

École polytechnique de Louvain

Efforts transversaux sur les convois lors du sassement en mode dégradé d'une écluse à aqueducs- larrons

Auteur : **Brice BERTIN**

Promoteurs : **Dr. Ir Didier BOUSMAR, Dr. Ir. Céline SAVARY**

Lecteurs : **Ir. Jonas FERON, Ir. João PACHECO DE ALMEIDA**

Année académique 2020–2021

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

J'adresse mes profonds remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de ce travail de fin d'études.

En premier lieu, je tiens à remercier mes promoteurs, Madame Savary et Monsieur Bousmar, de m'avoir guidé et aidé tout au long de ce travail. Malgré les tristes conditions dans lesquelles nous nous trouvons, je suis extrêmement reconnaissant pour leur encadrement, leur disponibilité et leurs judicieux conseils.

J'adresse également mes remerciements aux membres du personnel du Laboratoire des Recherches Hydrauliques pour leur accompagnement et leur aide lors de l'utilisation du modèle réduit de la 4^{ème} écluse de Lanaye.

Par ailleurs, je remercie Monsieur Pacheo De Almeida et Monsieur Feron d'avoir accepté d'être mes lecteurs.

Je souhaite exprimer ma gratitude à toutes les personnes parmi lesquelles Marc Gaethofs qui ont lu et relu ce travail, et plus particulièrement ma cousine Manon Fassin pour son dévouement.

J'ai également une pensée pour ma famille et mes amis qui m'ont soutenu durant la réalisation de ce projet. Merci pour leur temps et leur patience.

Table des matières

1	Introduction	5
1.1	Mise en situation.....	5
1.2	Études antérieures	5
1.3	Objectifs.....	6
1.4	Structure du rapport.....	7
2	Contexte.....	8
2.1	Transport fluvial	8
2.2	Écluses	12
2.2.1	Présentation structurelle et principe de fonctionnement	14
2.2.2	Système de remplissage et de vidange	16
2.3	Mode dégradé	20
2.4	Efforts d'amarrage	22
2.5	La 4 ^{ème} écluse de Lanaye	24
2.5.1	Contexte	24
2.5.2	Recommandations	26
2.5.3	Études ultérieures	30
3	Efforts d'amarrage : État de l'art	32
3.1	Différentes composantes des efforts d'amarrage	32
3.1.1	Efforts d'amarrage longitudinaux	32
3.1.2	Efforts d'amarrage transversaux :	35
3.2	Force hydrostatique.....	37
3.3	Force hydrodynamique.....	37
3.4	Roulis.....	38
3.5	Critères de sécurité existants	39
4	Modèle expérimental.....	43
4.1	Description du modèle réduit.....	44
4.1.1	Les lois de similitude	44
4.1.2	L'écluse	46
4.1.3	Le bateau	48
4.1.4	Le système d'amarrage.....	50
4.1.5	Système de remplissage et de vidange	53
4.2	Système de mesures.....	55
4.2.1	Dispositifs de mesure	55
4.2.2	Chaine de mesure	55
4.2.3	Capteur de niveau à ultrasons	57
4.2.4	Capteur de pression différentielle	58
4.2.5	Capteur de position à corde	59
4.2.6	Sonde de vitesses électromagnétiques	60
4.3	La loi d'ouverture.....	61
4.4	Procédure des essais.....	63
4.4.1	Protocole de mesure	63
4.4.2	Nomenclature	64
4.4.3	Mesure du champ de vitesse	67
4.4.4	Mesure des différences de pression	71
4.4.5	Mesure du roulis du bateau.....	76

5	Résultats	77
5.1	<i>Notes préliminaires.....</i>	77
5.1.1	Convention de signe	77
5.1.2	Lissage des données	78
5.1.3	Répétabilité des mesures.....	78
5.1.4	Hydrogramme et Limnigramme.....	79
5.1.5	Facteur d'homothétie	80
5.2	<i>Résultats Expérimentaux.....</i>	82
5.2.1	Composantes de vitesse dans le sas.....	82
5.2.1.1	Champ de vitesse sans bateau	83
5.2.1.2	Champ de vitesse avec bateau	89
5.2.2	Intégration des vitesses	101
5.2.3	Pente de roulis	107
5.2.4	Pressions	113
5.3	<i>Résultat in situ</i>	120
5.4	<i>Synthèse.....</i>	124
6	Conclusions et Perspectives	127
7	Bibliographie	130
8	Table des figures.....	132
9	Liste des tableaux	137
10	Annexes	138
10.1	<i>Plan modèle réduit.....</i>	138
10.2	<i>Test sonde de vitesse électromagnétique</i>	140
10.2.1	Introduction	140
10.2.2	Méthode	140
10.2.3	Résultats	143
10.2.3.1	Sonde de référence E646	143
10.2.4	Sonde coude.....	144
10.2.4.1	S.C E537	144
10.2.4.2	S.C E538.....	145
10.2.4.3	S.C E539.....	146
10.2.4.4	S.C E540.....	147
10.2.4.5	S.C E541	148
10.2.5	Sonde droite.....	149
10.2.5.1	S.D E530.....	149
10.2.5.2	S.D E531	150
10.2.5.3	S.D E532.....	151
10.2.5.4	S.D E533.....	152
10.2.5.5	S.D E534.....	153
10.2.5.6	S.D E535.....	154
10.2.6	Conclusion	155
10.3	<i>Test sur l'influence dispositif des sondes de vitesses électromagnétiques.....</i>	156
10.4	<i>Test de dispositif de la mesure de pression différentielle.....</i>	157
10.5	<i>Champ de vitesse dans le sas.....</i>	162
10.5.1	Sans bateau.....	162
10.5.2	Avec bateau	163

1 Introduction

1.1 Mise en situation

Depuis la nuit des temps, l'eau est une ressource vitale pour la survie humaine. Lors de son histoire, l'Homme s'est toujours installé aux abords des points d'eau pour sa consommation propre et son développement. Les fleuves ont joué un rôle majeur dans le développement économique et sociale. Ils contribuèrent aux besoins de l'agriculture, de l'industrie, de la production d'énergie, de la conservation de la faune et de la flore, du transport, ... Le développement économique et démographique a demandé à l'être humain d'aménager les voies d'eau pour les rendre navigables et contrôler leurs crues/décrués. Le transport fluvial et maritime étant un des principaux moyens de transport, l'être humain dut continuer à développer son réseau de navigation afin de permettre d'accueillir des bateaux de gabarit de plus en plus grand.

Afin de répondre aux nouvelles exigences du développement durable et l'utilisation de transport y afférent, l'Union Européenne a lancé un programme de développement appelé "Trans-European Transport Network" pour permettre de relier les ports et aéroports européens aux réseaux ferroviaires, routiers et fluviaux. Ce programme induit la construction de nouvelles écluses, dont la 4^{ème} écluse de Lanaye (écluse à aqueducs-larrons) située sur le territoire belge. Elle assure la liaison entre la Belgique et les Pays-Bas. Le site éclusier de Lanaye est un lieu stratégique de la navigation fluviale européenne.

Ce travail s'inscrit dans une démarche de compréhension des phénomènes hydrauliques rencontrés lors du remplissage en mode dégradé des écluses à aqueducs-larrons.

1.2 Études antérieures

Ce TFE s'inscrit dans la continuité de 5 autres travaux réalisés ces dernières années :

Le travail de **Heinz (2013)** dont l'intitulé est : "Mesure sur modèle réduit des efforts d'amarrage lors du remplissage d'une écluse : Comparaison entre une alimentation par contournement des têtes et par aqueducs-larrons". Ce travail a permis de réhabiliter le modèle réduit et de l'adapter à l'étude des efforts d'amarrage. Il a étudié les hydrogrammes de remplissage pour les systèmes d'alimentation par contournement des têtes et par aqueducs-larrons. Lors de ces essais sur modèle réduit, la barge ne se déplaçait que verticalement dans le sas car l'élasticité des amarres n'a pas été considérée.

Le travail de **Reding (2013)** a pour sujet : "Efforts d'amarrage dans un sas d'écluse - évaluation expérimentale". Il a modifié le modèle réduit afin de tenir compte de l'élasticité des amarres et donc de permettre le mouvement longitudinal de la barge dans le sas. Ce travail a également étudié un système de dissipation pour limiter les remous durant le remplissage.

Le travail de **Magotteaux (2014)** a pour intitulé : "Efforts d'amarrage dans un sas d'écluse – Évaluation expérimentale". Ce travail a développé un nouveau système

d'amarrage permettant à la barge le mouvement longitudinal et transversal. Ce système permet de simuler la non-tension d'une amarre.

