100_14042020	1/2	1	1136	30''		14/04/20	/U et V cohérentes
12	AP050M100_16042020	1/2	1	1132	30''		16/04/20	/U et V cohérentes
13	AP050M033_27042020	1/2	1/3		30''		27/04/20	/U et V cohérentes
14	AP050M033_28042020	1/2	1/3		30''		28/04/20	/U et V cohérentes

Tableau 10-2 : Planning de la modélisation physique

10.3.5 Référencement des erreurs dues au théodolite

Nom de l'essai	Numéro de l'erreur	Points où est survenu l'erreur	Nombre de points entre 2 erreurs	Temps depuis le début de l'essai [s]	Temps entre 2 erreurs [s]
AP050M100_05032020	0	1075	1075	45074	45074
AP050M100_07032020	0	659	659	38249	38249
AP050M100_07032020	1	667	8	39368	1119
AP050M100_07032020	2	678	11	40486	1118
AP050M100_07032020	3	687	9	41593	1107
AP050M100_07032020	4	694	7	42292	699
AP050M100_07032020	5	699	5	43145	853
AP050M100_07032020	6	701	2	43520	375
AP050M100_07032020	7	712	11	44769	1249
AP050M100_07032020	8	720	8	46132	1363
AP050M100_07032020	9	723	3	46505	373
AP050M100_07032020	10	730	7	47286	781
AP050M100_07032020	11	738	8	48436	1150
AP050M100_07032020	12	740	2	48742	306
AP050M100_07032020	13	742	2	49360	618
AP050M100_07032020	14	744	2	49774	414
AP050M100_07032020	15	747	3	50293	519
AP050M100_07032020	16	750	3	50919	626
AP050M100_07032020	17	752	2	51275	356
AP050M100_07032020	18	758	6	52455	1180
AP050M100_07032020	19	772	14	53768	1313
AP050M100_07032020	20	778	6	54320	552
AP050M100_07032020	21	781	3	55213	893
AP050M100_07032020	22	785	4	55672	459
AP050M100_07032020	23	792	7	57687	2015
AP050M100_07032020	24	806	14	59011	1324
AP050M100_07032020	25	808	2	59499	488
AP050M100_07032020	26	814	6	60374	875
AP050M100_07032020	27	817	3	61198	824
AP050M100_07032020	28	819	2	62402	1204
AP050M100_07032020	29	821	2	62875	473
AP050M100_07032020	30	824	3	63478	603
AP050M100_07032020	31	828	4	63954	476
AP050M100_07032020	32	839	11	65174	1220
AP050M100_07032020	33	842	3	65629	455
AP050M100_07032020	34	845	3	66045	416
AP050M100_07032020	35	847	2	66536	491
AP050M100_07032020	36	856	9	67627	1091

AP050M100_07032020	37	865	9	68586	959
AP050M100_07032020	38	869	4	69188	602
AP050M100_07032020	39	870	1	69659	471
AP050M100_07032020	40	877	7	70845	1186
AP050M100_07032020	41	884	7	71909	1064
AP050M100_07032020	42	889	5	72732	823
AP050M100_07032020	43	892	3	73567	835
AP050M100_07032020	44	911	19	76235	2668
AP050M100_07032020	45	912	1	76554	319
AP050M100_07032020	46	923	11	78003	1449
AP050M100_07032020	47	926	3	78790	787
AP050M100_07032020	48	949	23	80933	2143
AP050M100_07032020	49	964	15	82848	1915
AP050M100_07032020	50	968	4	83293	445
AP050M100_07032020	51	970	2	83868	575
AP050M100_07032020	52	974	4	84630	762
AP050M100_07032020	53	989	15	86581	1951
AP050M100_07032020	54	1001	12	88271	1690
AP050M100_07032020	55	1004	3	88878	607
AP050M100_07032020	56	1015	11	90450	1572
AP050M100_07032020	57	1040	25	92695	2245
AP050M100_07032020	58	1046	6	93444	749
AP050M100_07032020	59	1048	2	93983	539
AP050M100_07032020	60	1051	3	94525	542
AP050M100_07032020	61	1053	2	94862	337
AP050M100_07032020	62	1059	6	95609	747
AP050M100_07032020	63	1074	15	166290	70681
AP050M100_10032020	0	1144	1144	47963	47963
AP050M100_10032020	1	1145	1	89414	41451
AP050M100_10032020	2	2274	1129	137000	47586
AP050M100_12032020	0	1136	1136	47920	47920
AP050M100_13032020	0	929	929	39963	39963
AP050M100_10042020	0	1012	1012	42642	42642
AP050M100_14042020	0	1136	1136	47993	47993
AP050M100_16042020	0	1131	1131	47720	47720
AP050M033_27042020	0	1130	1130	47440	47440
AP050M033_28042020	0	1135	1135	47775	47775

Tableau 10-3 : Référencement des erreurs dues au théodolite

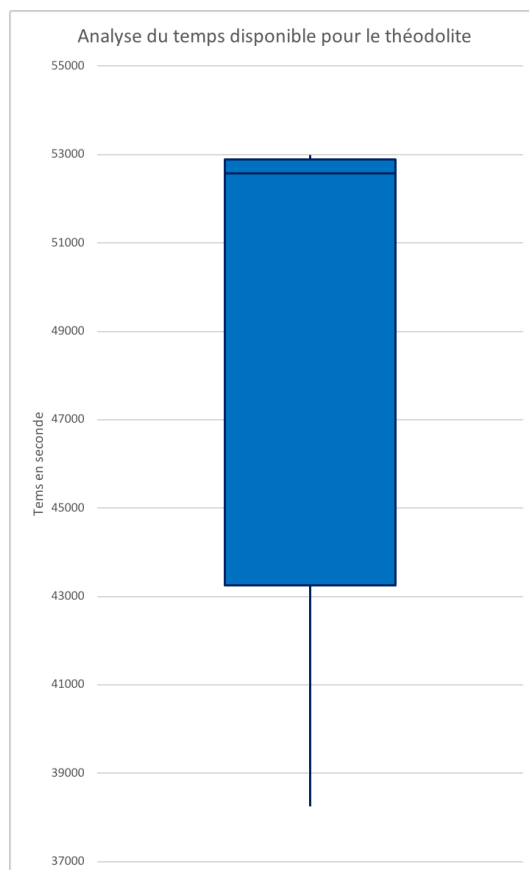


Tableau 10-4 : Analyse statistique du temps de théodolite disponible

10.3.6 Validation des essais à partir du débit

Essai	Débit calculé	Validité
Test_fin	120,33	OK
AP050M100_05032020	120,06	OK
AP050M100_07032020	216,54	NOK
AP050M100_10032020_1	90,14	NOK
AP050M100_10032020_2	144,22	NOK
AP050M100_12032020	104,85	NOK
AP050M100_13032020	150,19	NOK
AP050M100_16032020	110	NOK
AP050M100_10042020	121,61	OK
AP050M100_14042020	121,37	OK
AP050M100_16042020	120,66	OK
AP050M033_27042020	119,61	OK
AP050M033_28042020	120,27	OK

Tableau 10-5 : Validations des essais à partir du débit

10.3.7 Moyennes glissantes et écart-types calculés

#	Vx_30	ECx_30	Vx_60	ECx_60	Vx_120	ECx_120	Vx_300	ECx_300	Vy_30	ECy_30	Vy_60	ECy_60	Vy_120	ECy_120	Vy_300	ECy_300
0	0.193	0.005	0.194	0.003	0.193	0.004	0.192	0	0.827	0.010	0.826	0.006	0.826	0.007	0.827	0
1	0.231	0.003	0.231	0.003	0.231	0.003	0.231	0	0.314	0.003	0.314	0.002	0.314	0.003	0.313	0
2	0.229	0.004	0.229	0.002	0.229	0.003	0.228	0	0.246	0.004	0.246	0.002	0.246	0.003	0.246	0
3	0.223	0.004	0.223	0.003	0.223	0.004	0.223	0	0.227	0.003	0.227	0.001	0.227	0.002	0.227	0
4	0.217	0.004	0.217	0.002	0.217	0.003	0.217	0	0.216	0.003	0.216	0.001	0.216	0.002	0.216	0
5	0.217	0.003	0.217	0.002	0.217	0.002	0.218	0	0.212	0.004	0.212	0.003	0.212	0.003	0.212	0
6	0.213	0.004	0.213	0.003	0.213	0.003	0.213	0	0.210	0.003	0.210	0.002	0.210	0.003	0.209	0
7	0.213	0.004	0.214	0.002	0.214	0.003	0.213	0	0.206	0.004	0.207	0.003	0.206	0.003	0.207	0
8	0.216	0.003	0.216	0.002	0.216	0.002	0.216	0	0.204	0.003	0.204	0.002	0.204	0.003	0.204	0
9	0.214	0.002	0.214	0.001	0.214	0.002	0.214	0	0.196	0.002	0.196	0.001	0.196	0.002	0.196	0
11	0.099	0.007	0.099	0.005	0.099	0.006	0.099	0	0.312	0.008	0.312	0.005	0.312	0.006	0.313	0
12	0.107	0.004	0.107	0.002	0.107	0.003	0.107	0	0.182	0.003	0.181	0.002	0.182	0.002	0.181	0
13	0.104	0.006	0.103	0.005	0.103	0.005	0.104	0	0.144	0.003	0.143	0.002	0.143	0.002	0.144	0
14	0.104	0.004	0.104	0.003	0.104	0.003	0.104	0	0.133	0.003	0.133	0.002	0.133	0.002	0.133	0
15	0.100	0.005	0.100	0.003	0.100	0.004	0.099	0	0.122	0.004	0.122	0.003	0.122	0.003	0.122	0
16	0.097	0.003	0.097	0.002	0.097	0.002	0.097	0	0.120	0.003	0.120	0.002	0.120	0.002	0.120	0
17	0.089	0.005	0.089	0.004	0.089	0.004	0.090	0	0.115	0.004	0.115	0.003	0.115	0.003	0.115	0
18	0.083	0.009	0.082	0.006	0.082	0.007	0.083	0	0.113	0.003	0.113	0.002	0.113	0.002	0.113	0
19	0.074	0.006	0.074	0.005	0.074	0.005	0.073	0	0.111	0.003	0.111	0.002	0.111	0.002	0.111	0
20	0.051	0.006	0.051	0.003	0.051	0.004	0.052	0	0.102	0.004	0.102	0.003	0.102	0.003	0.102	0
21	0.192	0.003	0.192	0.002	0.192	0.002	0.192	0	0.232	0.004	0.232	0.003	0.232	0.004	0.232	0
22	0.195	0.005	0.194	0.004	0.194	0.005	0.195	0	0.096	0.001	0.096	0.001	0.096	0.001	0.097	0
23	0.196	0.004	0.196	0.003	0.196	0.003	0.196	0	0.065	0.002	0.065	0.001	0.065	0.001	0.065	0
24	0.189	0.003	0.189	0.002	0.189	0.003	0.189	0	0.046	0.001	0.046	0.001	0.046	0.001	0.046	0
25	0.182	0.005	0.182	0.003	0.182	0.004	0.182	0	0.037	0.002	0.037	0.001	0.037	0.001	0.037	0
26	0.176	0.004	0.175	0.003	0.175	0.003	0.176	0	0.031	0.002	0.031	0.001	0.031	0.001	0.031	0
27	0.169	0.007	0.170	0.005	0.170	0.006	0.169	0	0.026	0.002	0.026	0.001	0.026	0.002	0.026	0
28	0.158	0.005	0.158	0.003	0.158	0.004	0.159	0	0.021	0.001	0.021	0.001	0.021	0.001	0.022	0
29	0.144	0.005	0.143	0.004	0.143	0.004	0.145	0	0.018	0.002	0.018	0.002	0.018	0.002	0.018	0
30	0.118	0.002	0.118	0.002	0.118	0.002	0.118	0	0.010	0.001	0.010	0.001	0.010	0.001	0.010	0
31	0.214	0.003	0.214	0.002	0.214	0.002	0.215	0	-0.038	0.001	-0.038	0.001	-0.038	0.001	-0.038	0
32	0.212	0.005	0.212	0.003	0.212	0.004	0.213	0	-0.037	0.002	-0.037	0.001	-0.037	0.001	-0.038	0
33	0.213	0.003	0.213	0.003	0.213	0.003	0.213	0	-0.038	0.002	-0.038	0.001	-0.038	0.002	-0.038	0
34	0.211	0.004	0.212	0.003	0.212	0.004	0.211	0	-0.038	0.003	-0.039	0.002	-0.039	0.002	-0.038	0
35	0.203	0.004	0.204	0.002	0.204	0.003	0.203	0	-0.036	0.003	-0.036	0.002	-0.036	0.002	-0.036	0
36	0.196	0.005	0.195	0.002	0.195	0.003	0.196	0	-0.039	0.001	-0.039	0.000	-0.039	0.001	-0.039	0
37	0.188	0.004	0.189	0.003	0.188	0.004	0.188	0	-0.037	0.002	-0.037	0.001	-0.037	0.002	-0.037	0
38	0.182	0.005	0.182	0.004	0.182	0.004	0.182	0	-0.037	0.001	-0.037	0.001	-0.037	0.001	-0.037	0
39	0.170	0.003	0.169	0.002	0.170	0.002	0.170	0	-0.039	0.002	-0.039	0.001	-0.039	0.001	-0.039	0
40	0.143	0.004	0.143	0.003	0.143	0.003	0.144	0	-0.039	0.001	-0.039	0.001	-0.039	0.001	-0.039	0

Tableau 10-6 : Valeurs moyennes et écart-types calculés

10.3.8 Résultats des essais AP050M100 avec l'ancienne sonde

AP050M100_05032020 : Boucle n°0 rotation sonde = 0

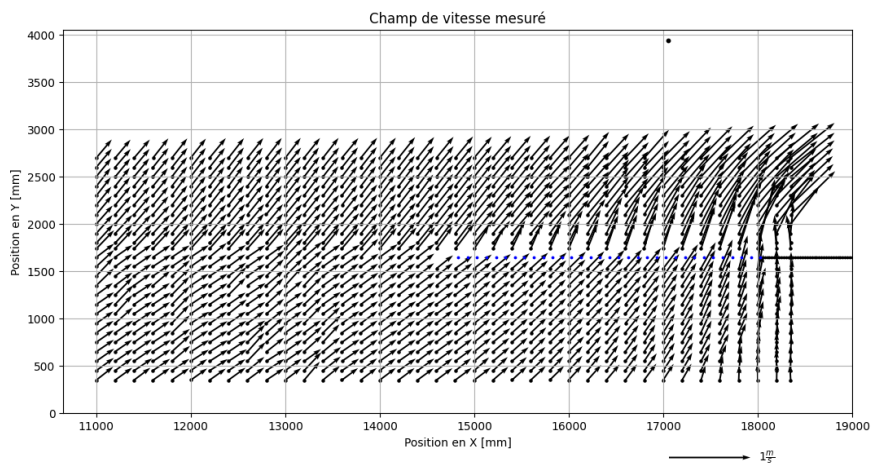


Figure 10-8 : Champ de vitesse mesuré I - AP050M100 - 05/03/20

AP050M100_07032020 : Boucle n°0 rotation sonde = 90

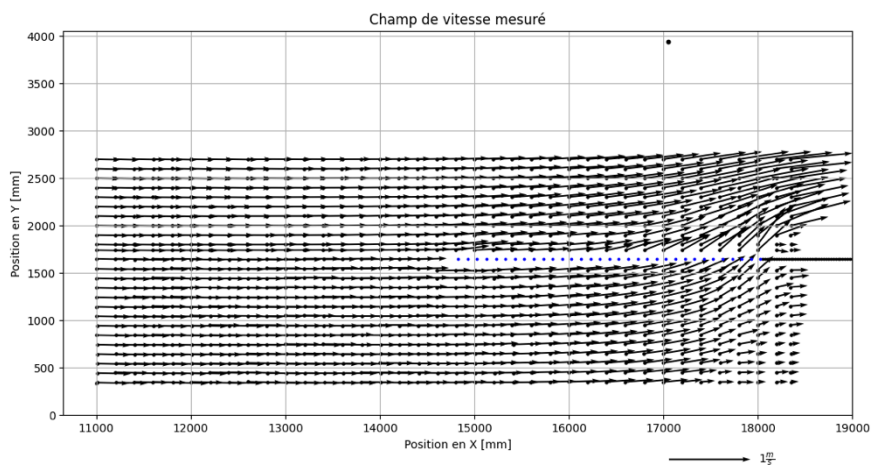


Figure 10-9 : Champ de vitesse mesuré I - AP050M100 - 07/03/20

AP050M100_12032020 : Boucle n°0 rotation sonde = 0

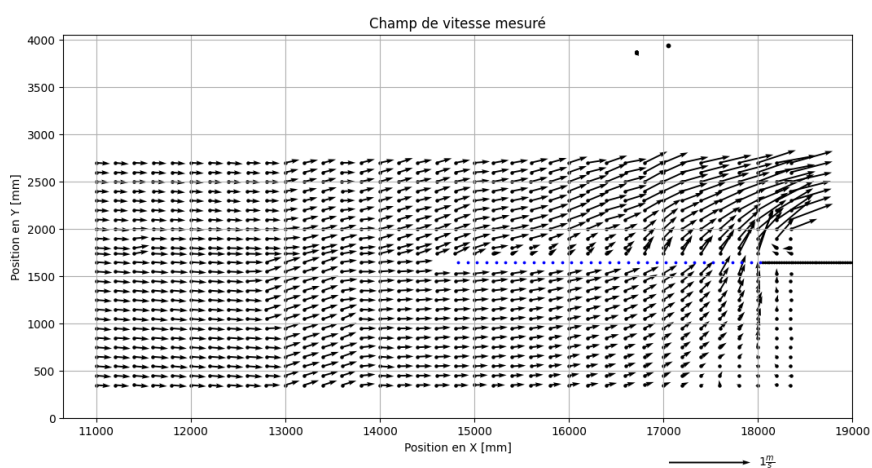


Figure 10-10 : Champ de vitesse mesuré I - AP050M100 - 12/03/20

10.3.9 Résultats des essais avec la nouvelle sonde

Essai : AP050M100_14042020 | Rotation de la sonde = 90.0

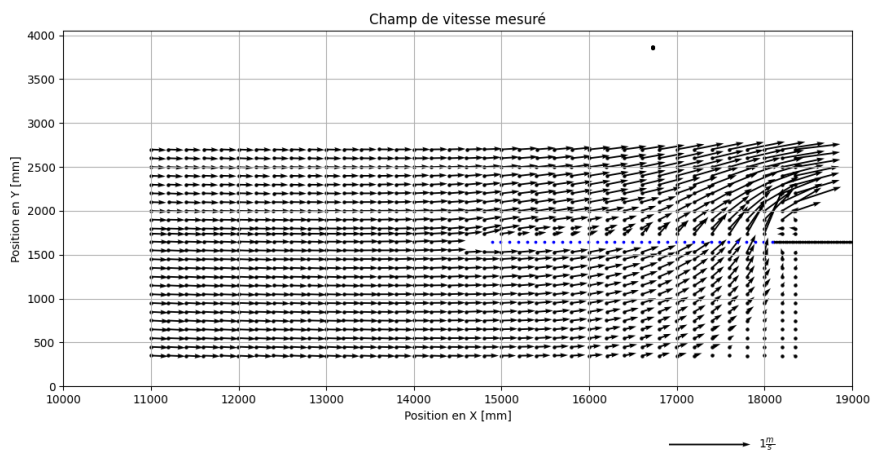


Figure 10-11 : Champ de vitesse mesuré I - AP050M100 - 14/04/20

Essai : AP050M100_16042020 | Rotation de la sonde = 0.0

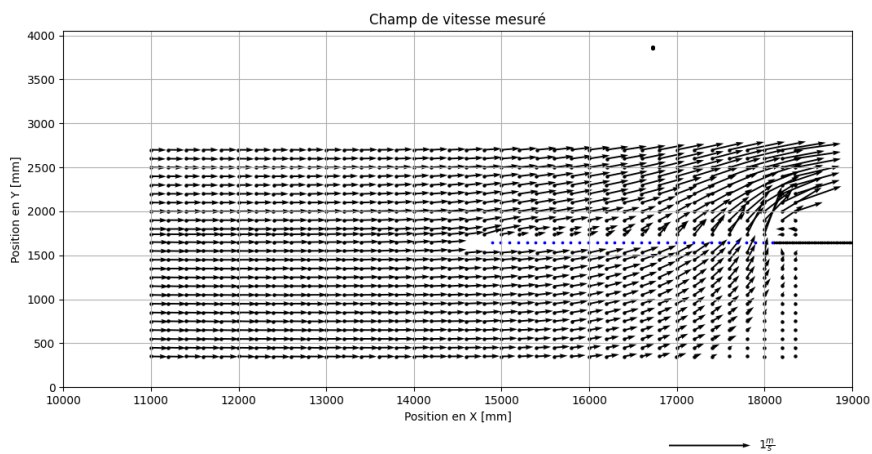


Figure 10-12 : Champ de vitesse mesuré I - AP050M100 - 16/04/20

Essai : AP050M033_28042020 | Rotation de la sonde = 90.0

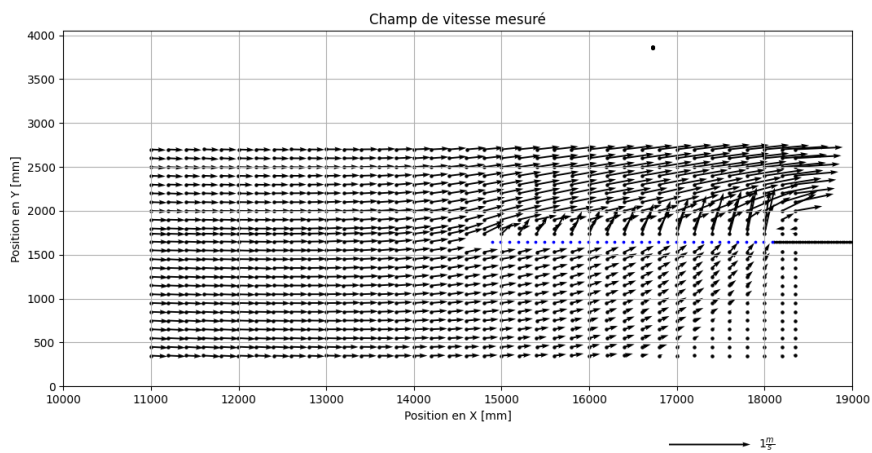


Figure 10-13 : Champ de vitesse mesuré I - AP050M033 - 28/04/20

10.4 Annexes du Chapitre Modélisation numérique

10.4.1 Exemple de steering file pour la configuration AP050M100

```
1. /-----
2. / TELEMAC2D Version v8p1
3. / AP050M100
4. / 2020
5. / PIERARD Geoffrey
6. /-----
7.
8. /-----
9. / INPUT-OUTPUT, FILES
10. /-----
11.
12. STEERING FILE           ='cas_AP050M100_k-eps_n_1E-2.cas'
13. GEOMETRY FILE          ='AP050M100_slf.slf'
14. BOUNDARY CONDITIONS FILE ='AP050M100_mesh_BC.cli'
15. RESULTS FILE           ='AP050M100_k-eps_n_1E-2_Results.slf'
16.
17. /-----
18. / INPUT-OUTPUT, GRAPHICS AND LISTING
19. /-----
20.
21. VARIABLES FOR GRAPHIC PRINTOUTS =U,V,S,B,H,Q,M,L
22. INFORMATION ABOUT SOLVER        =YES
23. LISTING PRINTOUT PERIOD         =200
24. GRAPHIC PRINTOUT PERIOD        =200
25. MASS-BALANCE                   =YES
26. COMPATIBLE COMPUTATION OF FLUXES =YES
27. PRINTING CUMULATED FLOWRATES    =YES
28.
29. /-----
30. / OPTIONS FOR THE SIMULATION
31. /-----
32.
33. TITLE                       ='SIMULATED WITH TELEMAC2D : AP050M100'
34. TIME STEP                   =0.005
35. /VARIABLE TIME-STEP         =YES
36. /DESIRED COURANT NUMBER      =1
37. DURATION                     =600
38.
39. /-----
40. / EQUATIONS, PHYSICAL PARAMETERS
41. /-----
42.
43. LAW OF BOTTOM FRICTION        =4      /Manning
44. FRICTION COEFFICIENT         =0.013
45. LAW OF FRICTION ON LATERAL BOUNDARIES =4      /Manning
46. ROUGHNESS COEFFICIENT OF BOUNDARIES =0.01
47. /TURBULENCE MODEL           =1      /Visc cste
48. /VELOCITY DIFFUSIVITY       =1.E1
49. TURBULENCE MODEL            =3      /K-Epsilon
50. TURBULENCE REGIME FOR SOLID BOUNDARIES =2
51. INFORMATION ABOUT K-EPSILON MODEL =YES
52.
```

```
53.
54. /-----
55. / EQUATIONS, INITIAL CONDITIONS
56. /-----
57.
58. INITIAL CONDITIONS      ='CONSTANT ELEVATION'
59. INITIAL ELEVATION      =0.15
60.
61. /-----
62. / EQUATIONS, BOUNDARY CONDITIONS
63. /-----
64.
65. /VELOCITY PROFILES      =1;4
66. VELOCITY PROFILES      =1;1
67. PRESCRIBED FLOWRATES    =0.0;0.12
68. PRESCRIBED ELEVATIONS  =0.15;0.15
69. OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =2;2 /Thomson method p.31 manual
70. /OPTION FOR LIQUID BOUNDARIES =1;1 /Strong method
71.
72. /-----
73. / NUMERICAL PARAMETERS
74. /-----
75.
76. MATRIX STORAGE          =3 /Edge-based storage method
77. SOLVER                   =1
78. SOLVER ACCURACY         =1.E-6
79. MAXIMUM NUMBER OF ITERATIONS FOR SOLVER =30
80. TREATMENT OF THE LINEAR SYSTEM =2
81. MASS-LUMPING ON H       =0.8
82. MASS-LUMPING ON VELOCITY =0.8
83. CONTINUITY CORRECTION   =YES
```

Les autres **steering files** pour les 29 autres configurations sont joints dans une annexe numérique disponible au *Service Publique de Wallonie*.

10.4.2 Comparaison des vitesses calculés avec mesure sur modèle physique -AP050M100

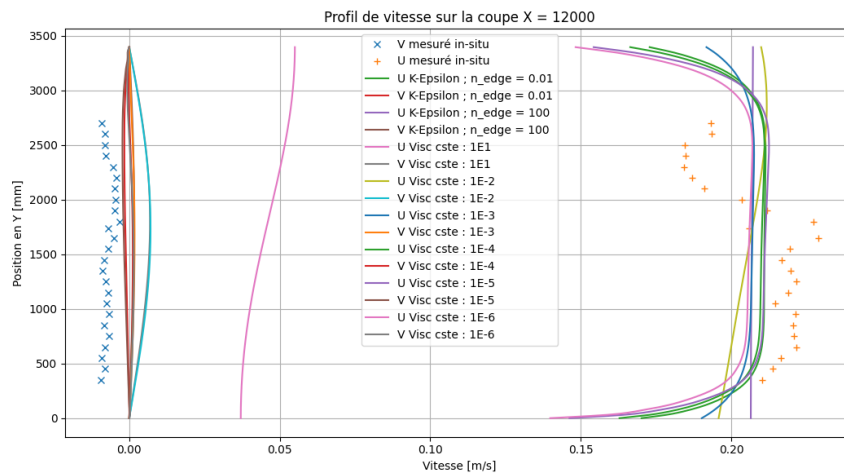


Figure 10-14 : Comparaison des vitesses sur la coupe longitudinale X=12000 [mm] – AP050M100

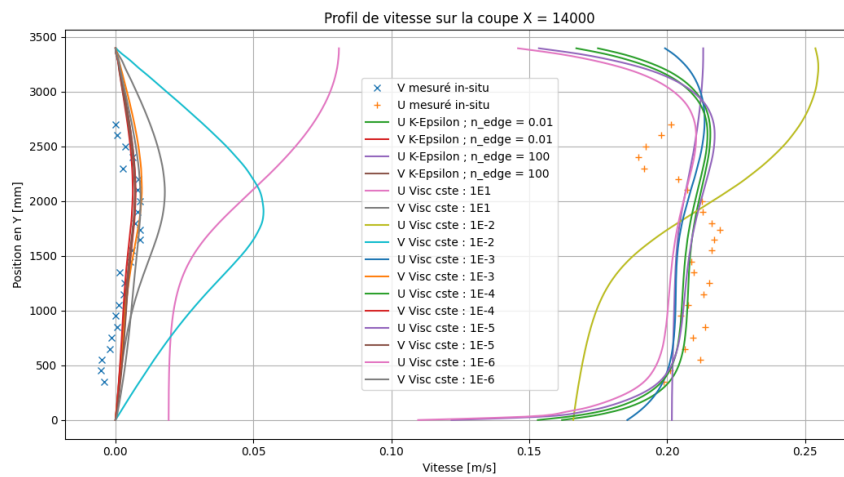


Figure 10-15 : Comparaison des vitesses sur la coupe longitudinale X = 14000 [mm] – AP050M100

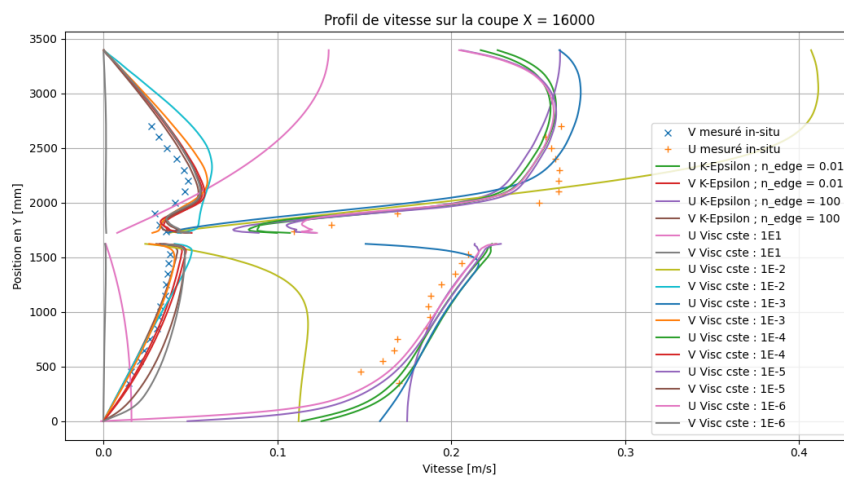


Figure 10-16 : Comparaison des vitesses sur la coupe longitudinale X = 16000 [mm] – AP050M100

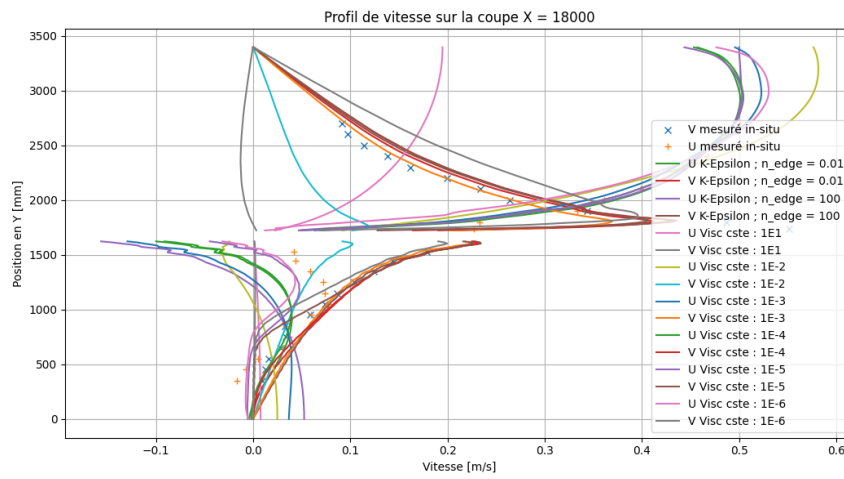


Figure 10-17 : Comparaison des vitesses sur la coupe longitudinale X = 18000 [mm] – AP050M100

10.4.1 Comparaison des vitesses calculés avec mesure sur modèle physique -AP050M033

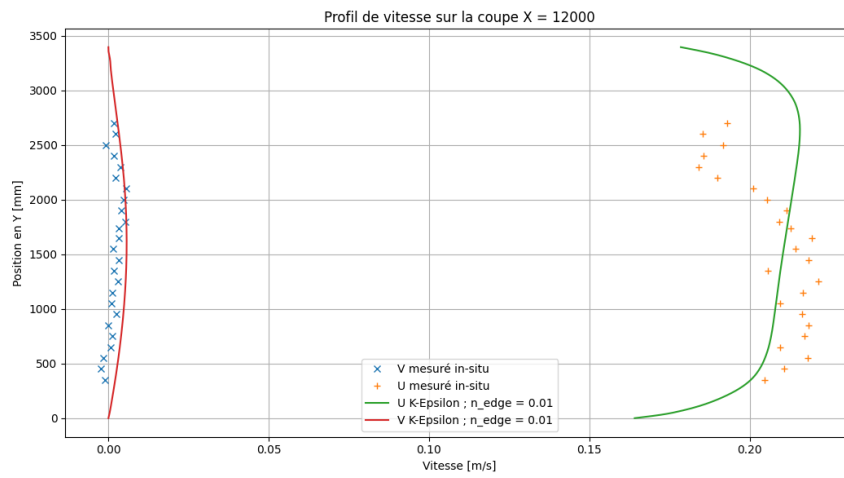


Figure 10-18 : Comparaison des vitesses sur la coupe longitudinale X = 12000 [mm] – AP050M033