La thèse de **Christiaens (2015)**: "Evaluation of the mooring forces acting on a vessel in a navigation lock". Cette thèse a étudié les forces agissant sur une barge lors d'un sasement. Il a utilisé une approche combinant la modélisation numérique et des résultats expérimentaux.

Le travail de **Lenaerts et El Ouamari (2019)** porte sur : "Efforts d'amarrage transversaux lors du remplissage en mode dégradé d'une écluse à aqueducs-larrons". Leur travail avait pour objectif d'améliorer la compréhension des phénomènes hydrauliques rencontrés lors d'un remplissage en mode dégradé d'une écluse à aqueducs-larrons suite aux incidents qui se sont produits sur le modèle réel de la 4^{ème} écluse de Lanaye. Leurs conclusions ainsi que les études et recommandations réalisées par le Service Public de Wallonie suite aux incidents sont présentées en détails dans la section 2.

1.3 Objectifs

Le présent travail s'inscrit dans la lignée du TFE de El Oumari et Lenaerts visant à étudier les efforts transversaux sur les convois lors du sasement en mode dégradé d'une écluse à aqueducs-larrons. Voici les trois objectifs de l'étude :

- Comprendre les phénomènes des efforts transversaux dans le sas et sur les convois.
- Proposer des solutions pour une meilleure sécurité lors du sasement en mode dégradé.
- Prévoir et limiter les efforts transversaux lors de la conception d'une nouvelle écluse.

Afin de répondre aux objectifs définis ci-dessus, nous avons effectué une campagne de mesures sur le modèle réduit de la 4^{ème} écluse de Lanaye disponible sur le site de la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie à Châtelet dans le but de :

- Approfondir la description et la schématisation de l'écoulement transversal dans le sas. Pour cela, des mesures de vitesse de l'eau en suivant l'évolution de la surface libre lors du remplissage ont été effectuées (au-delà des 24 cm du maillage du TFE de El Ouamari et Lenaerts, 2019).
- Décrire et schématiser l'écoulement transversal dans le sas en présence du bateau lors du remplissage. De nouvelles mesures de vitesse de l'eau ont été réalisées en suivant l'évolution de la surface libre et du bateau lors de la bassinée.
- Comprendre, décrire et schématiser le roulis du bateau lors du remplissage ainsi que comparer le sens de roulis avec les pentes d'eau.

- Décrire et schématiser les pressions agissant sur la carène lors d'un sassement. Des mesures de pression différentielles ont été réalisées à diverses positions le long de la carène, soit de manière symétrique de part et d'autre du bateau, soit par rapport à une position de référence.
- Approfondir et comparer l'influence de la taille des éjecteurs sur le comportement de l'écoulement transversal avec et sans bateau ainsi que le roulis et le tangage du bateau et l'impact des forces hydrostatiques sur la carène.
- Comparer les mesures de vitesse sur modèle réduit avec les mesures de vitesse réalisées sur site.

1.4 Structure du rapport

Ce TFE est organisé en 5 sections qui sont citées et brièvement décrites ci-dessous :

Contexte

Cette partie se consacre à introduire et à contextualiser le domaine fluvial. Elle présente le développement et les divers enjeux du transport fluvial ainsi que l'exposé détaillé du fonctionnement d'une écluse. Ensuite, nous introduirons le modèle réel, à l'étude, de la 4^{ème} écluse de Lanaye ainsi que les études réalisées par le SPW et les incidents qui se sont produits sur celle-ci et les recommandations qui en découlent.

Efforts d'amarrage transversaux : état de l'art

Cette deuxième partie se consacre à l'introduction tous les concepts théoriques relatifs aux efforts d'amarrage transversaux. Elle va également présenter les critères de sécurité existants.

Modèle expérimentale

Dans cette partie, le modèle réduit expérimental va être détaillé. Ensuite, le fonctionnement des divers capteurs et sondes utilisés va être introduit. La procédure utilisée et les dispositifs de mesures réalisés sur le modèle réduit vont être expliqués et illustrés.

Résultats

Dans cette quatrième partie, les résultats expérimentaux réalisés sur le modèle réduit vont être présentés et analysés. Une synthèse va reprendre les résultats et les observations réalisées. Une comparaison avec des mesures de vitesse réalisées sur le modèle réel sera également proposée.

Conclusion et perspectives

Cette dernière partie va répondre aux objectifs définis au début de ce TFE et elle va introduire les perspectives obtenues suite à l'analyse des résultats.

2 Contexte

2.1 Transport fluvial

Durant des siècles, les cours d'eau ont été des repères géographiques, des enjeux économiques et politiques ainsi que des lieux stratégiques militaires aux abords desquels les plus grandes villes se sont développées. On peut observer ce développement au niveau du continent européen. En effet, pour ne citer que les plus grandes villes, nous avons Londres avec la Tamise, Paris avec la Seine, et plus particulièrement dans nos contrées, nous avons, entre autres, Namur et Liège avec la Meuse et Charleroi avec la Sambre. Le transport fluvial est considéré comme le mode de transport le plus ancien. En Europe, dès le 7^{ème} siècle, les premières écluses ainsi qu'une multitude de projets d'aménagement et de construction de voies d'eau ont vu le jour afin de rendre les voies d'eau navigables. Pour qu'une voie d'eau soit navigable, elle doit répondre à certains critères tels qu'une hauteur d'eau minimum, une largeur appropriée aux bateaux et un débit contrôlé, ... (Bousmar, 2020).

L'Europe compte environ 45 000 km de voies navigables, dont plus de 1 500 km en Belgique. Afin de faciliter la navigation, les voies d'eau ont été aménagées grâce aux barrages et écluses. Des canaux ont été créés pour densifier le réseau et permettre des connections (Wikipédia, 2020).

Le transport fluvial est le moyen le plus écologique et économique pour le transport de marchandise. Économiquement, le transport par voies navigables est quatre fois plus économique que le transport routier et deux fois plus que le transport ferroviaire. Écologiquement, le transport fluvial est le plus faible producteur de gaz à effets de serre par rapport aux autres secteurs de transports (Figure 2-1) (Cech, 2015 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019).

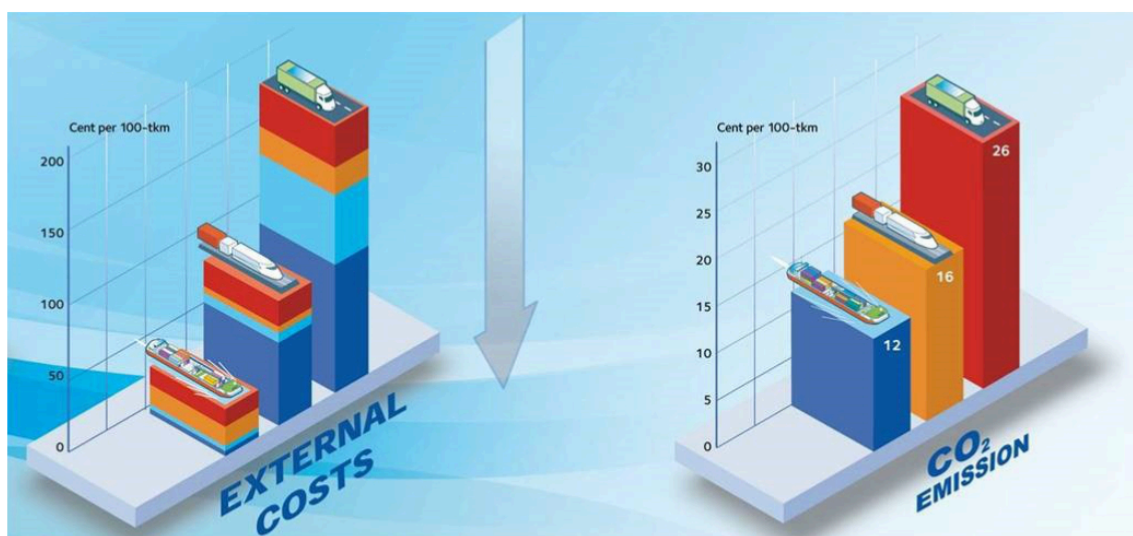


Figure 2-1 : Comparaison économique et écologique des moyens de transport (Cech, 2015)

Un autre atout est son respect et son impact réduit sur l'environnement avec des nuisances sonores, visuelles et olfactives faibles en comparaison au secteur routier et ferroviaire.

Aussi, la sécurité est un réel avantage car le transport fluvial présente une limitation des risques d'accidents. Comme illustré sur la Figure 2-2 (Bousmar 2020 ; Cech 2015).