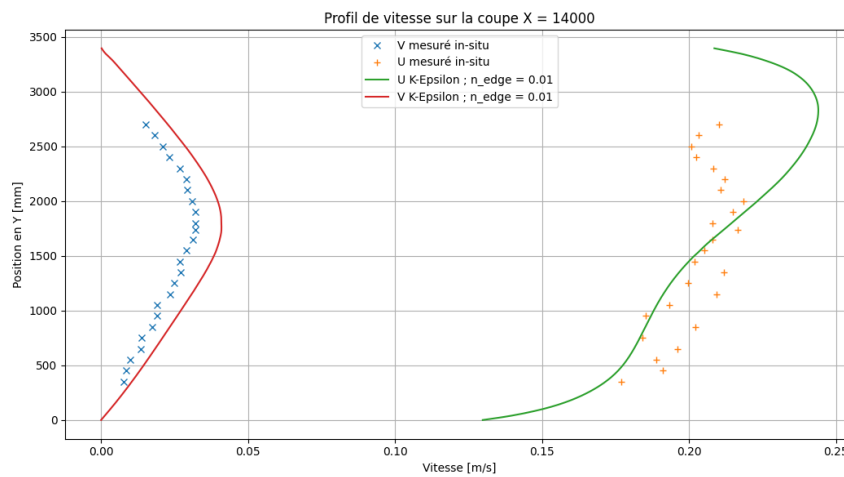


Figure 10-19 : Comparaison des vitesses sur la coupe longitudinale X = 14000 [mm] – AP050M033

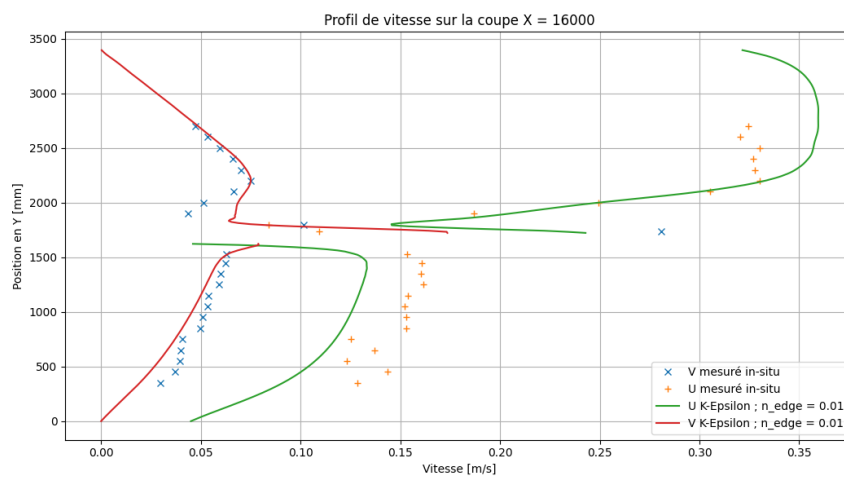


Figure 10-20 : Comparaison des vitesses sur la coupe longitudinale X = 16000 [mm] – AP050M033

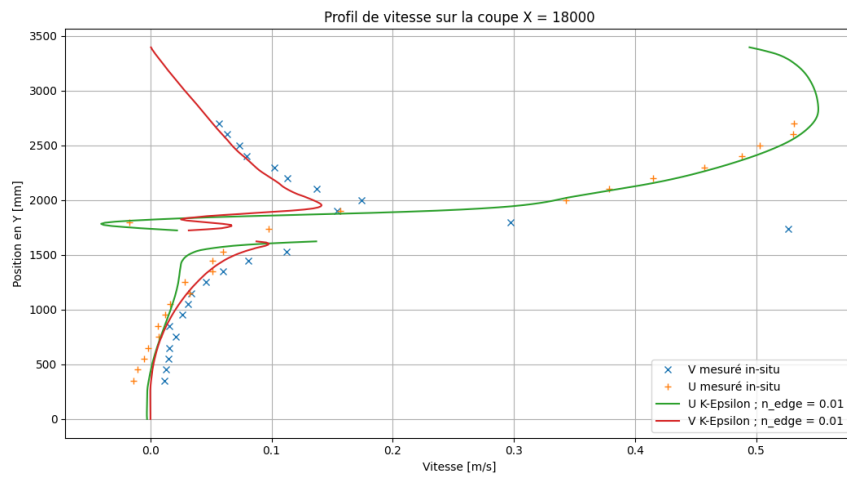


Figure 10-21 : Comparaison des vitesses sur la coupe longitudinale X = 18000 [mm] – AP050M033

10.5 Annexes du Chapitre Analyse des vitesses

10.5.1 Affichage des champs de vitesses

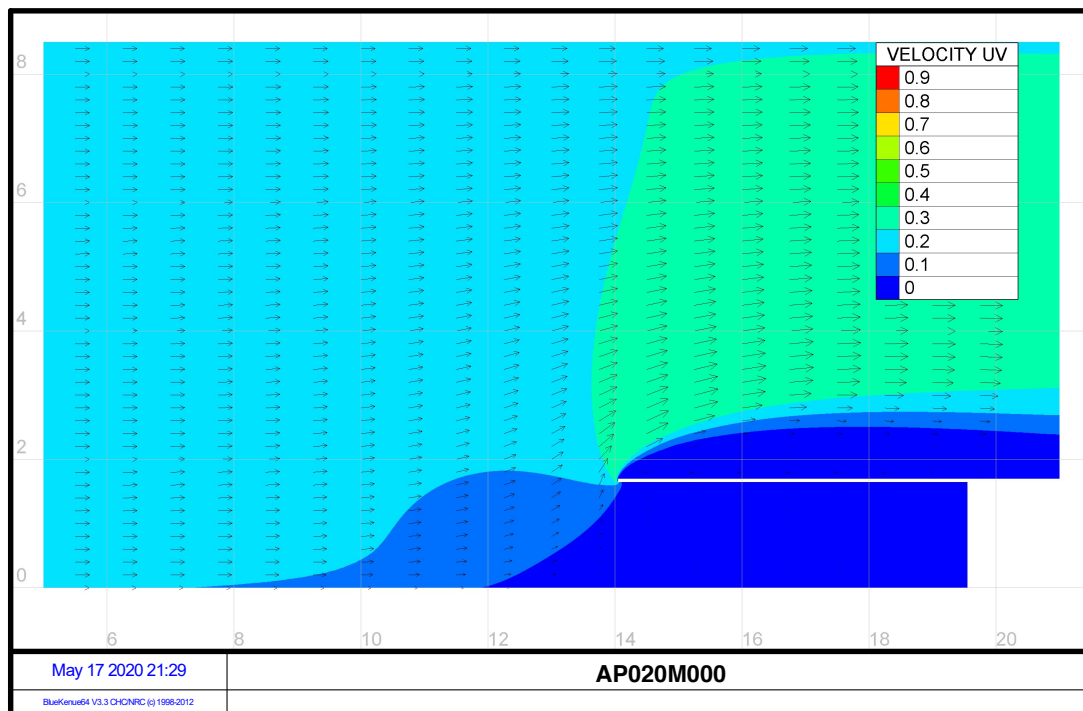


Figure 10-22 : Champ de vitesses - AP020M000

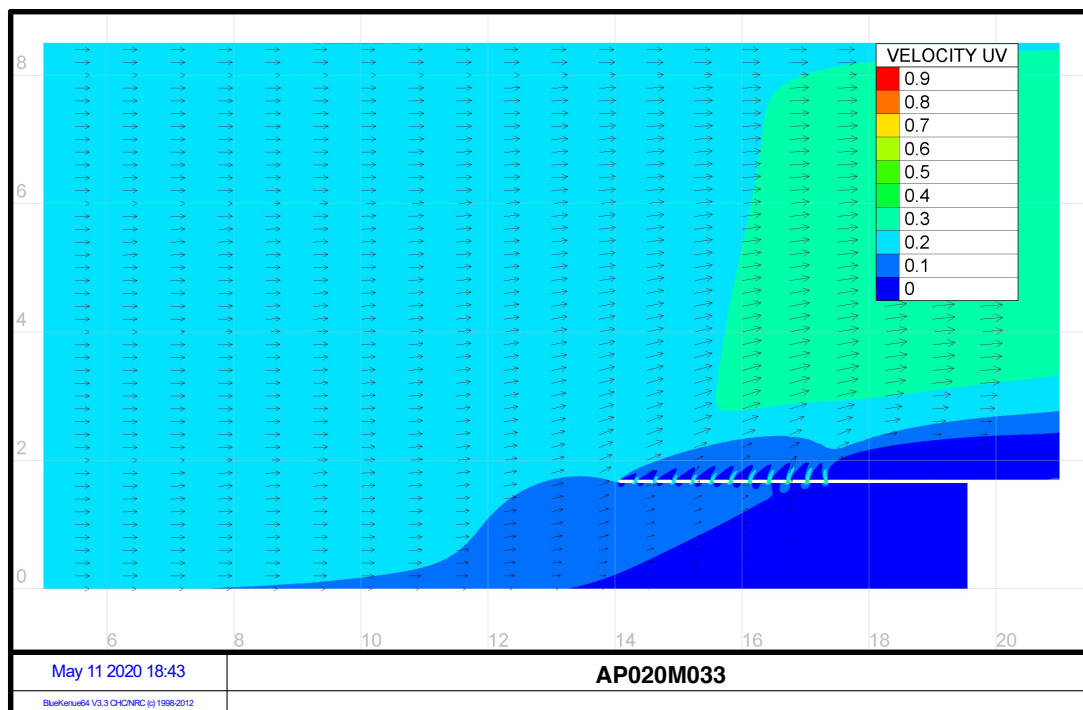


Figure 10-23 : Champ de vitesses - AP020M033

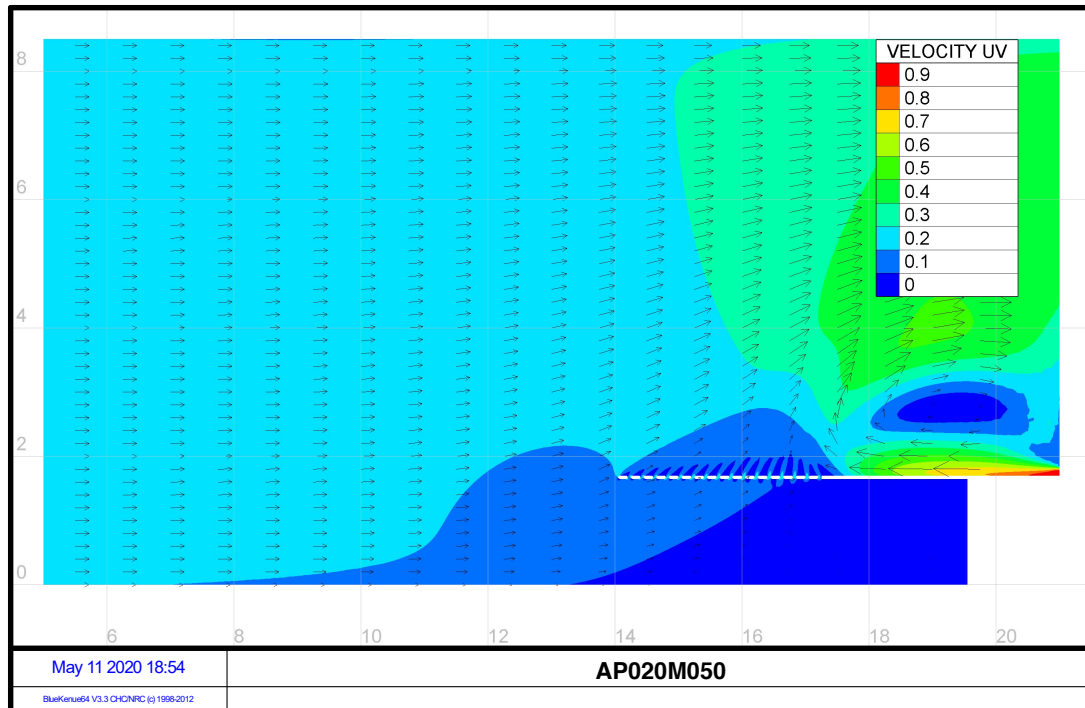


Figure 10-24 : Champ de vitesses - AP020M050

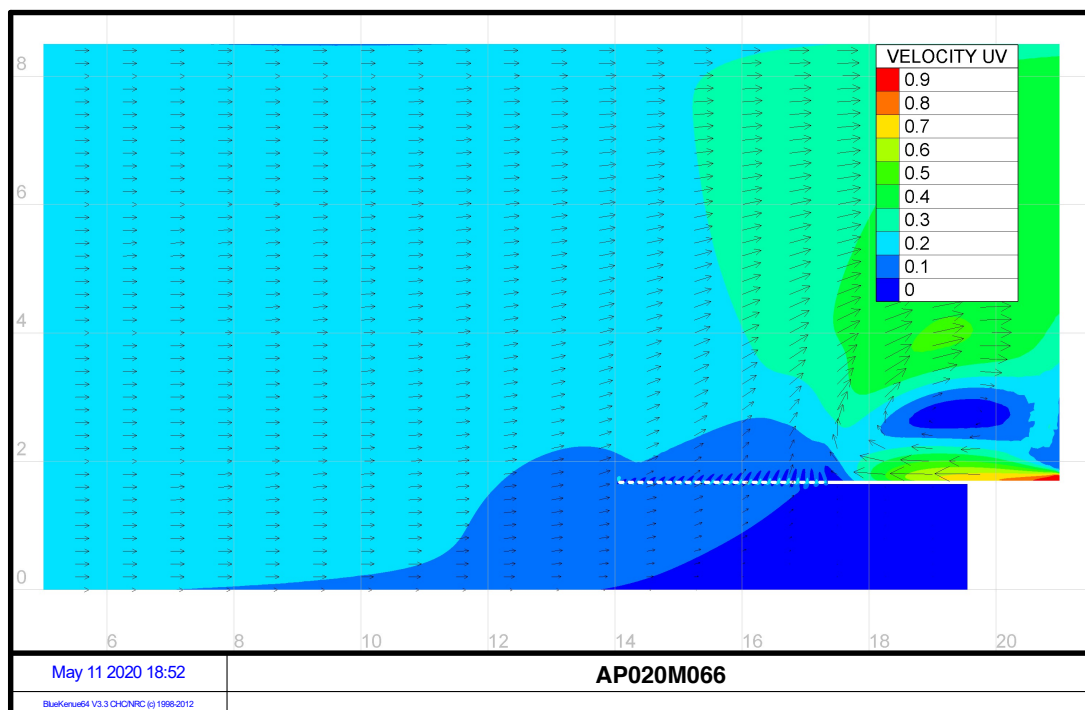


Figure 10-25 : Champ de vitesses - AP020M066

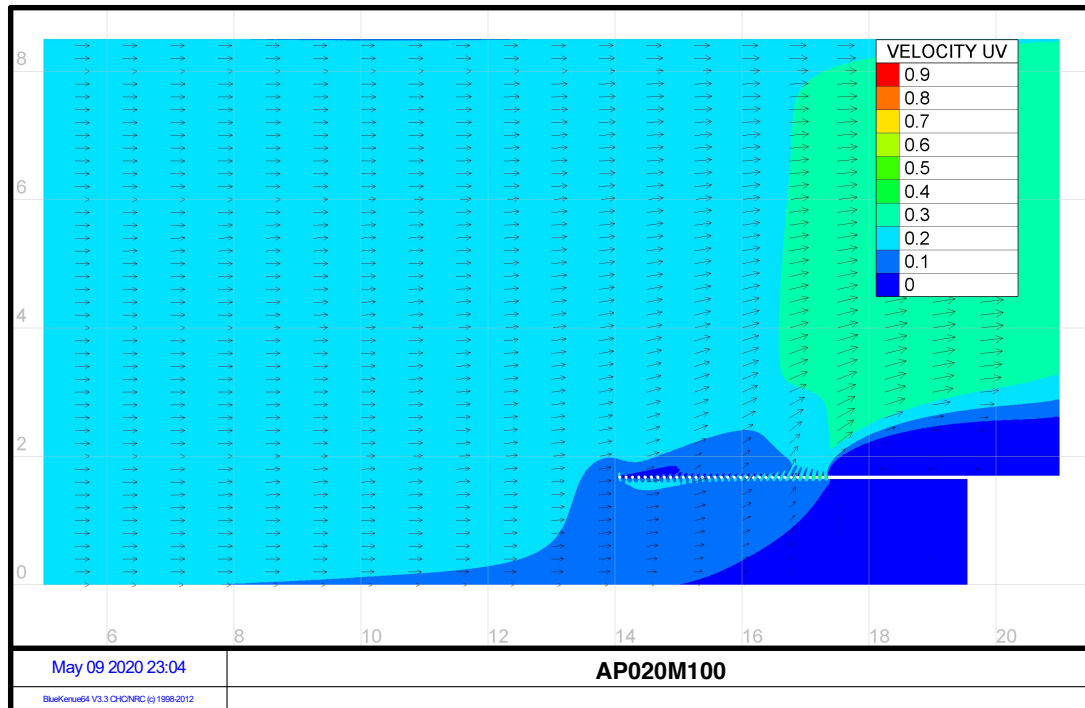


Figure 10-26 : Champ de vitesses - AP020M100

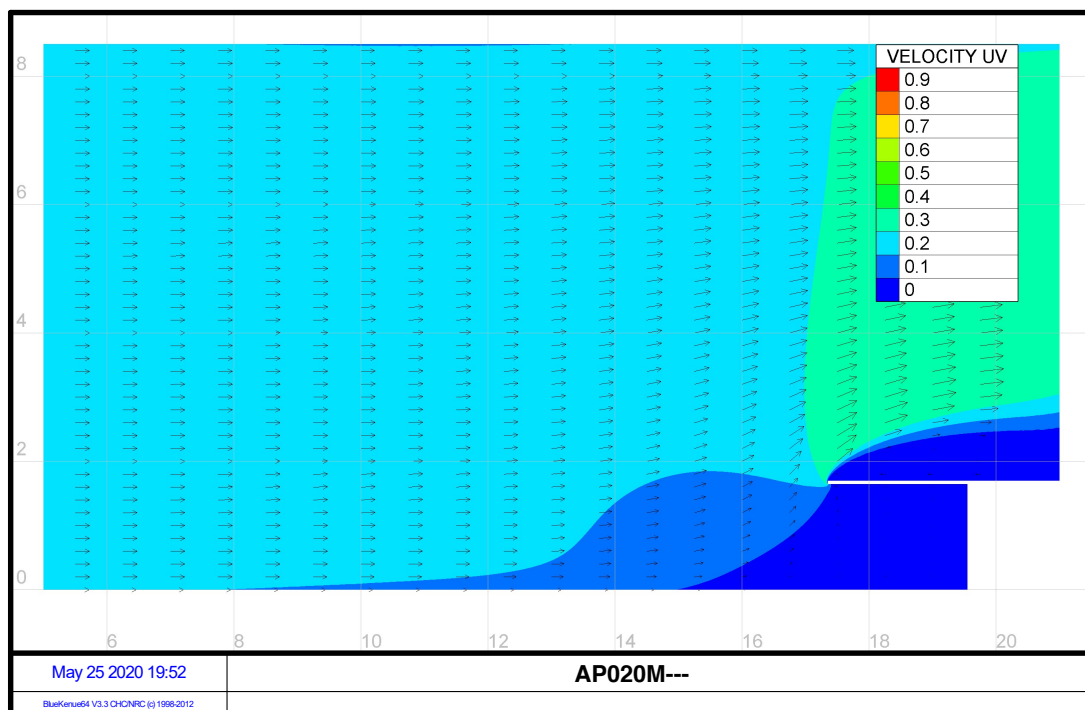


Figure 10-27 : Champ de vitesses - AP020M---

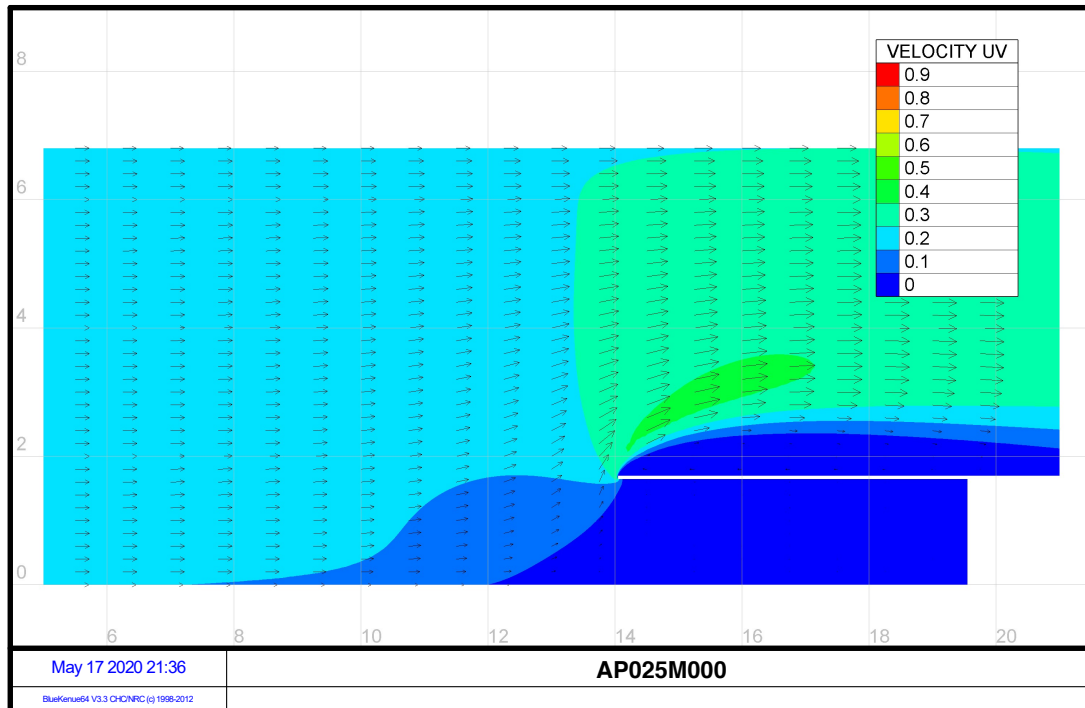


Figure 10-28 : Champ de vitesses - AP025M000

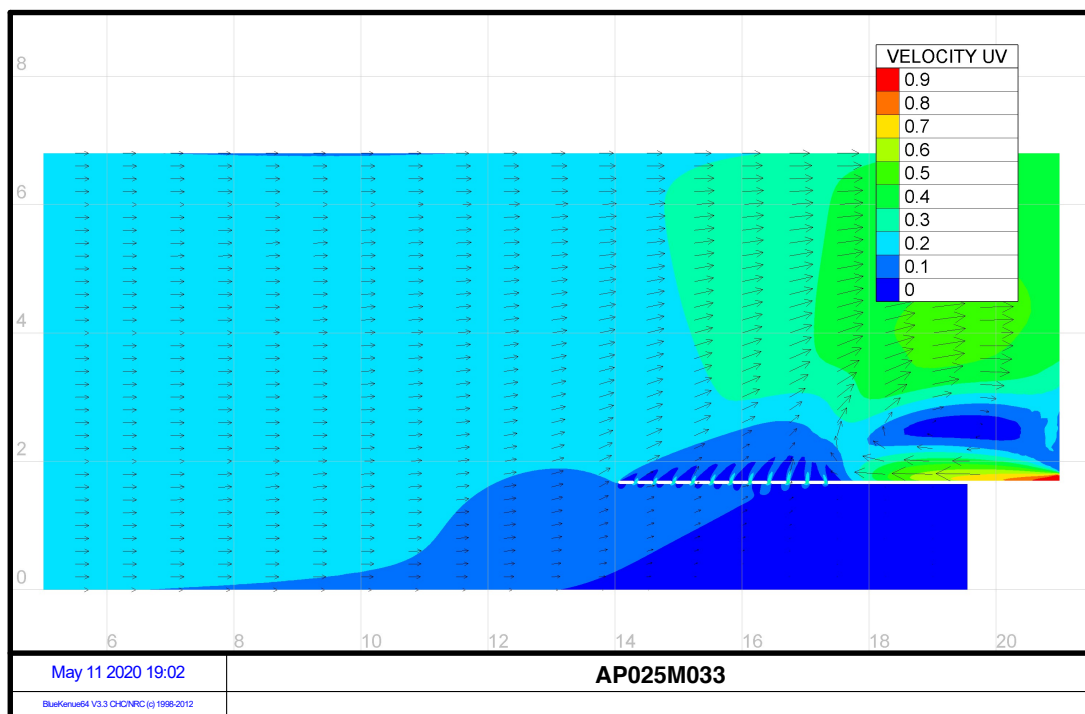


Figure 10-29 : Champ de vitesses - AP025M033

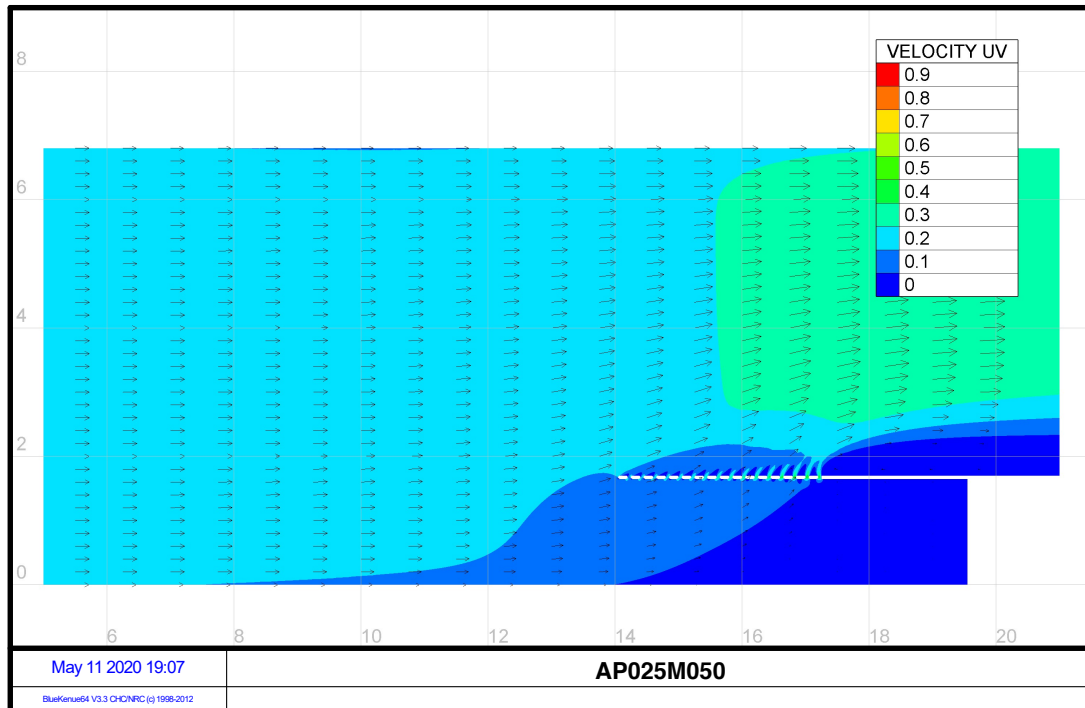


Figure 10-30 : Champ de vitesses - AP025M050

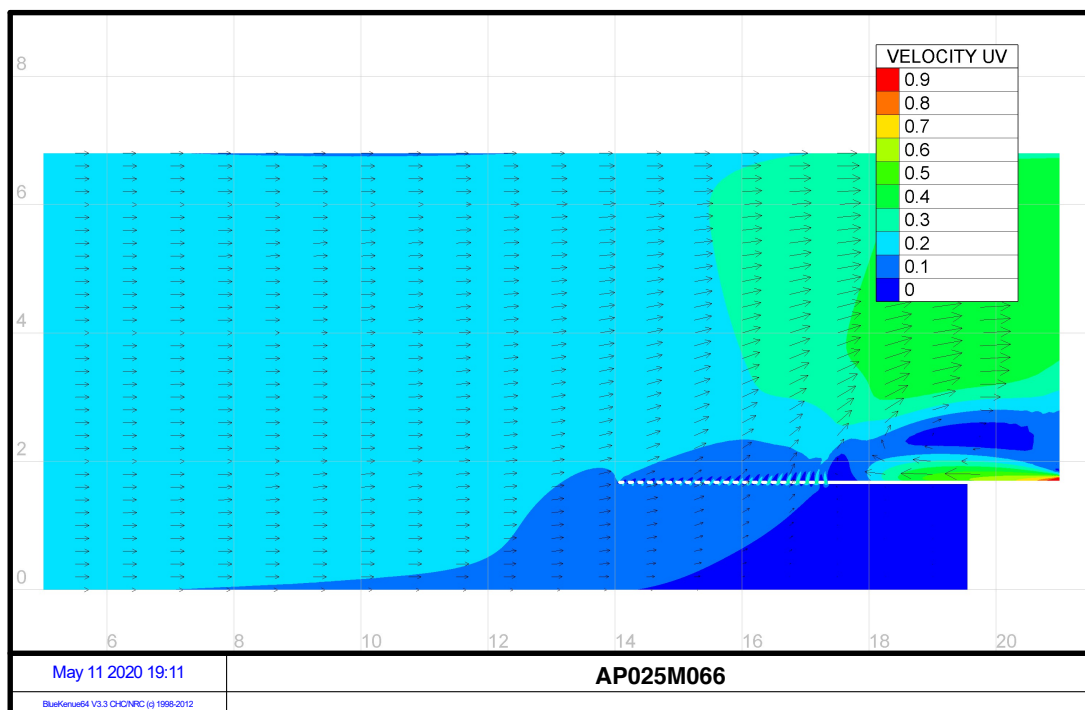


Figure 10-31 : Champ de vitesses - AP025M066