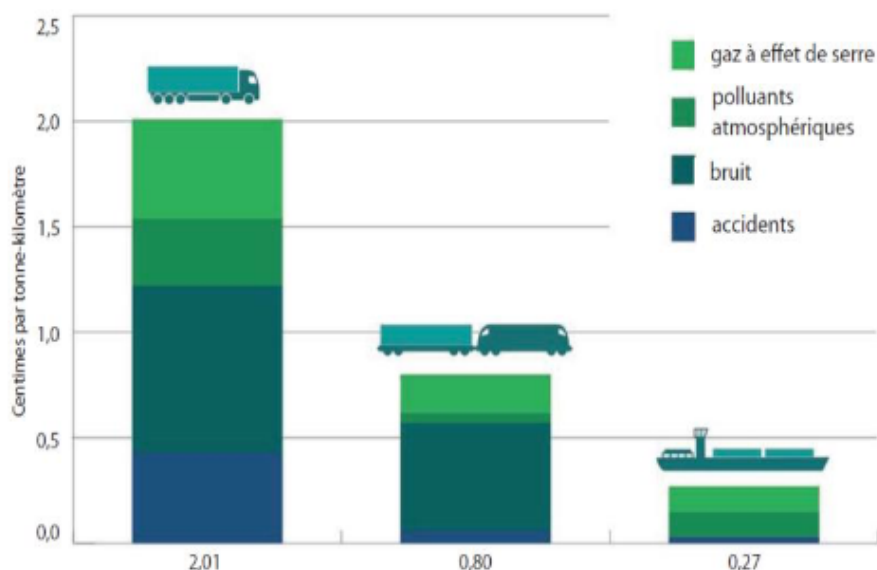


Figure 2-2 : Comparaison des nuisances sur les moyens de transport (Tourret, 2019)

Malgré ses nombreux avantages, le transport fluvial possède quelques limitations. En effet, il doit être suppléé par le transport routier pour la partie finale de la livraison. Aussi, pour assurer son bon fonctionnement, il nécessite l'aménagement des voies d'eau destinées à la navigation (Bousmar 2020 ; Cech 2015).

Dans le cadre du développement des infrastructures et pour favoriser l'utilisation de mode de transport durable, l'Union Européenne a lancé un programme de développement appelé "Trans-European Transport Network", abrégé sous la forme TEN-T (Figure 2-3). Il permettra de relier les ports et aéroports européens aux réseaux ferroviaire, routier et fluvial (Wikipédia, 2020).

Afin de favoriser les moyens de transport durables et de les rendre plus compétitifs, les projets fluviaux consistent à étendre leur réseau pour relier les différents pôles économiques européens ainsi qu'à élever leur capacité d'accueil en augmentant le gabarit des voies navigables dans le but de permettre la navigation de bateaux de plus grande taille et d'agrandir sa capacité d'utilisation (Wikipédia, 2020).

En avril 2004, l'U.E. a fixé une liste de 30 projets prioritaires pouvant bénéficier d'un financement européen à hauteur maximale de 20% du cout total du projet, soit un budget estimé de 225 milliards d'euros. Le développement de la 4^{ème} écluse de Lanaye s'inscrit dans cette démarche (Wikipédia, 2020).



European
Commission

TRANS-EUROPEAN TRANSPORT NETWORK TEN-T CORE NETWORK CORRIDORS



Figure 2-3 : Carte du Trans-Europe Transport (Service Public de Wallonie, 2017)

Depuis les années 60, la Conférence Européenne des Ministres des Transports, CEMT, a classé les voies navigables afin d'homogénéiser les caractéristiques des voies navigables et les dimensions des bateaux à l'échelle Européenne. Les classes des bateaux sont reprises et illustrées ci-dessous (Figure 2-4 et 2-5).

Classe CEMT	Type de bateau	Longueur (m)	Largeur (m)	Tirant d'eau (m)	Tirant d'air (m)	Tonnage (t)
I	Spits	38,50	5,05	1,80 - 2,20	3,70	250 - 400
II	Campinois	50,00 - 55,00	6,60	2,50	3,70 - 4,70	400 - 650
III	D.E.K.	67,00 - 80,00	8,20	2,50	4,70	650 - 1000
IV	R.H.K.	80,00 - 85,00	9,50	2,50	4,95 ou 6,70	1000 - 1500
Va	Grand-Rhénan	95,00 - 110,00	11,40	2,50 - 4,50	4,95 ou 6,70 ou 8,80	1500 - 3000
Vb	Convoi poussé	172,00 - 185,00	11,40	2,50 - 4,50	4,95 ou 6,70 ou 8,80	3200 - 6000
Vla	Convoi poussé	95,00 - 110,00	22,80	2,50 - 4,50	6,70 ou 8,80	3200 - 6000
Vlb	Convoi poussé	185,00 - 195,00	22,80	2,50 - 4,50	6,70 ou 8,80	6400 - 12000

Figure 2-4 : Caractéristiques des bateaux de classe CEMT (Conférence Européenne des Ministres des Transport)

Péniche Freycinet (classe I)

Dimensions : 38,50 m x 5,05 m • Tirant d'eau : 2,20 m •
Tonnage : 250 à 400 t (soit 14 camions)



Campinois (classe II)

Dimensions : 50-63 m x 6,60 m • Tirant d'eau : 2,50 m
Tonnage : 400 à 600 t (soit 22 camions)



Dortmund-EMS-Kanaal (DEK) (classe III)

Dimensions : 67-80 m x 8,20 m • Tirant d'eau : 2,50 m
Tonnage : 650 à 1 000 t (soit 36 camions)



Rheine Herne Kanaal (RHK) (classe IV)

Dimensions : 80-85 m x 9,50 m • Tirant d'eau : 2,50 m
Tonnage : 1 000 à 1 500 t (soit 60 camions)



Grand Rhénan (classe Va)

Dimensions : 95-135 m x 11,40 m • Tirant d'eau : 2,50-3 m
Tonnage : 1 500 à 3 000 t (soit 120 camions)



Convoi poussé de 2 barges (classe Vb)

Dimensions : 185 m x 11,40 m • Tirant d'eau : 3 m
Tonnage : 4 400 t (soit 180 camions)



Figure 2-5 : Illustration - Principaux types de bateaux de classe CEMT (Conférence Européenne des Ministres des Transport)

2.2 Écluses

Afin de permettre une navigation en tout temps, l'être humain a aménagé ses voies d'eau.

Ces dernières étant sujettes à l'aléa du temps et des précipitations, elles sont impactées :

- En période de crue, par augmentation significative du débit, la vitesse de l'eau est trop élevée pour permettre aux bateaux de naviguer en toute sécurité.
- En période d'étiage, par diminution significative du débit, le niveau d'eau est trop faible pour permettre au bateau de naviguer, le tirant d'eau étant insuffisant (Bousmar, 2020).

L'aménagement des voies d'eau a permis de contrôler les variations et de maintenir une hauteur d'eau suffisante pour la navigation au travers de barrages. Les écluses ont été développées afin de permettre le franchissement du dénivelé créé par les barrages (Bousmar, 2020).

La première écluse à sas apparaît en Chine en 984 sur le Grand Canal, le plus ancien canal du monde permettant de relier le nord et le sud de la Chine. En Europe, la première utilisation d'une écluse à sas avec des doubles portes en bois remonte au 13^{ème} siècle au Pays-Bas (Wikipédia, 2020).

"Une écluse est un ouvrage situé entre deux plans d'eau dont les niveaux sont différents et qui permet aux bateaux de passer de l'un à l'autre grâce à la manœuvre d'éléments mobiles (portes et/ou vannes)" (Figure 2-6) (Bousmar,2020).

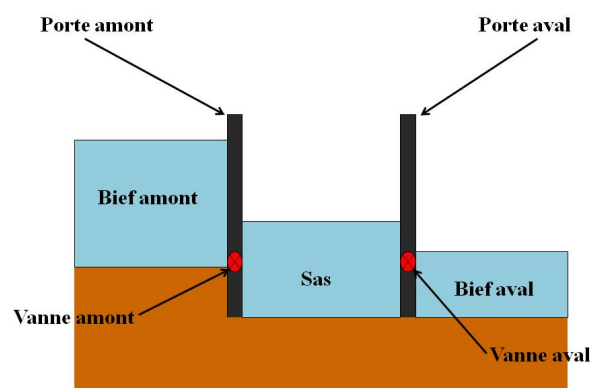


Figure 2-6 : Coupe – Représentation d'une écluse (Technologie Collège Saint-Louis, 2013)

Afin de mieux exprimer les actions liées aux écluses, voici quelques définitions de termes utiles (illustré sur la Figure 2-7) :

- Le sasement correspond à l'action de faire passer un bateau d'un bief à un autre par une écluse, également appelé bassinée.
- Le bief correspond au secteur d'une voie navigable compris entre deux écluses.
- Le tirant d'eau du canal correspond à la hauteur maximale permettant la navigation.
- Le tirant d'eau du bateau correspond à la hauteur d'enfoncement du bateau.
- Le tirant d'air du bateau correspond à la hauteur du bateau hors de l'eau (Larousse, 2020).