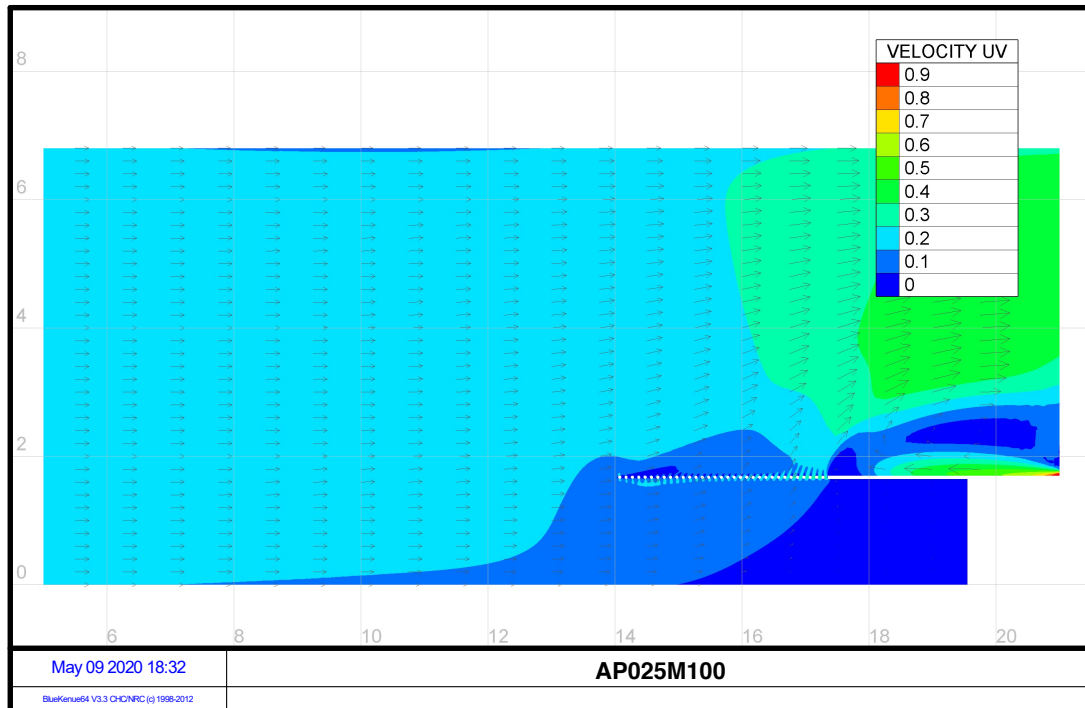


Figure 10-32 : Champ de vitesses - AP025M100

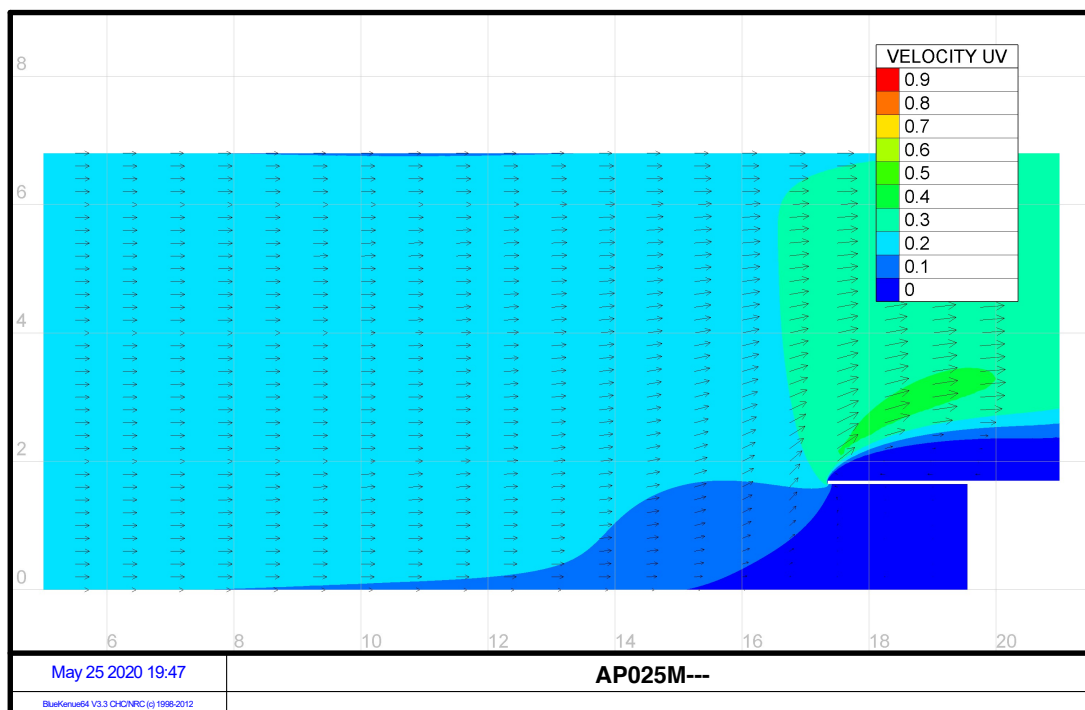


Figure 10-33 : Champ de vitesses - AP025M---

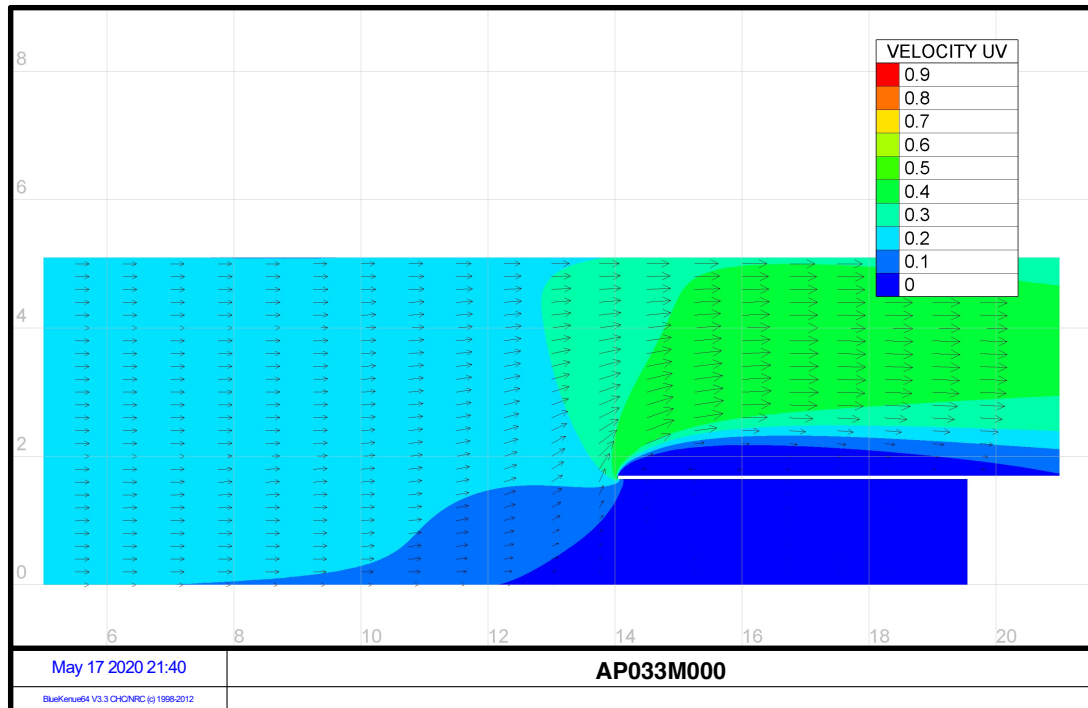


Figure 10-34 : Champ de vitesses - AP033M000

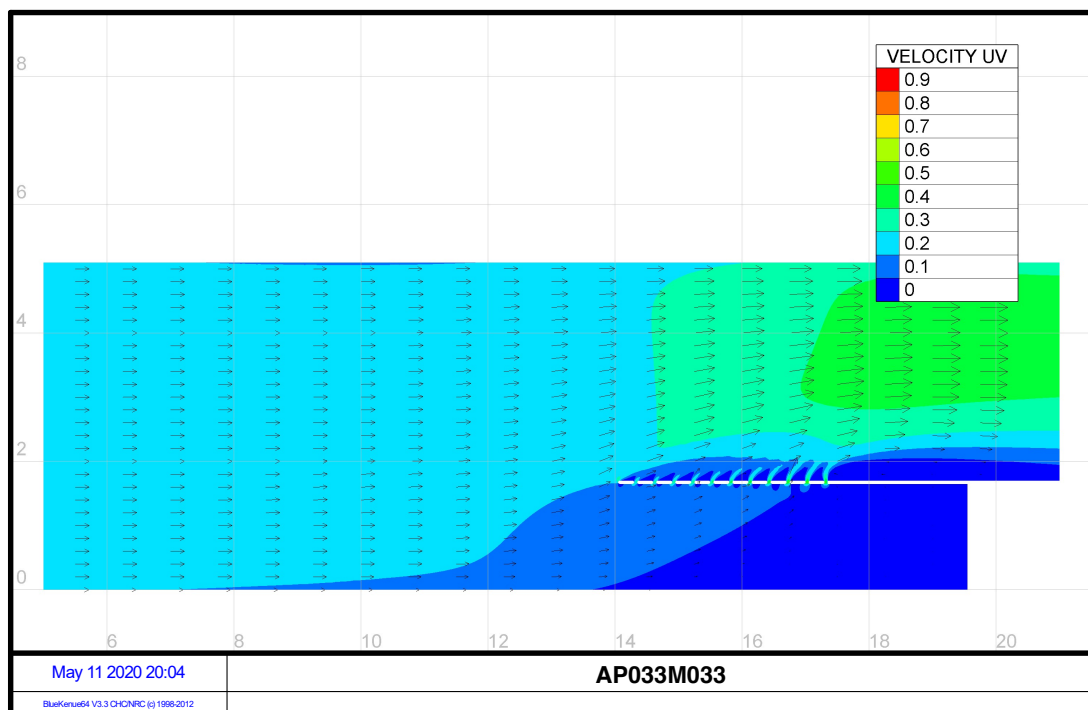


Figure 10-35 : Champ de vitesses - AP033M033

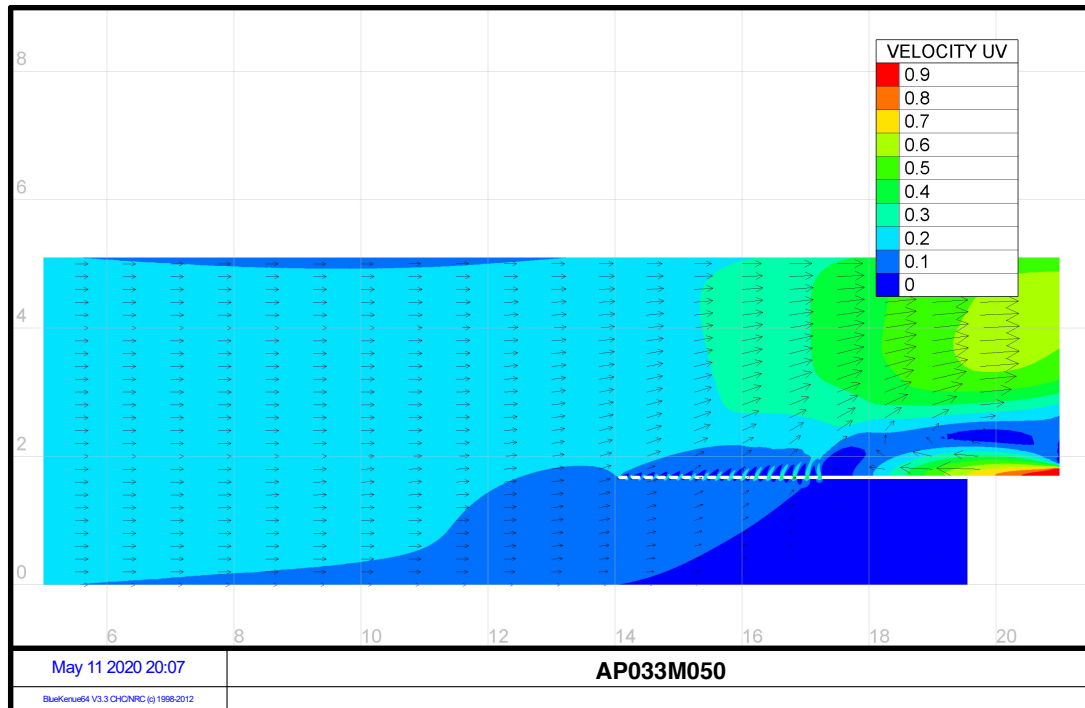


Figure 10-36 : Champ de vitesses - AP033M050

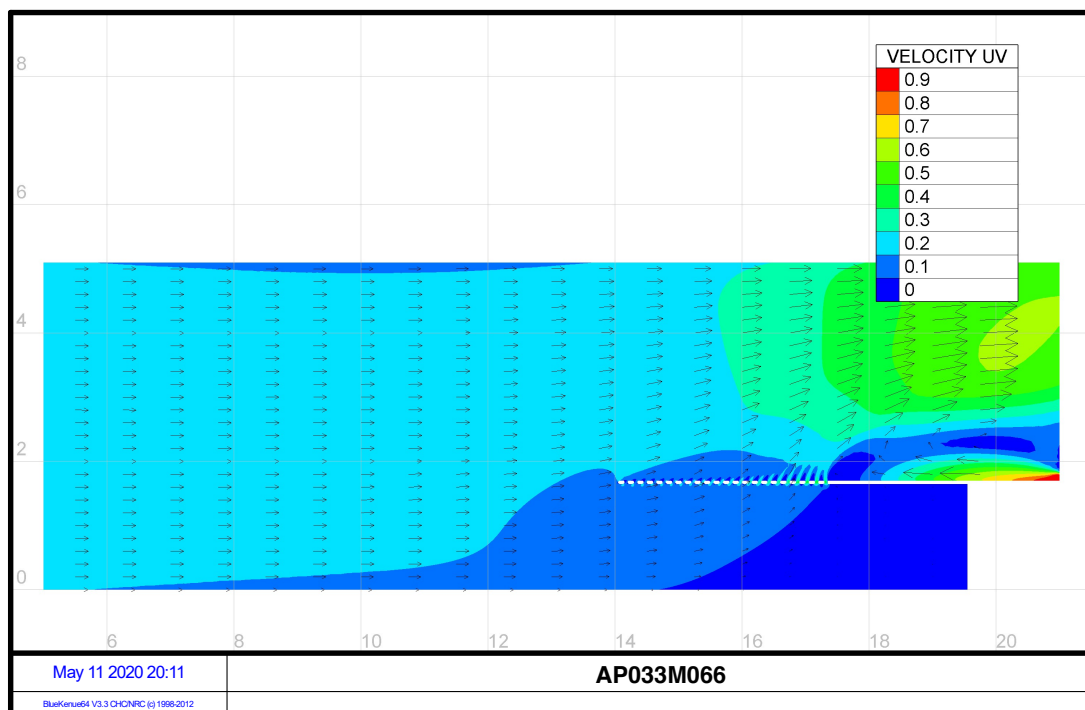


Figure 10-37 : Champ de vitesses - AP033M066

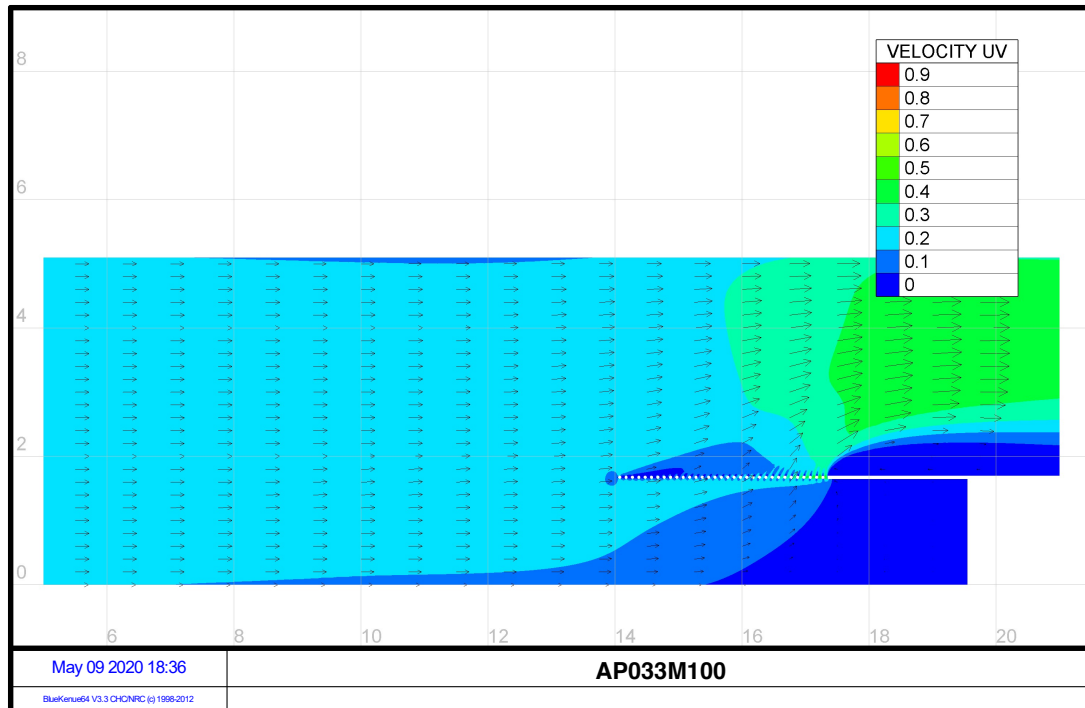


Figure 10-38 : Champ de vitesses - AP033M100

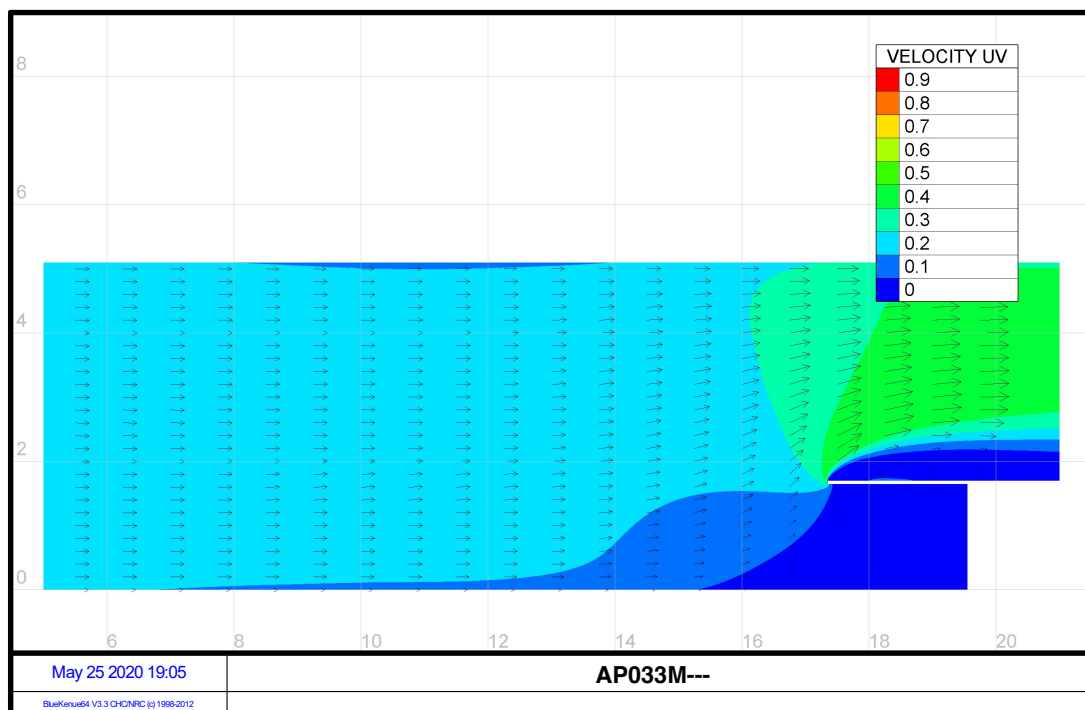


Figure 10-39 : Champ de vitesses - AP033M---

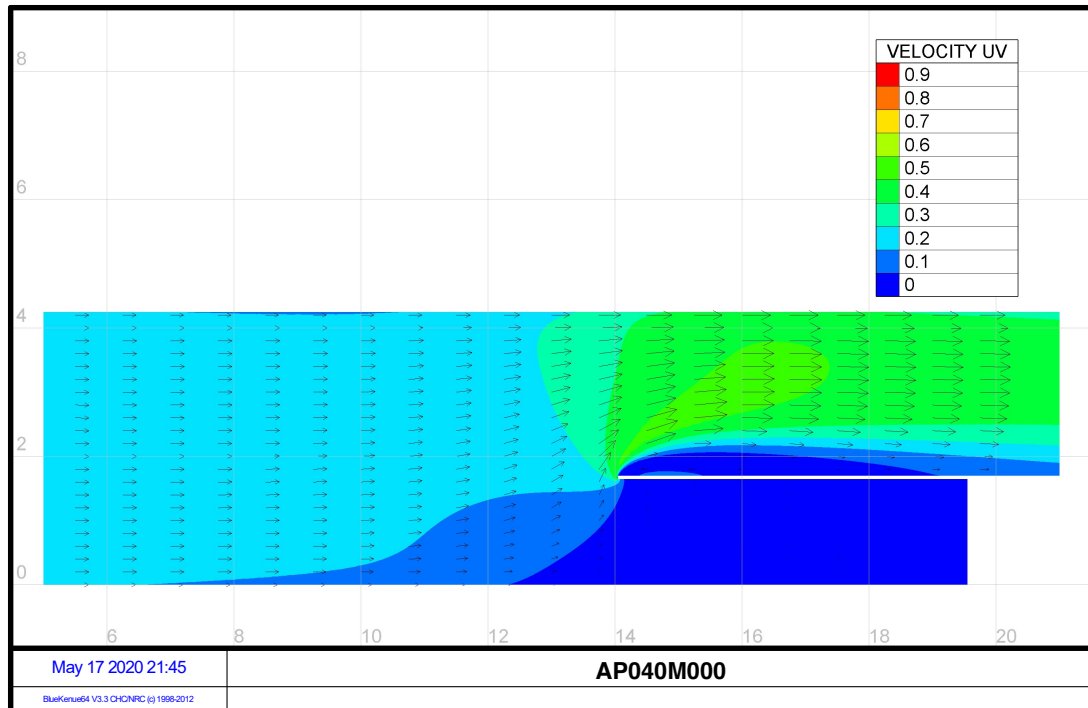


Figure 10-40 : Champ de vitesses - AP040M000

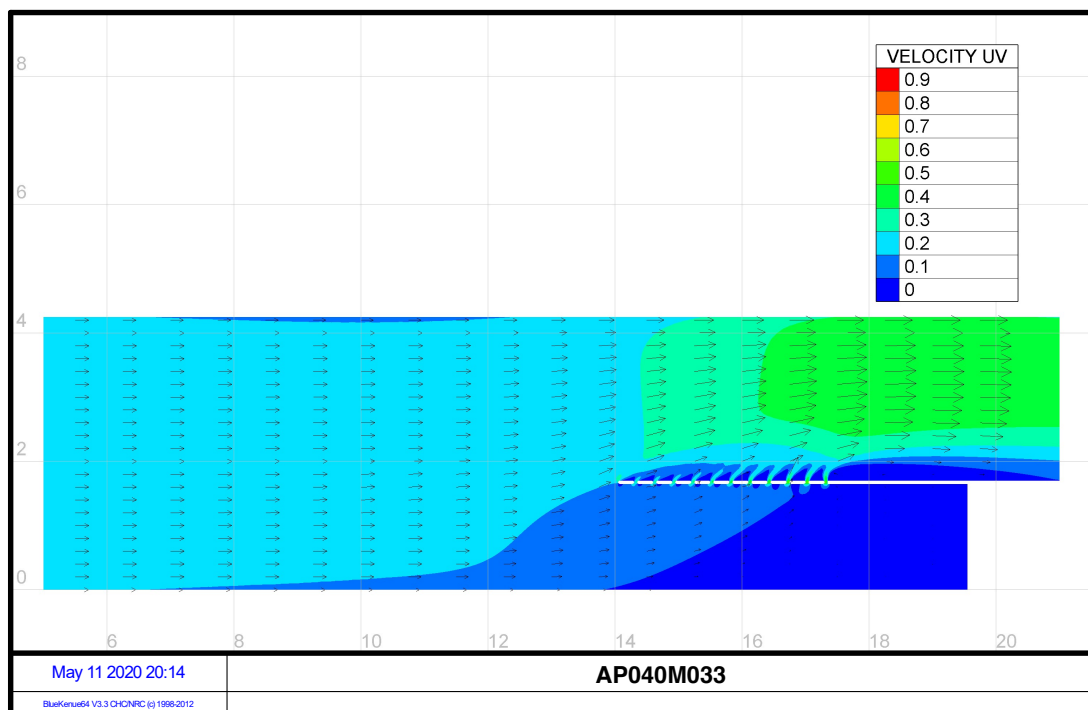


Figure 10-41 : Champ de vitesses - AP040M033

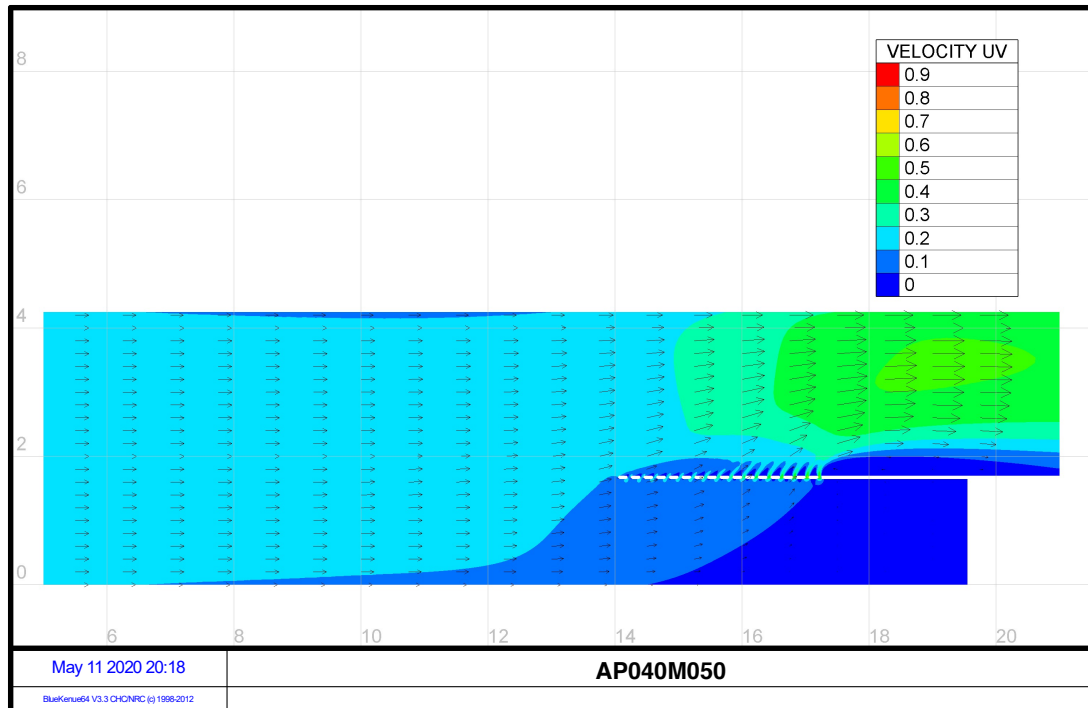


Figure 10-42 : Champ de vitesses - AP040M050

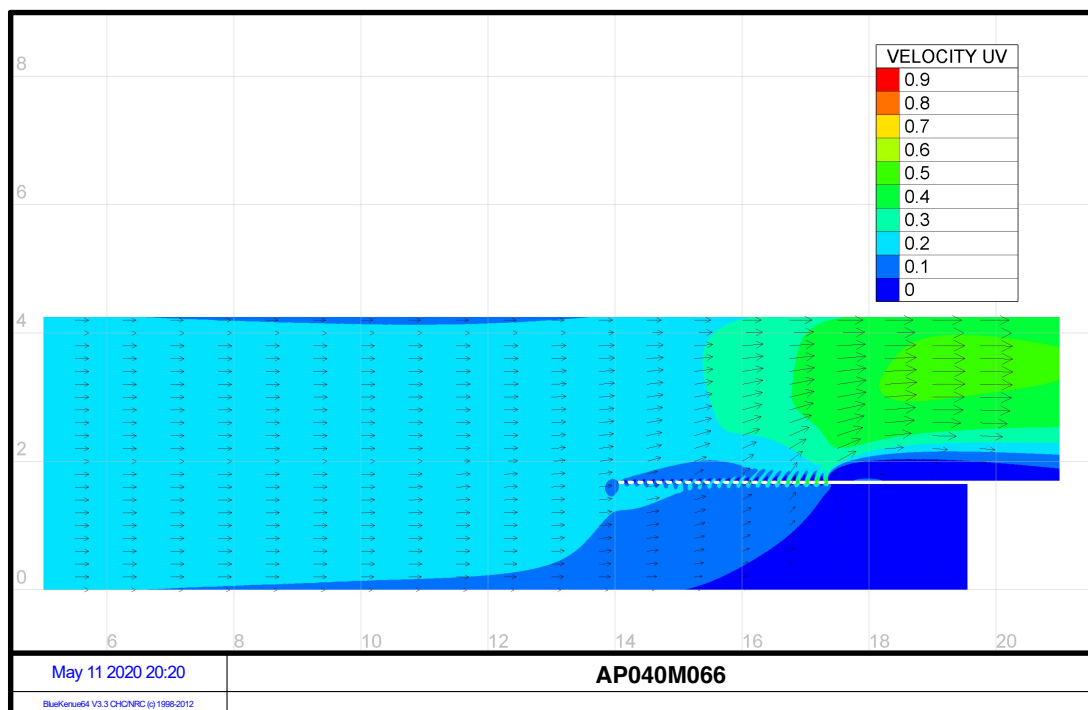


Figure 10-43 : Champ de vitesses - AP040M066

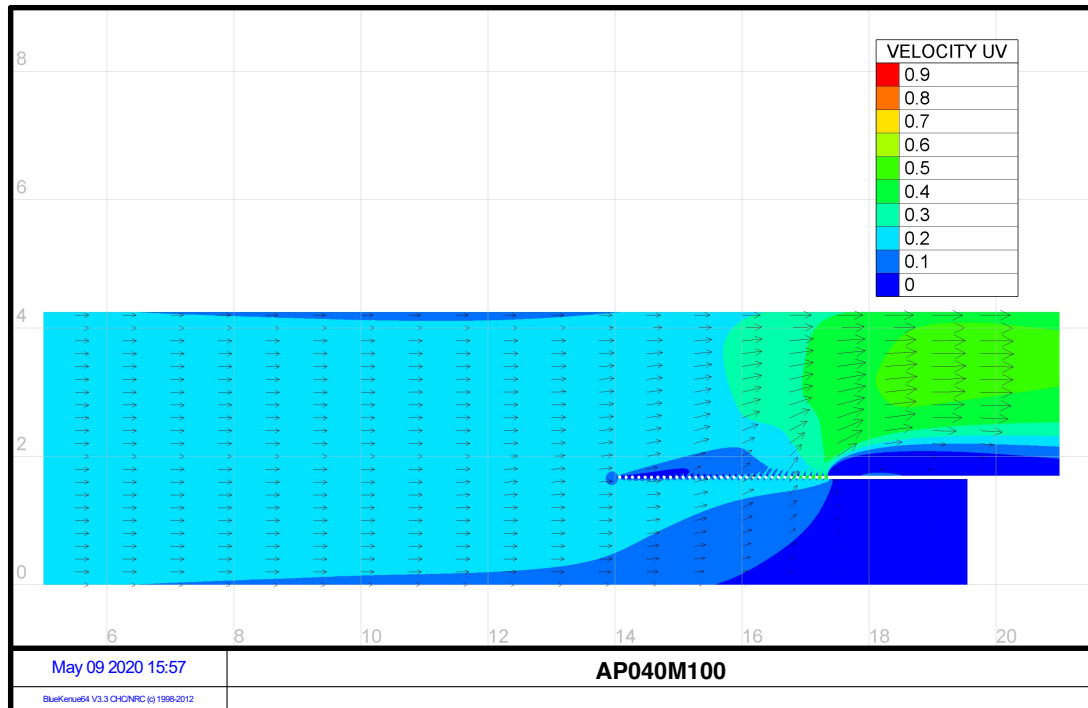


Figure 10-44 : Champ de vitesses - AP040M100

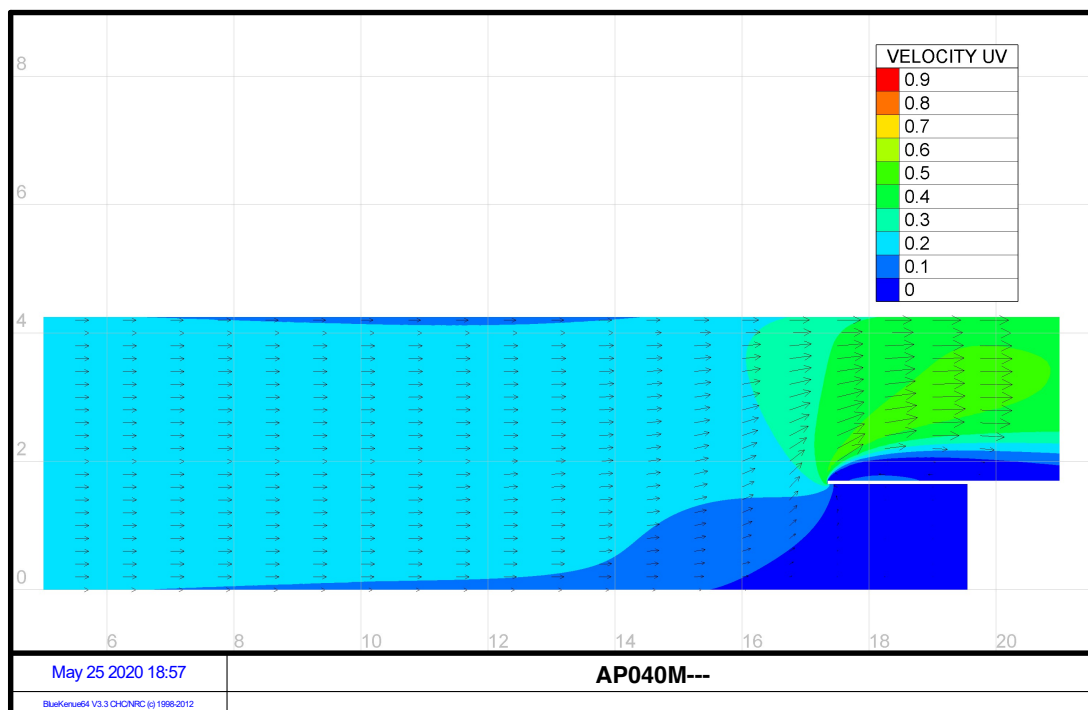


Figure 10-45 : Champ de vitesses - AP040M---

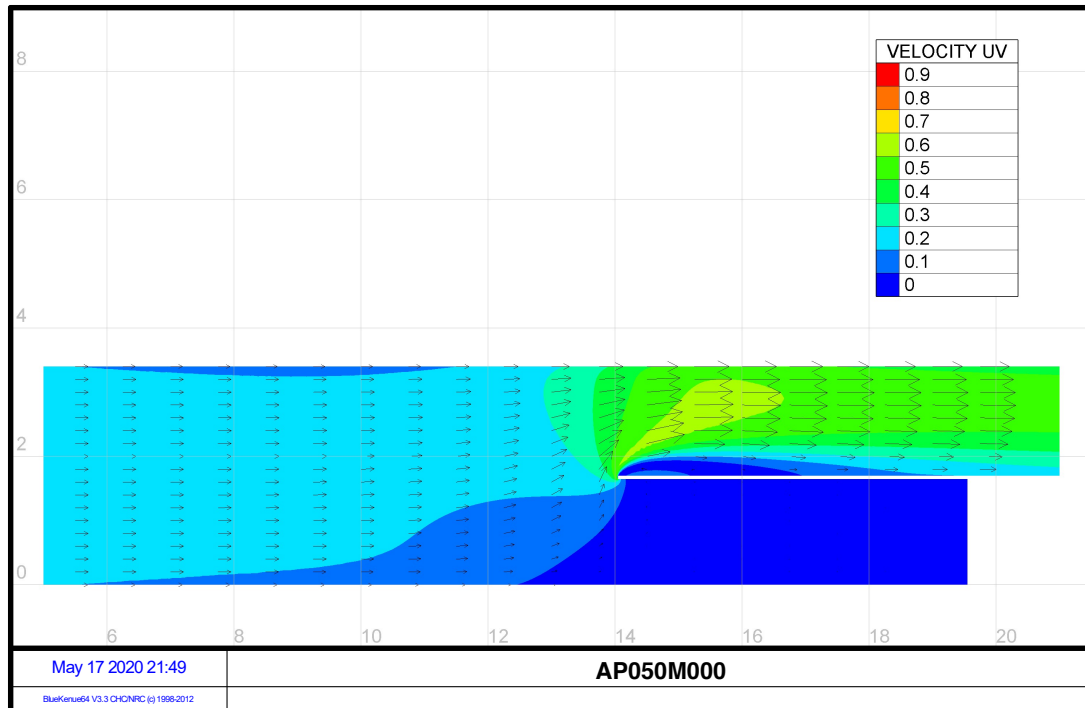


Figure 10-46 : Champ de vitesses - AP050M000

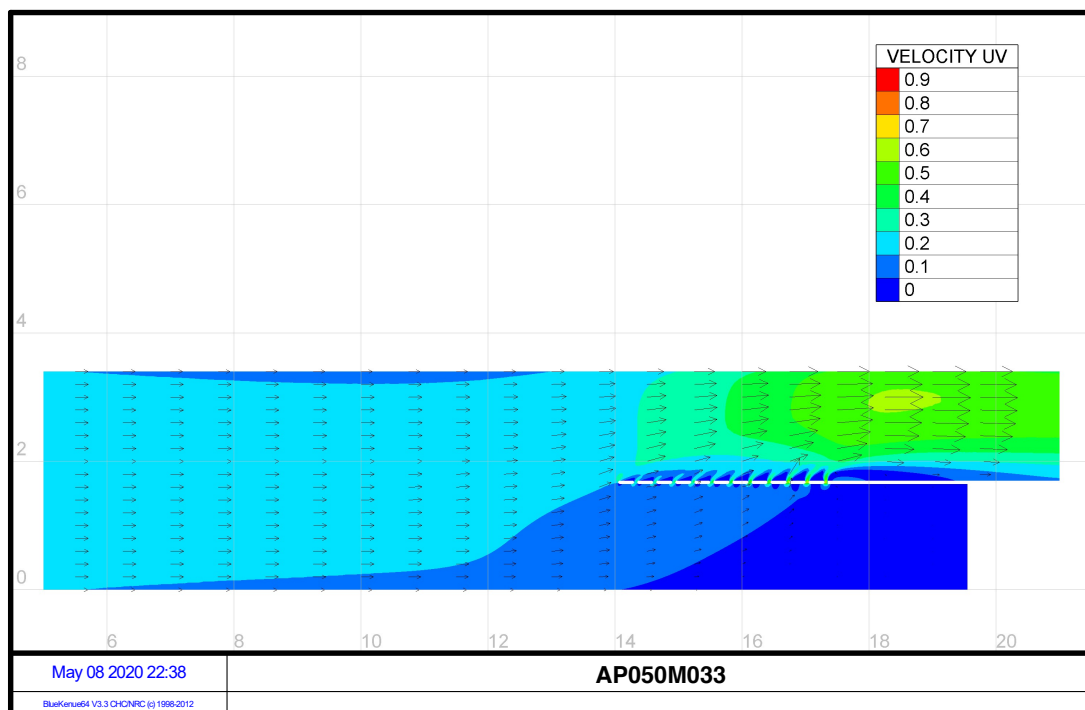


Figure 10-47 : Champ de vitesses - AP050M033

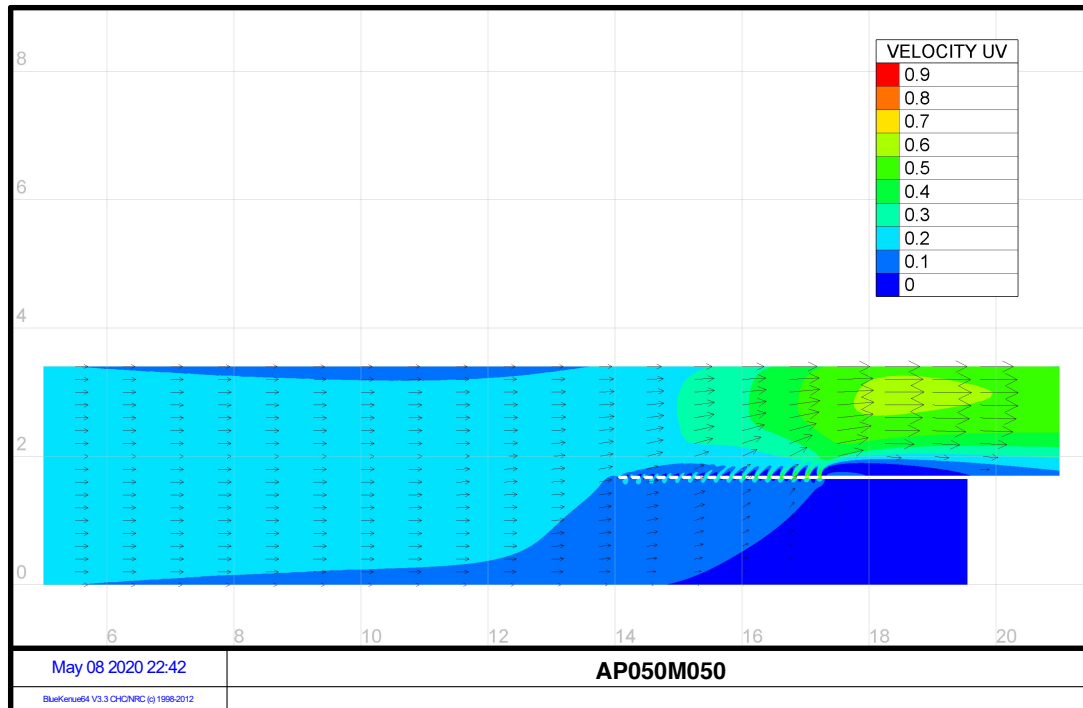


Figure 10-48 : Champ de vitesses - AP050M050

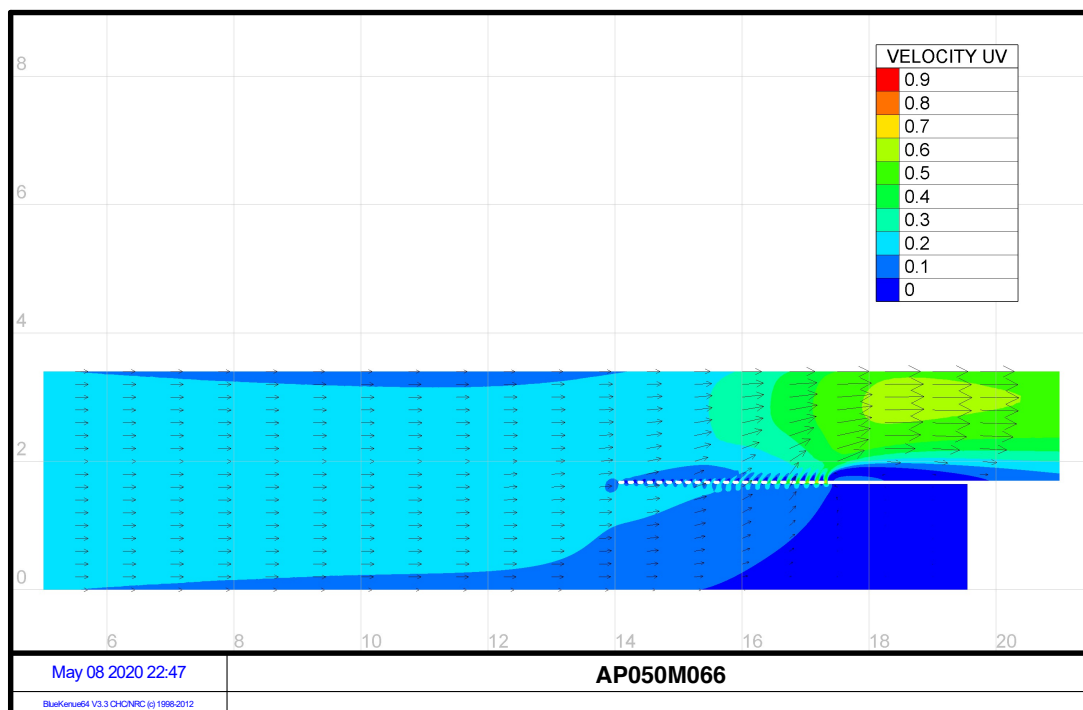


Figure 10-49 : Champ de vitesses - AP050M066

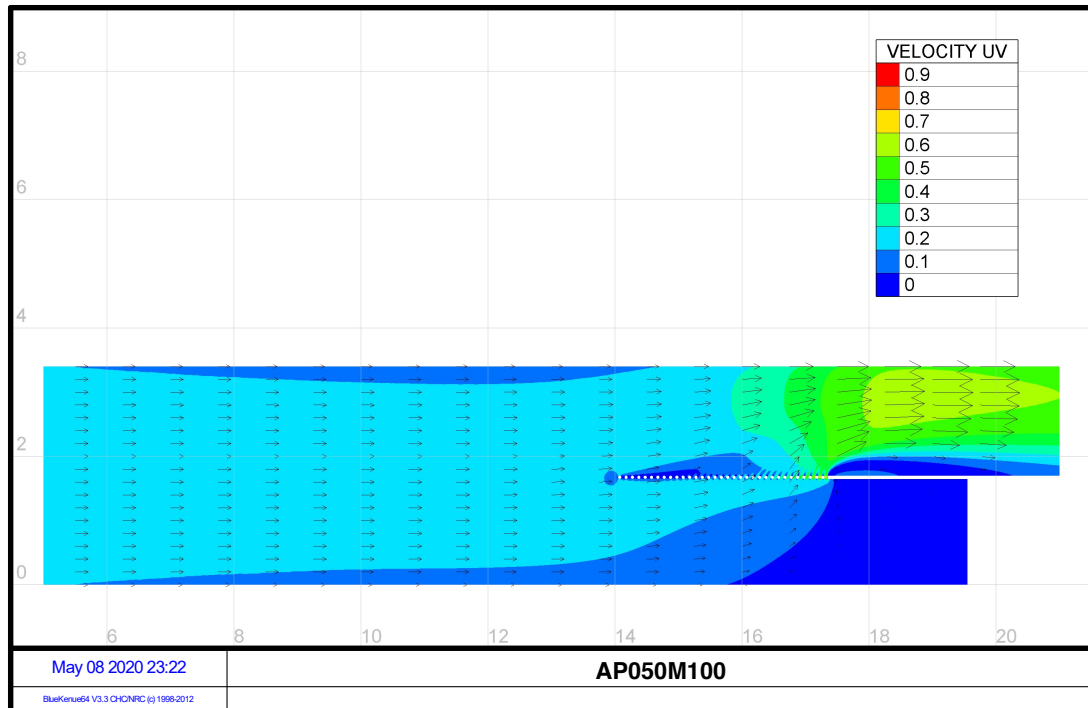


Figure 10-50 : Champ de vitesses - AP050M100

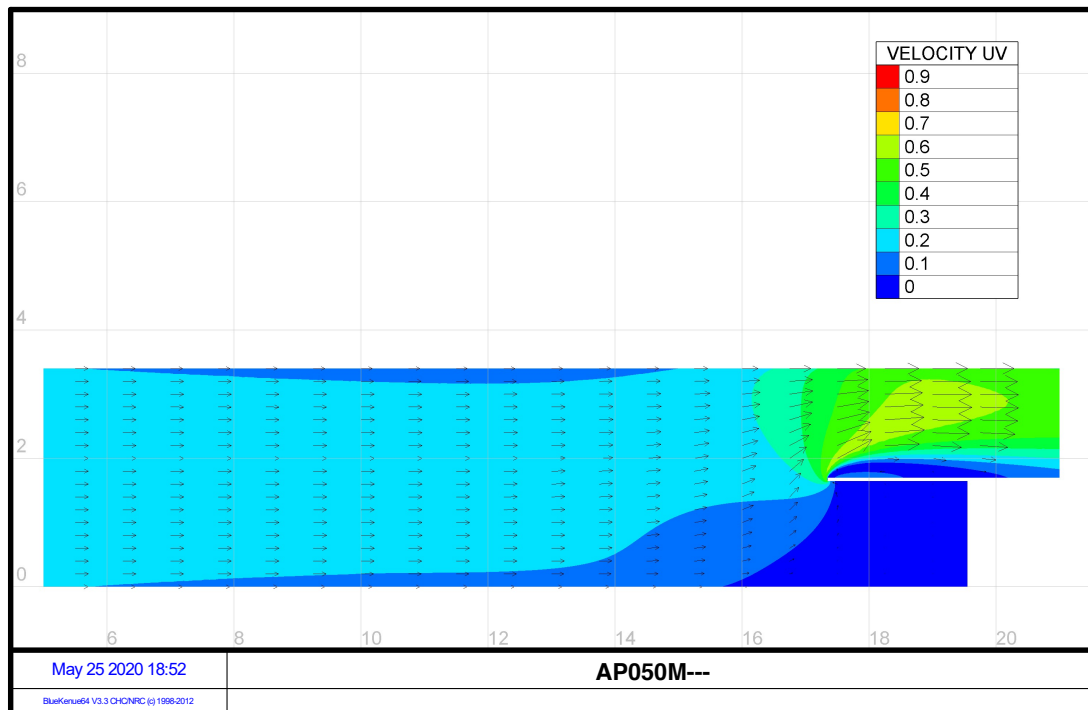


Figure 10-51 : Champ de vitesses - AP050M---

10.5.2 Comparaison des profils et gradients de vitesses

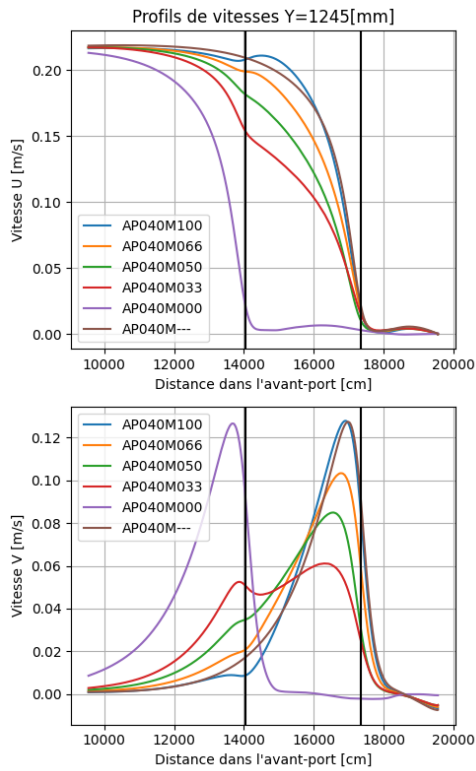


Figure 10-52 : Comparaison des profils de vitesses selon M avec AP040

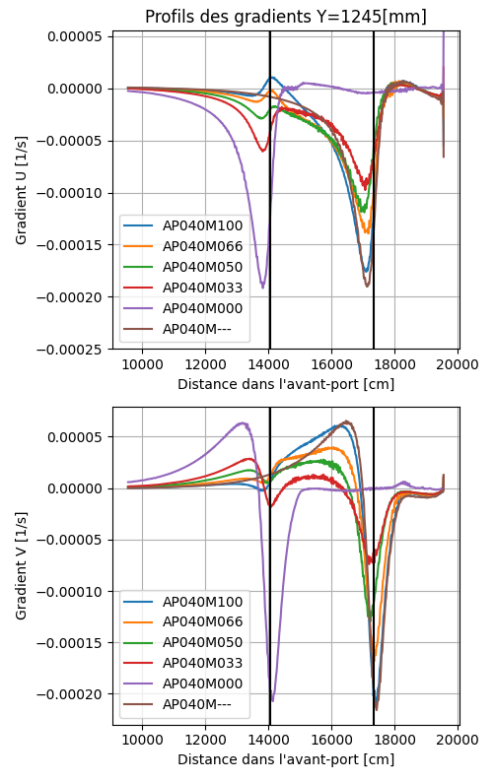