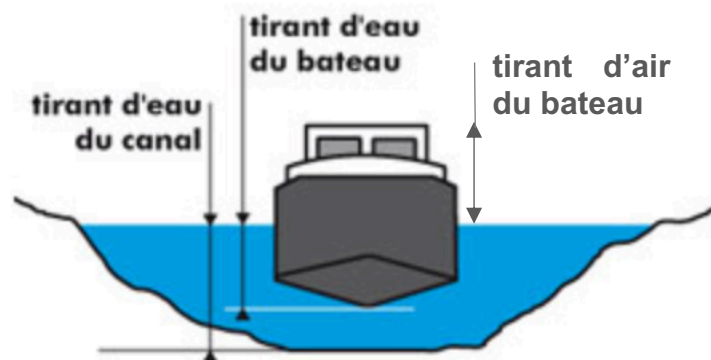


Figure 2-7 : Les différents tirants d'un bateau (PIANC, 2020)

2.2.1 Présentation structurale et principe de fonctionnement

Avec ses éléments principaux, une écluse type (visible sur la Figure 2-8 et Figure 2-9) est composée d'un sas (1) qui accueille le bateau lors du sasement. Le sol/fond du sas se nomme le radier (2). Le sas est délimité d'une part par des murs verticaux parallèles au sens de circulation appelés les bajoyers (3) et d'autre part par les têtes (4) situées perpendiculairement au sens de circulation. Les têtes d'écluse se composent des portes (5) ainsi que les vannes. Afin de fixer le bateau durant le sasement, l'écluse dispose de bollard de couronnement (6), de bollard flottant (7) et de bollard encastré, appelé également organeau (8) (Christiaens, 2015).

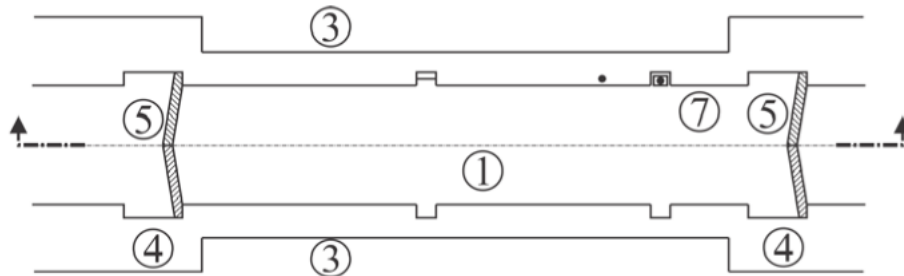


Figure 2-8 : Plan d'une écluse type (Christiaens, 2015)

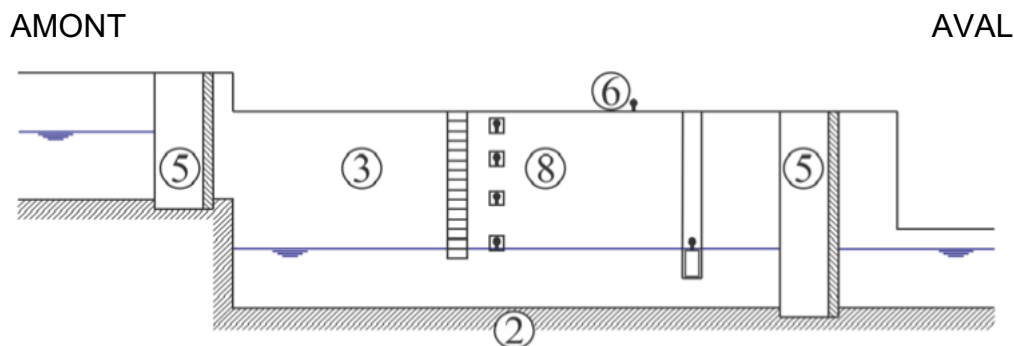


Figure 2-9 : Coupe d'une écluse type (Christiaens, 2015)

Avec

- | | |
|--------------------|-------------------------------|
| ① Sas | ⑤ Portes |
| ② Radier | ⑥ Bollard de couronnement |
| ③ Bajoyers | ⑦ Bollard flottant |
| ④ Têtes (d'écluse) | ⑧ Organeau (bollard encastré) |

Concernant le déroulement du passage d'un bateau du bief aval au bief amont, la procédure se décompose en plusieurs grandes étapes, illustrée sur la Figure 2-10 :

1. La vidange du sas.
2. L'ouverture des portes en aval.
3. L'entrée du bateau et la mise en amarre.
4. Le remplissage du sas.
5. L'ouverture des portes en amont.
6. La sortie du bateau.

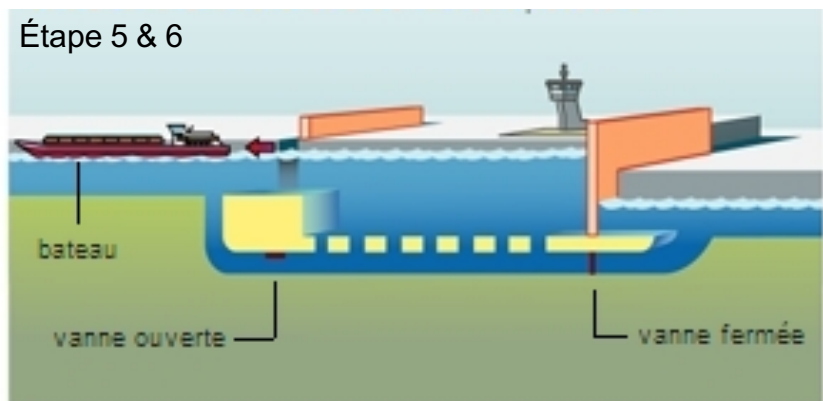
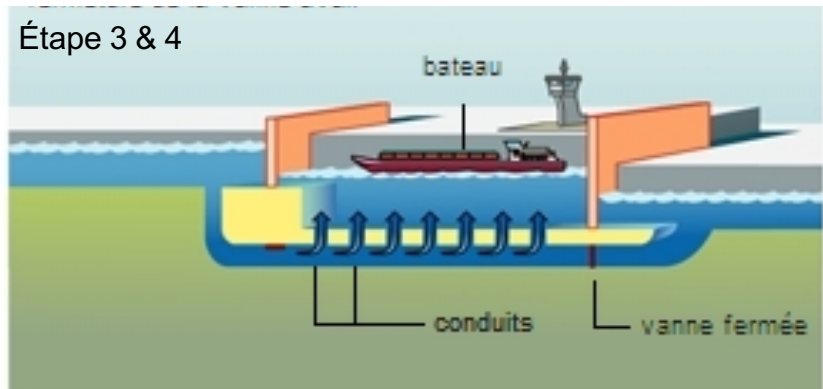
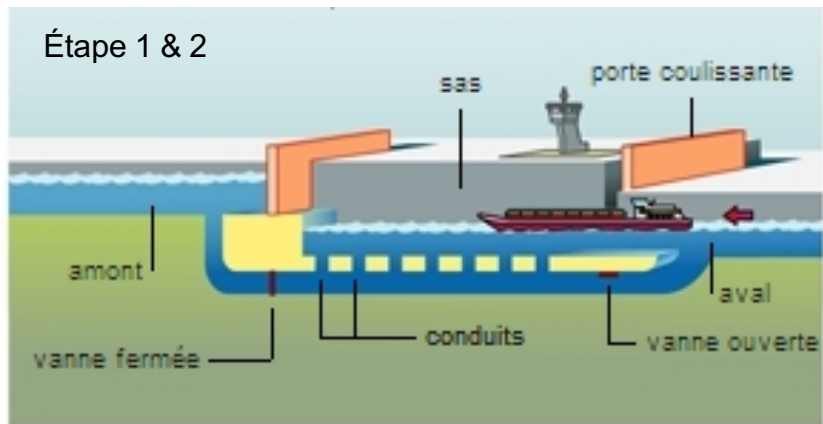


Figure 2-10 : Déroulement du passage du bief amont au bief aval (Larousse, 2020)

Pour le parcours inverse, soit le passage du bief amont au bief aval, la procédure s'inverse.

2.2.2 Système de remplissage et de vidange

Tous les systèmes d'écluse fonctionnent par gravité. Lors du remplissage, le transfert d'eau s'effectue du bief amont vers le sas et lors de la vidange du sas vers le bief aval. Le dimensionnement et le choix du système de remplissage/vidange de l'écluse doivent tenir compte des critères suivants (Bousmar, 2020) :

- Le cout du système.
- La durée de sassement.
- Les turbulences de l'eau dans le sas.
- La sécurité.
- Le trafic et l'encombrement.
- La hauteur de chute.
- La cavitation au niveau des vannes.
- Les turbulences dans les chenaux¹ (onde de sassement).

Il existe 3 principaux systèmes de remplissage/vidange. Le choix du système à utiliser dépend de la hauteur à franchir (Bousmar, 2020).

a) Alimentation par les têtes

- L'ouverture de porte (Figure 2-11) :
Pour des hauteurs de chutes bien inférieures à 3 m, on joue avec l'ouverture de porte afin de remplir/vider le sas. Les portes sont utilisées comme des vannes. Ce système crée des phénomènes de surverse et de souverse. Pour dissiper ceux-ci on installe une chambre de dissipation, une chicane ou un bassin de tranquillisation. Le système nécessite un séquençage adéquat des portes lors de l'ouverture et durant le sassement pour les maintenir ouvertes. De nos jours, ce système est très rarement utilisé car il ne permet pas un contrôle adéquat (Bousmar, 2020).

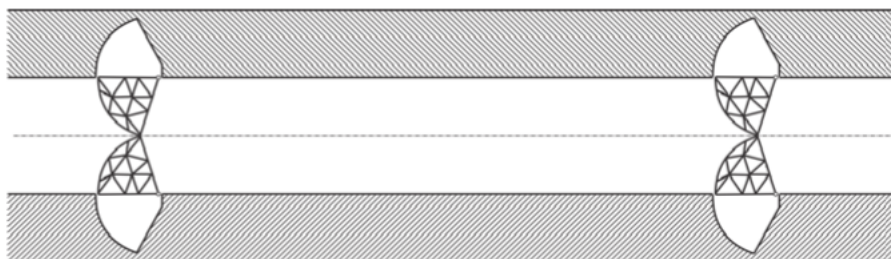


Figure 2-11 : Plan écluse - Alimentation par ouverture de portes (Christiaens, 2015)

- Les ventelles (Figures 2-12 et 2-13) :
Avec des hauteurs de chute inférieures à 5-6 m, on utilise un système de vannes placées directement dans les portes, appelé ventelles. Il s'agit d'une vanne coulissante sous forme d'une plaque mobile obstruant l'orifice au sein de la porte. Avec ce système, des ondes de sassement peuvent se développer tout au long du processus de remplissage, il faut donc limiter leur amplitude d'ouverture. Le coût de ce système reste très faible de par la simplicité de son fonctionnement (Bousmar, 2020).

¹ Chenal : il s'agit de la voie navigable que doivent suivre les bateaux sur le cours d'eau.

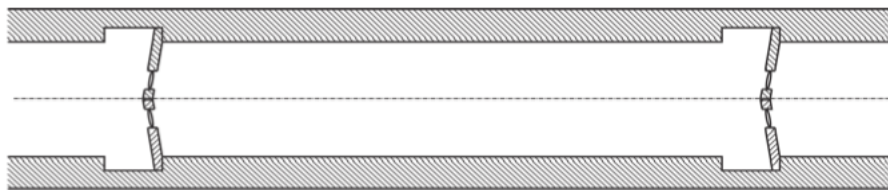


Figure 2-12 : Plan écluse - Alimentation par ventelles (Christiaens, 2015)

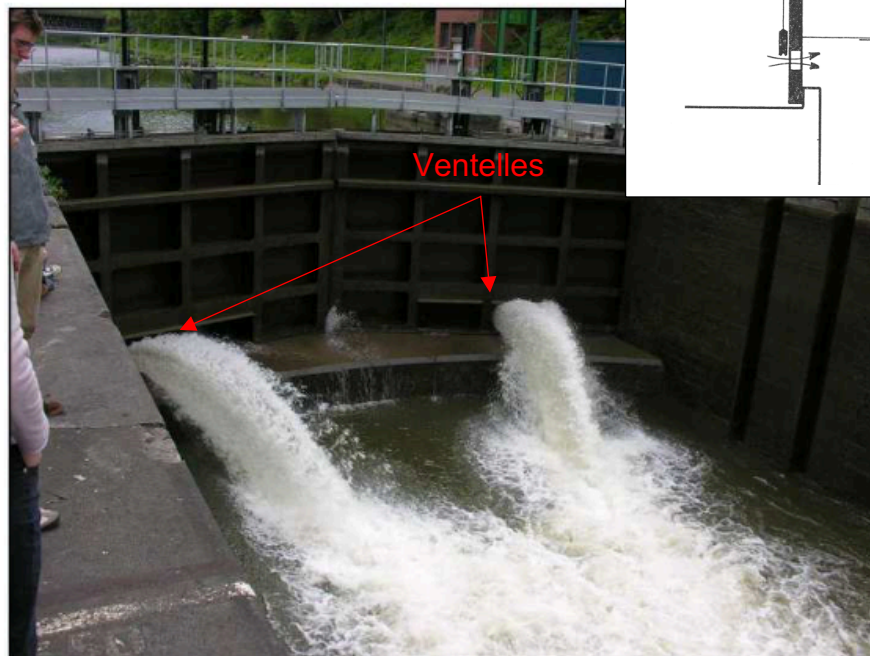


Figure 2-13 : Image écluse - Alimentation par ventelles (Bousmar, 2020)

- Le contournement des têtes, aqueducs courts (Figure 2-14) :
 Pour les chutes allant jusqu'à 10 m et dans l'optique de mieux dissiper l'énergie, on place 2 conduites courtes, appelées aqueducs, de chaque côté des portes amont et aval. Une vanne est placée dans chacun des 4 aqueducs. La prise d'eau et le rejet d'eau sont réalisés de manière symétrique, au-devant et à l'arrière de chaque port, afin que les jets sortant des bajoyers se rencontrent de face et se dissipent mutuellement. Afin d'éviter les perturbations liées au fait que le remplissage ne se réalise qu'à l'abord de la porte, une chambre de dissipation peut être placée en dessous du radier amont (Bousmar, 2020).

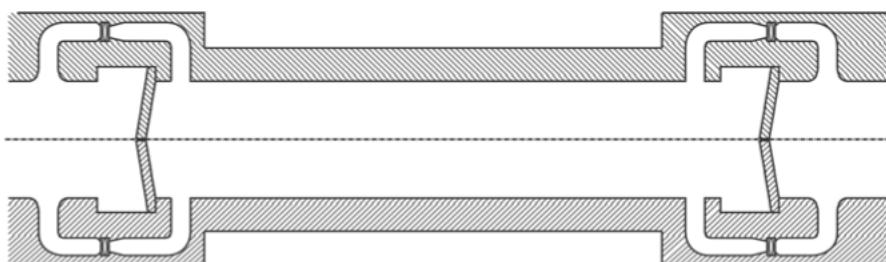


Figure 2-14 : Plan écluse - Alimentation par contournement des têtes (Christiaens, 2015)

b) Alimentation par aqueducs longs et larrons (Figures 2-15 et 2-16)

Lorsque la hauteur de chute est inférieure à 20 m, on installe 2 aqueducs au sein de chaque bajoyer et ceux-ci communiquent avec le sas via une multitude de conduites courtes, appelé larrons. Les larrons sont placés de manière symétrique, les uns en face des autres, le long du bajoyer afin que les jets se dissipent mutuellement lors du remplissage. Le dispositif d'aqueduc long permet une meilleure répartition du débit lors du remplissage, les débits sont similaires dans chaque larron mais pas complètement identiques. Ce problème ne peut être résolu étant donné que les aqueducs de remplissage servent aussi à la vidange (Bousmar, 2020).

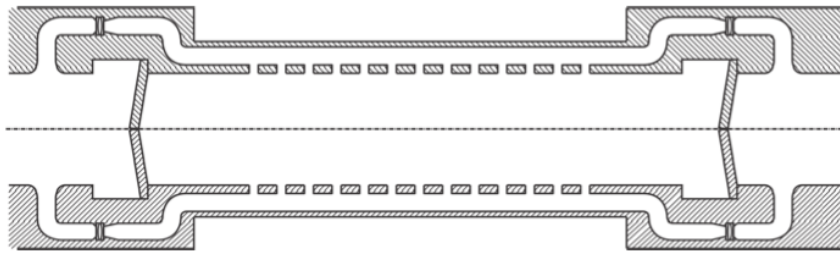


Figure 2-15 : Plan écluse - Alimentation par aqueducs-larrons (bajoyers) (Christiaens, 2015)



Figure 2-16 : Image écluse - Alimentation par aqueducs-larrons (Bousmar, 2020)

c) Alimentation par équi-répartition du débit (Figures 2-17 et 2-18)

Pour les hauteurs de chute allant jusqu'à 35 m, l'équi-répartition du débit permet de limiter de manière plus efficace les perturbations de l'eau lors du remplissage. Le dispositif consiste à faire varier la taille des ouvertures et la disposition des aqueducs afin d'obtenir un débit homogène sur toute la surface du sas. De ce fait, les pertes de charges dans les aqueducs doivent être identiques afin de garantir un débit équivalent à toutes les sorties. Les sorties sont placées dans le radier (Figure 2-17). La complexité du système rend son coût de conception et

construction très élevée car il nécessite un terrassement plus important. Mais également son coût d'entretien car les conduites sont de plus en plus petites en fin d'aqueduc et peuvent être facilement obstruées (Bousmar, 2020).

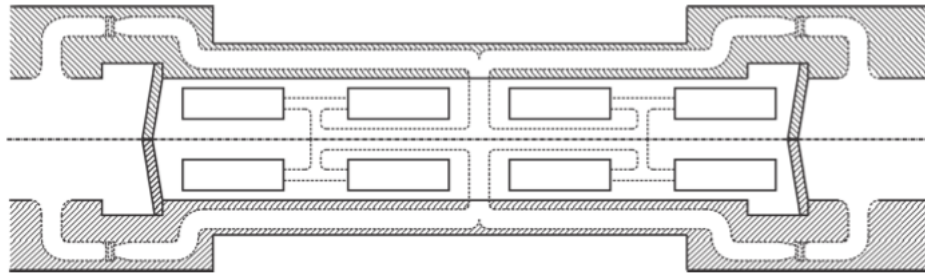


Figure 2-17 : Plan écluse - Alimentation par équi-répartition du débit (radier)(Christiaens, 2015)



Andenne, Meuse

Figure 2-18 : Image écluse - Alimentation par le radier (Bousmar, 2020)

2.3 Mode dégradé

L'expression "mode dégradé" est utilisé lorsque l'Outil, l'écluse ne peut pas fonctionner avec les ressources normales. Les ressources manquantes peuvent être d'origine multiple ; dans notre cas, vanne bloquée, aqueducs bouchés, problème électronique/informatique, ... Ainsi, fonctionner en mode dégradé, c'est fournir le service essentiel, vital en attendant de retrouver une situation normale. Dans notre cas, c'est continuer d'assurer les sassements (Wikipédia, 2020).

Pour les écluses pourvues d'un système d'alimentation par aqueducs-larrons, le cas d'étude, nous avons :

- **Mode symétrique (Figure 2-19)**

Le mode symétrique est le mode par défaut. Des vannes sont installées entre les biefs et les aqueducs afin de dicter et contrôler le remplissage et la vidange du sas. La symétrie des ouvertures permet aux jets de se dissiper mutuellement (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

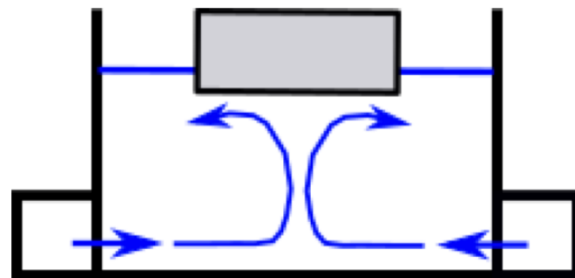


Figure 2-19 : Coupe - Remplissage symétrique (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

- **Mode dégradé (Figures 2-20 et 2-21)**

Lorsque l'une des vannes et/ou l'un des bajoyers est en maintenance ou en panne/obstrué, le remplissage et la vidange ne se font plus que par un côté, appelé le mode dégradé.

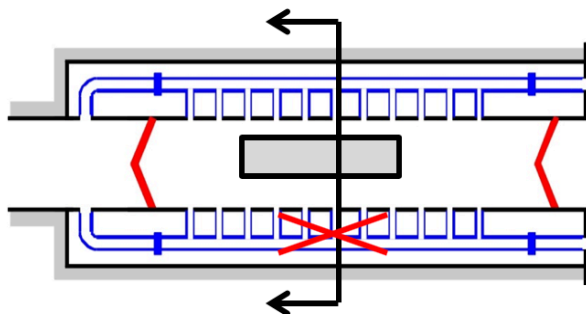


Figure 2-20 : Plan - Écluse par aqueducs-larrons en mode dégradé (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

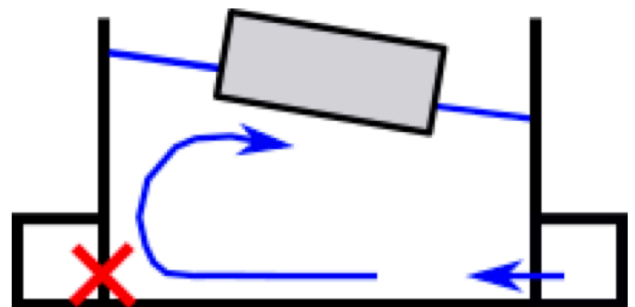


Figure 2-21 : Coupe- Remplissage dégradé (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

Lors d'un remplissage en mode dégradé, plusieurs inconvénients apparaissent. Il s'agit d'un temps de sasement augmenté et de perturbations de l'eau plus importantes. Le jet d'eau sortant des éjecteurs du côté fonctionnel n'est plus dissipé par le jet de l'éjecteur opposé. Ce jet vient alors frapper le bajoyer opposé créant un flux rotationnel et une pente d'eau plus importante. Ces phénomènes augmentent les efforts subis par les amarres et cela engendre des problèmes de sécurité (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Reding, 2013).

2.4 Efforts d'amarrage

"Les amarres sont des câbles ou cordage servant à relier un navire à un point fixe" (Larousse, 2020).

Leur rôle est de maintenir le bateau dans une position stable contre le bajoyer pendant une opération de sasement. Lors du remplissage et de la vidange d'une écluse, les bateaux doivent s'amarrer aux bajoyers de l'écluse via les têtes d'amarrage pour éviter les déplacements transversaux et longitudinaux. Comme présenté précédemment à la section 2.2.1 et illustré à la Figure 2-8, les têtes d'amarrage situées en tête de bajoyer sont appelées des bollards et celles situées verticalement dans le bajoyer sont appelées des organeaux. En général, on utilise au minimum deux amarres : une amarre fixée à la proue du bateau et l'autre à la poupe. Cette configuration est visible sur la Figure 2-22 (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Reding, 2013).



Figure 2-22 : Configuration d'un bateau amarré dans le sas d'une écluse (Christiaens, 2015)

La conception d'une écluse est une réflexion poussée aboutissant sur des compromis portant sur les critères présentés précédemment à la section 2.2.2. Le critère de la sécurité englobe les agitations de l'eau lors du sasement qui induisent des efforts sur le bateau. Ces efforts sont transmis dans le système d'amarrage qui doit y résister. Ainsi l'effort maximal supporté par les amarres lors d'un sasement est un critère déterminant (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Reding, 2013).

Lors du sasement, les courants d'eau provoquent des pressions sur la carène du bateau. Ces pressions exercent une tension sur les amarres et peuvent rendre le sasement dangereux. En cas de perturbation trop importante, une rupture d'amarre peut provoquer des accidents susceptibles d'endommager les bateaux ou la structure propre de l'écluse lors de collision entre les bateaux et/ou le(s) bateau(x) avec l'écluse.

Le PIANC², acronyme de Permanent International Association for Navigation Congresses, fait état des recommandations visant à limiter les risques d'accident et à maintenir un sasement confortable pour les bateliers. Les recommandations portent sur les valeurs admissibles des efforts d'amarrage. Ces critères sécuritaires peuvent varier en fonction des pays et de la catégorie des convois (Direction des Recherches hydrauliques, 2016 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Savary, Bousmar et Swartenbroekx, 2013).

² PIANC, en français le AIPCN, est une association fondée en 1885 par le roi Léopold II de Belgique. Elle s'occupe de manière générale de tout ce qui touche de près ou de loin aux voies navigables. Cela passe par l'étude, la recherche, la construction et la maintenance des voies navigables mais également par la navigation maritime, intérieure et touristique (PIANC, 2020).

Étant donné que l'évaluation des efforts d'amarrage sur site n'est pas aisée, les recommandations portent sur la mesure des pentes d'eau dans le sas. Le chapitre 3 de ce mémoire présentera plus longuement ces recommandations ainsi que la relation liant les pentes d'eau et les efforts d'amarrage.

Il est également nécessaire de clarifier la différence entre les efforts d'amarrage longitudinaux et transversaux d'un point de vue directionnel. Comme illustré sur la figure ci-dessous (Figure 2-23), la direction longitudinale caractérise la direction entre l'amont et l'aval. Quant à la direction transversale, elle caractérise la direction entre la rive gauche et la rive droite.

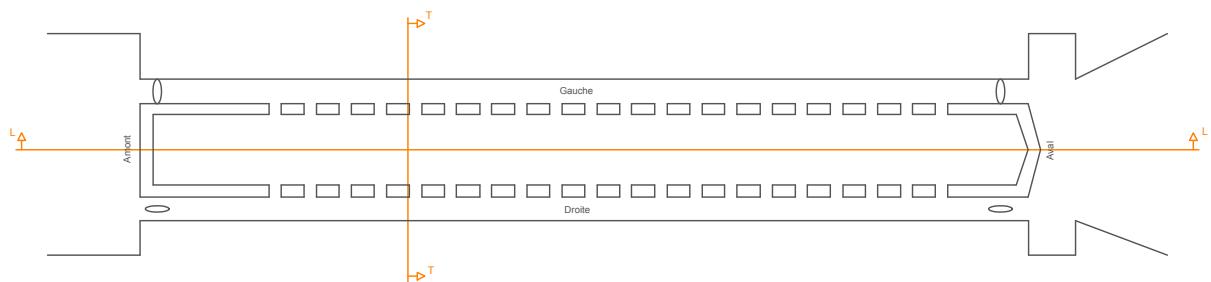


Figure 2-23 : Plan écluse - Directions

2.5 La 4^{ème} écluse de Lanaye

2.5.1 Contexte

Le complexe éclusier de Lanaye illustré à la Figure 2-24, situé sur le territoire belge, relie le Canal Albert à la Meuse "Néerlandaise" et son dénivelé est de 13,68 m. Il assure la liaison entre la Belgique et les Pays-Bas afin d'offrir l'accès au port de Rotterdam et à l'ensemble du bassin du Rhin et du Danube vers l'Allemagne. Dans le sens Pays-Bas – Belgique, il donne accès au port d'Anvers et au réseau wallon permettant par-là de rejoindre la France. Il s'agit d'un lieu stratégique de la navigation fluviale européenne.

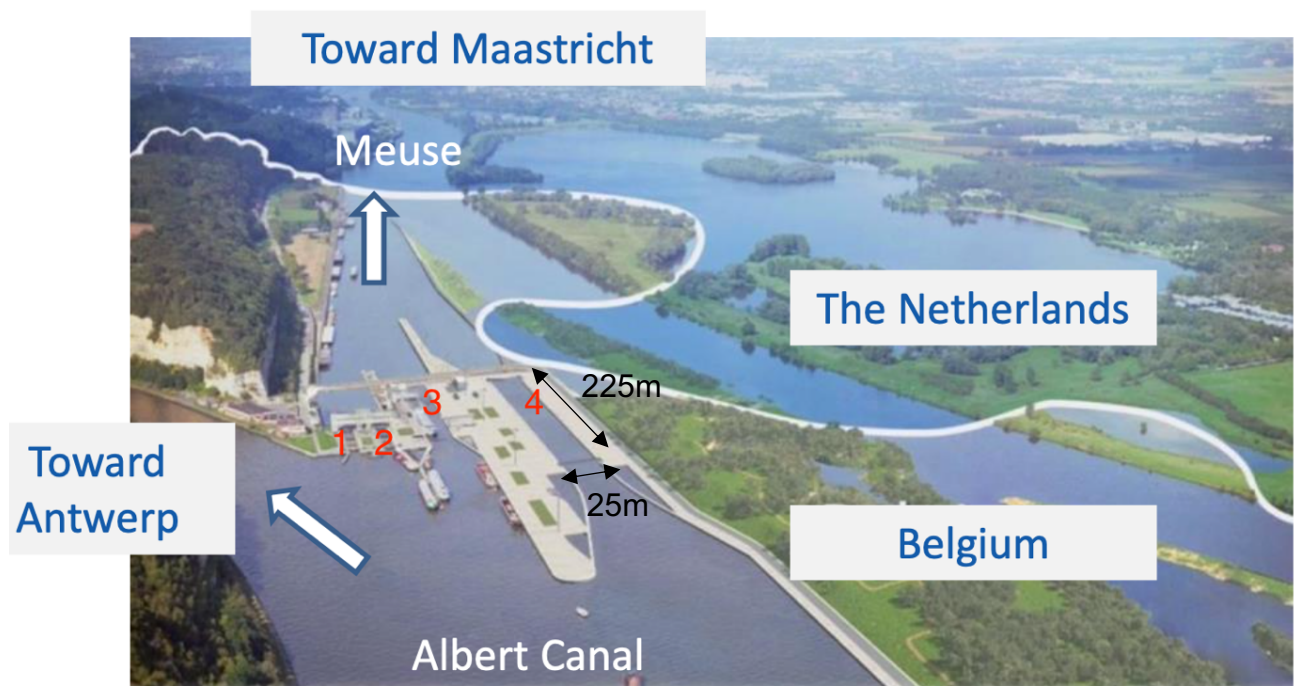


Figure 2-24 : Vue aérienne du complexe éclusier de Lanaye (Langendries, 2015)

En 1996, le site de Lanaye fut inscrit au titre de chaînon manquant du réseau transeuropéen de transport (TEN-T). En effet, Lanaye se situe sur l'axe prioritaire du transport fluvial Rhin-Meuse-Danube et figure comme priorité 18 sur les 30 projets prioritaires à réaliser dans le cadre du TEN-T (Société Wallonne de Financement Complémentaire des Infrastructures, 2008).

Historiquement, le site disposait de trois écluses : deux petites écluses de 55x7,5m mises en service en 1934 (n°1 et 2 sur la Figure 2-24) pour des bateaux de maximum 600 tonnes chacune et des bateaux de plaisance et une écluse de 136x16m, mise en service en 1963 (n°3 sur la Figure 2-24) pour des bateaux de 2000 tonnes (Classe Va).

Afin de répondre à la fois à l'augmentation du trafic, au volume de transport, à l'amélioration de la mobilité en supprimant au maximum les temps d'attente et à l'homogénéisation de la taille des écluses sur la Meuse entre Namur et Liège (Figure 2-25), il fut décidé de construire une 4^{ème} écluse de grand gabarit (Classe VIb) pour un coût total de 153 millions d'euros (Prevot, 2015).

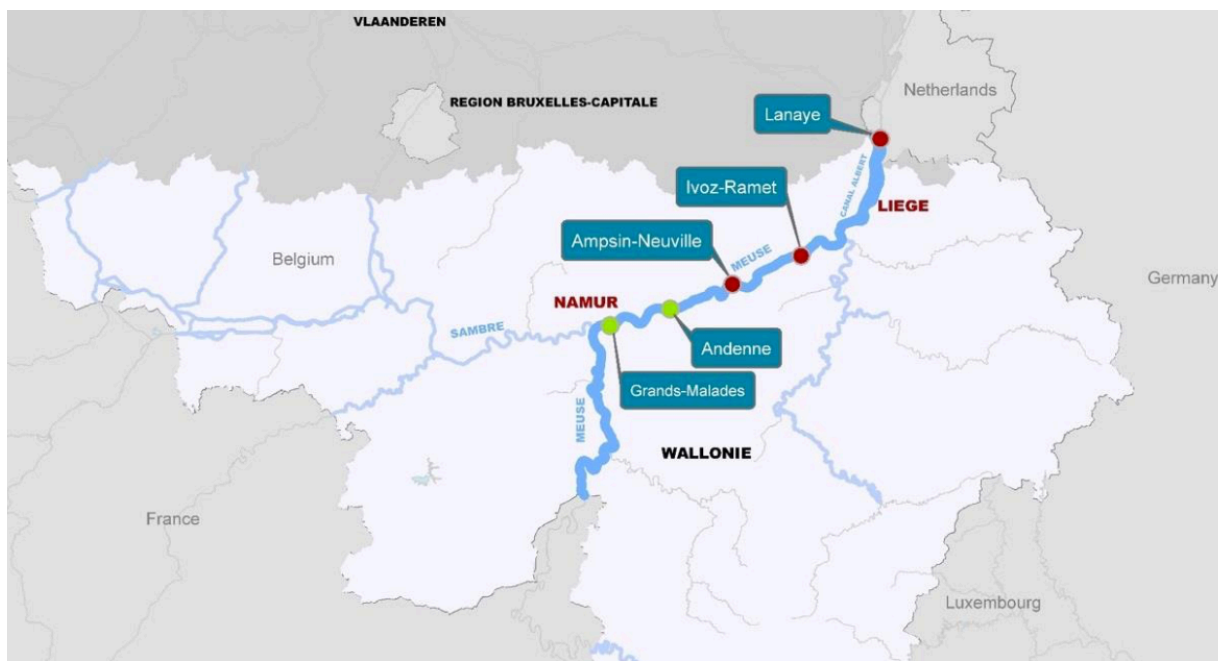


Figure 2-25 : Carte de la navigation fluviale en Wallonie et localisation de Lanaye (Langendries, 2020)

Les travaux de terrassement de cette écluse ont débuté en 2011 et l'écluse fut inaugurée par le Roi des Belges, Philippe 1^{er}, le 13 Novembre 2015.

Ses dimensions atteignent une longueur utile de 225 m, une largeur de 25 m et une chute de 13,68 m. Elle permet le passage de convoi de 9000 tonnes (Classe VIb). Le système d'alimentation est un système par aqueducs et larrons (Figure 2-26), présenté précédemment. Les vannes qui alimentent l'écluse sont des vannes papillons (Figure 2-27) de 3,5 m de diamètre (Reding, 2013).

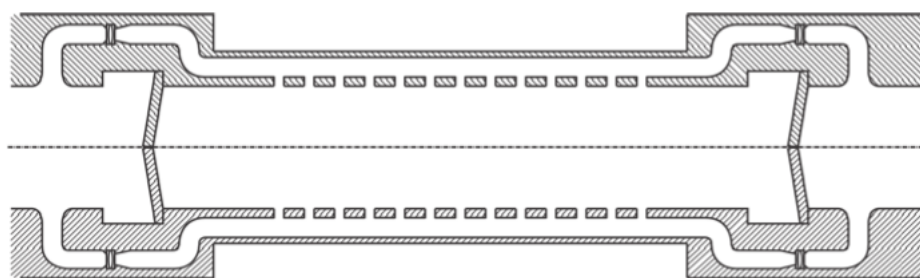


Figure 2-26 : Plan écluse type - système d'alimentation par aqueducs-larrons (Christiaens, 2015)

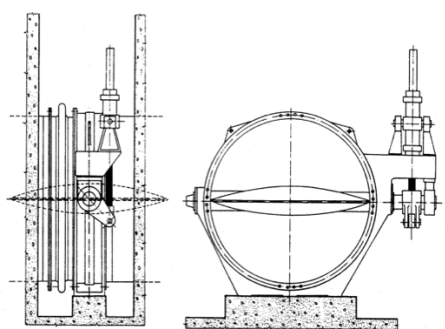


Figure 2-27 : Vanne papillon de la 4^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

2.5.2 Recommandations

▪ Recommandations préalables :

Préalablement à la mise en service de la 4^{ème} écluse de Lanaye, la Direction des Recherches hydrauliques en collaboration avec la Direction de l'Expertise des Ouvrages a réalisé une campagne de mesure sur site (Direction des Recherches hydrauliques, 2016 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Savary, Bousmar et Swartenbroekx, 2013).

Cette campagne avait pour but de vérifier le bon fonctionnement de l'écluse ainsi que le respect des critères imposés lors du dimensionnement. Elle visait par ailleurs à vérifier les hydrogrammes, les limnigrammes et les temps de sasement pour différentes opérations de sasement. Les essais ont aussi permis d'étudier les ondes de sasement et la cavitation au niveau des vannes (Direction des Recherches hydrauliques, 2016 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Savary, Bousmar et Swartenbroekx, 2013).

Pour un remplissage en mode dégradé, étant le sujet d'étude de ce présent travail, des essais ont également été réalisés pour une loi linéaire A préconisée lors du dimensionnement. Étant donné qu'il n'est pas facile d'évaluer les efforts d'amarrage sur site, ceux-ci sont évalués à partir des mesures des pentes d'eau. Comme il sera expliqué plus loin, la pente d'eau est représentative des efforts appliqués sur le bateau. Les essais ont permis d'observer une pente transversale importante, atteignant 6,5 ‰, soit 13 fois la valeur admissible comme on peut l'observer sur la Figure 2-28. La loi A préconisée permet une ouverture de la vanne de 0° à 90° en 9 minutes (Figure 2-29) (Direction des Recherches Hydrauliques, 2016 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Savary, Bousmar et Swartenbroekx, 2013).

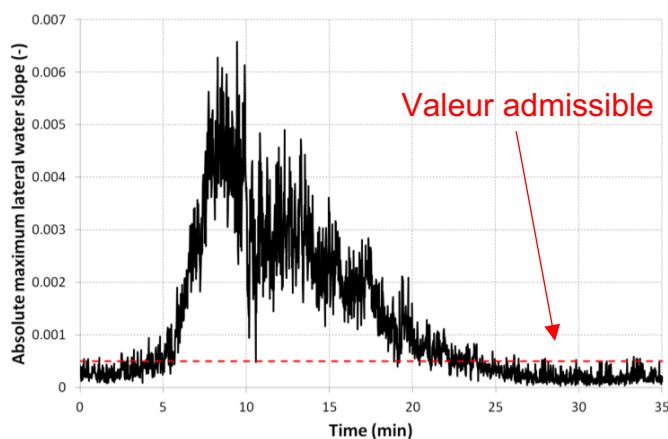


Figure 2-28 : Pente d'eau en mode dégradé de la 4^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

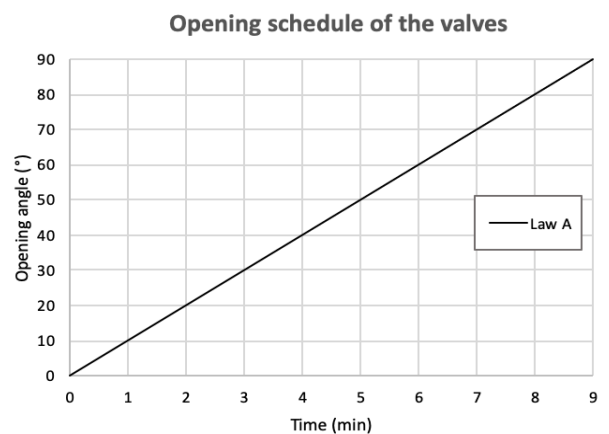


Figure 2-29 : Loi d'ouverture A de la 4^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

Les pentes d'eau dans le sas pendant le sasement doivent rester inférieures à la valeur admissible de 0,5 ‰, paramètre i dans la Figure 2-30, qui correspond à la valeur sécuritaire proposé par le PIANC.

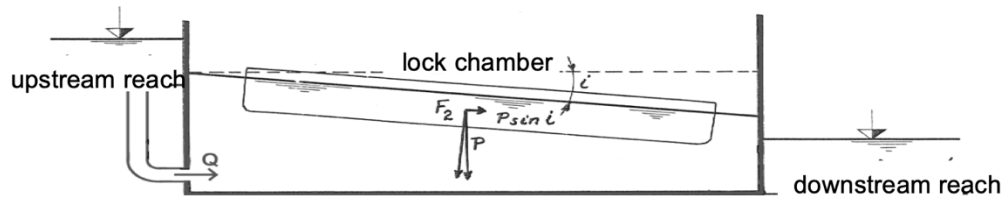


Figure 2-30 : Pente de la surface libre (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

L'étude de la campagne de mesures a permis d'établir diverses recommandations. Pour un remplissage en mode dégradé, il a été recommandé de :

- Amarrer les bateaux du côté de l'aqueduc en fonctionnement, de cette manière les courants maintiennent le bateau contre le bajoyer pendant le sasement (Figure 2-21).
- Éviter d'avoir plusieurs bateaux sur la largeur du sas (Direction des Recherches Hydrauliques, 2016 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Savary, Bousmar et Swartenbroekx, 2013).

▪ **Incident :**

Quelques mois après la mise en service de l'écluse, la vanne amont du bajoyer droit n'était plus fonctionnelle. Dès lors le remplissage se réalisait en mode dégradé avec l'aqueduc gauche comme étant l'aqueduc fonctionnel. Le 13 juillet 2016, un incident s'est produit :

Situation initiale