Figure 10-53 : Comparaison des gradients de vitesses selon M avec AP040

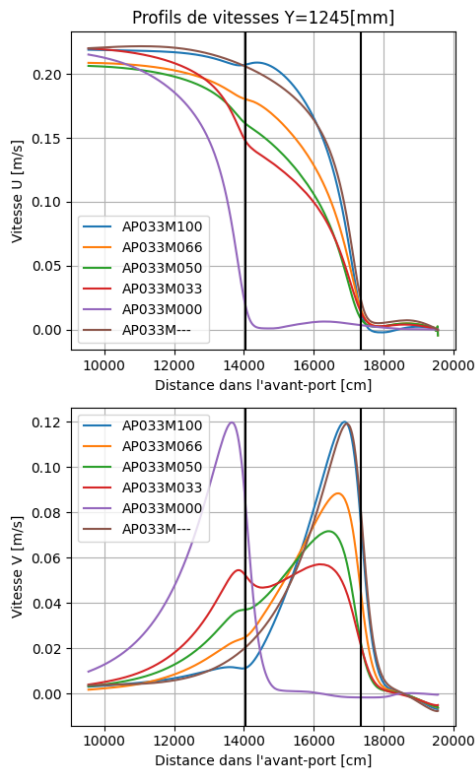


Figure 10-54 : Comparaison des profils de vitesses selon M avec AP033

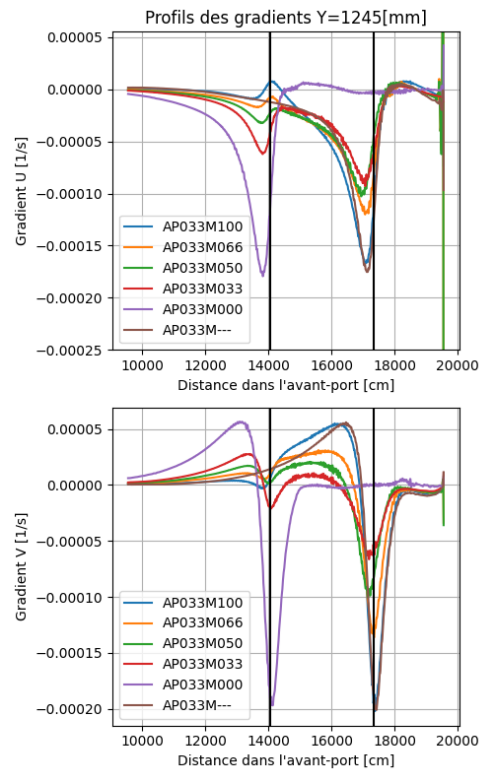


Figure 10-55 : Comparaison des gradients de vitesses selon M avec AP033

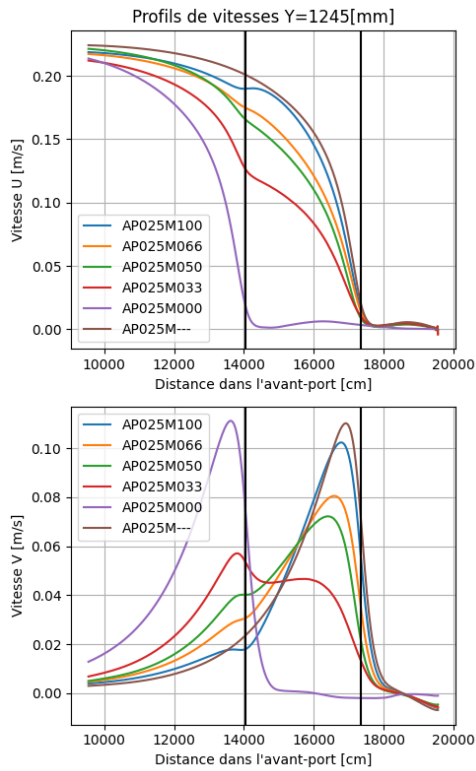


Figure 10-56 : Comparaison des profils de vitesses selon M avec AP025

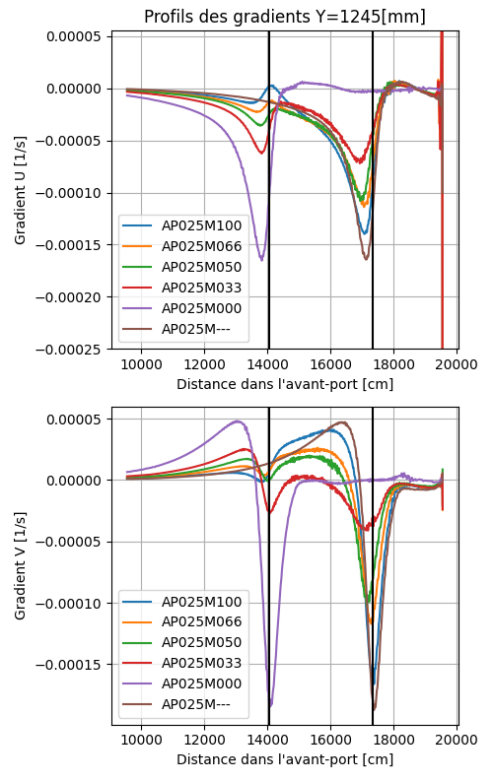


Figure 10-57 : Comparaison des gradients de vitesses selon M avec AP025

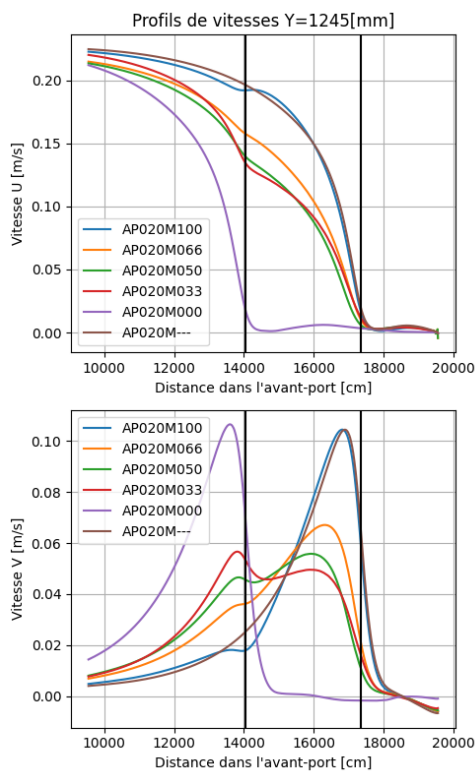


Figure 10-58 : Comparaison des profils de vitesses selon M avec AP020

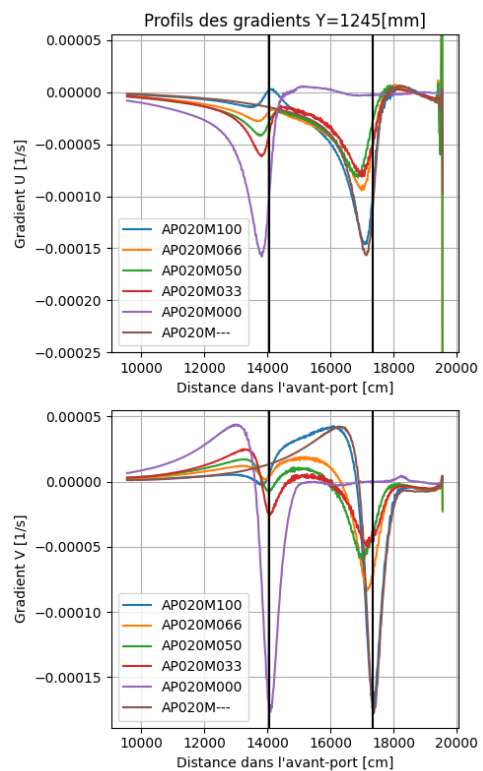


Figure 10-59 : Comparaison des gradients de vitesses selon M avec AP020

10.5.3 Géométries de môle étudiées pour Ampsin-Neuville

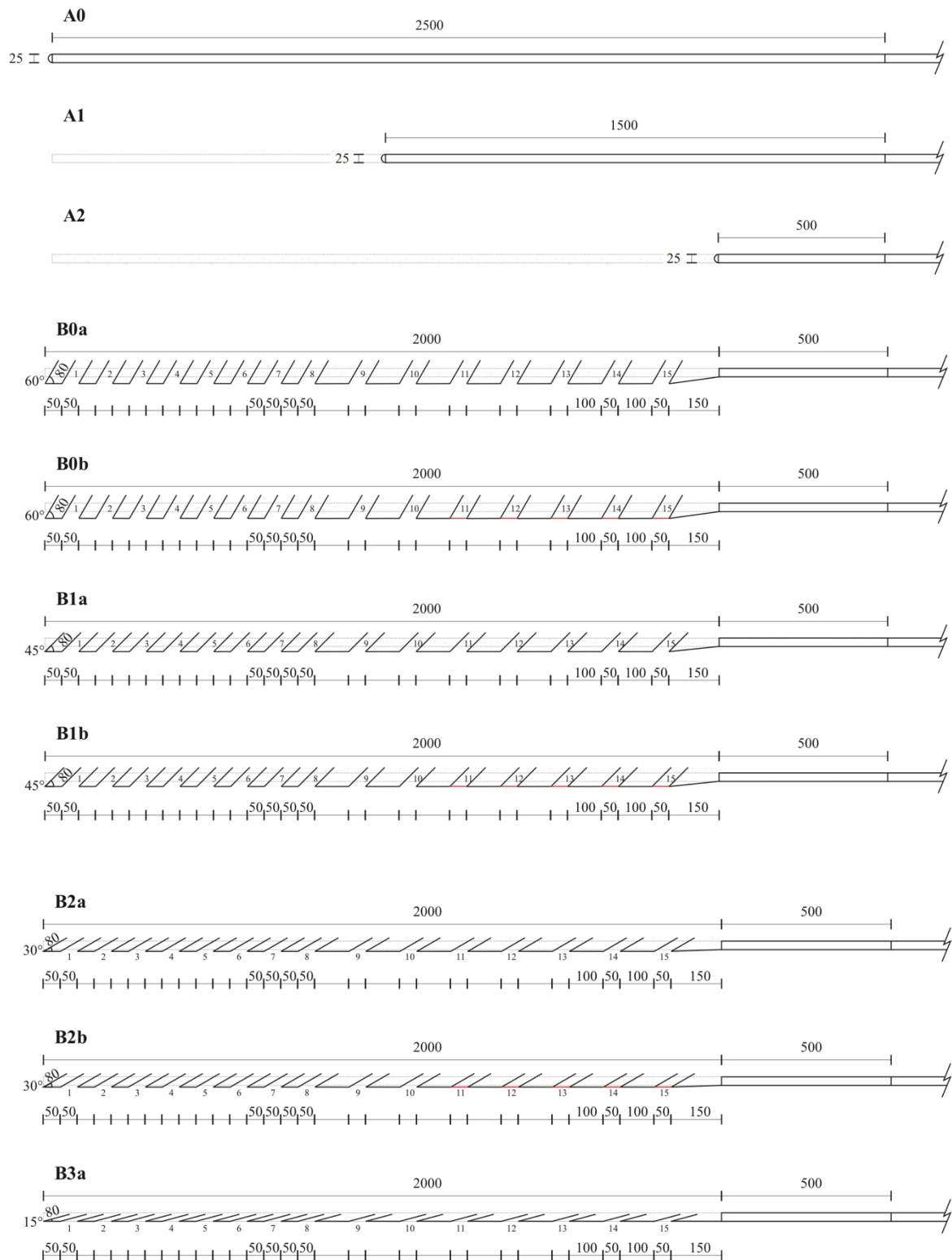


Figure 10-60 : Géométries de môles étudiés pour Ampsin-Neuville

10.5.4 Géométries de môles étudiées pour Auvélais

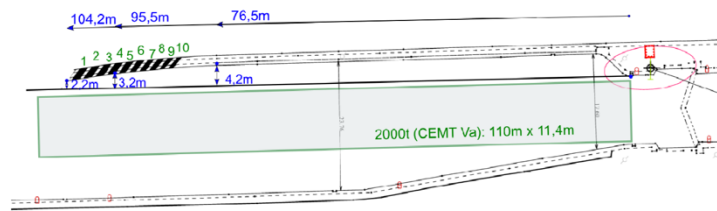


Figure 10-61 : Schéma du môle amont actuel de l'écluse d'Auvélais [23]

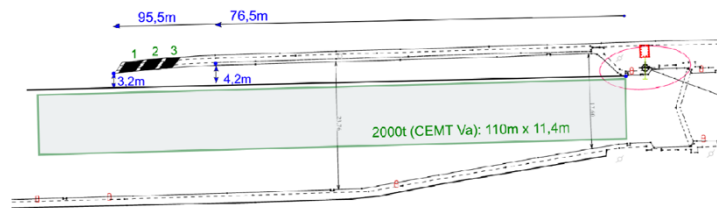


Figure 10-62 : Schéma du môle amont raccourci avec 3 ouvertures de l'écluse d'Auvélais [23]

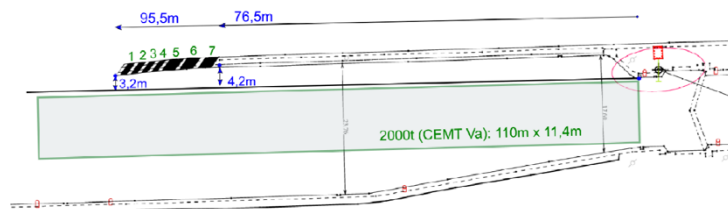


Figure 10-63 : Schéma du môle amont raccourci avec 7 ouvertures de l'écluse d'Auvélais [23]

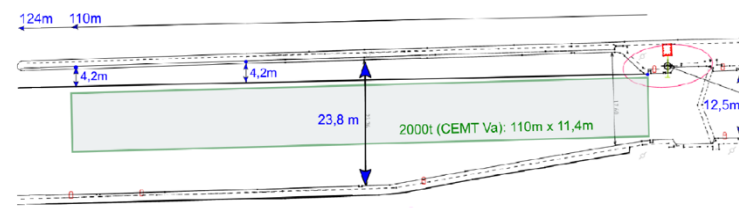


Figure 10-64 : Schéma du môle amont droit de l'écluse d'Auvélais [23]

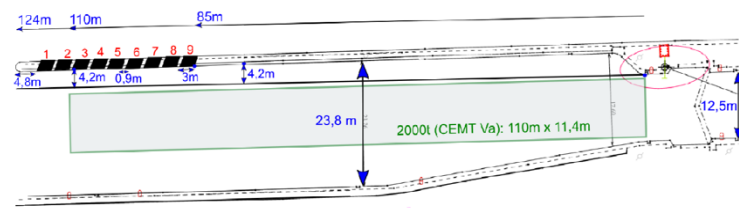


Figure 10-65 : Schéma du môle amont droit avec 7 ouvertures de l'écluse d'Auvélais [23]

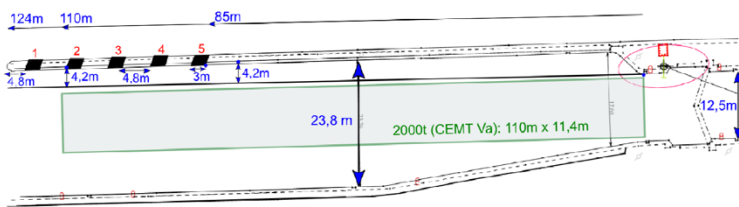


Figure 10-66 : Schéma du môle amont droit avec 5 ouvertures de l'écluse d'Auvélais [23]

11 Annexe numérique

Les différents **scripts python** réalisés pour lire et traiter les résultats issus des modèles expérimental et numérique sont joints dans une Annexe numérique disponible au *Service Public de Wallonie*.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl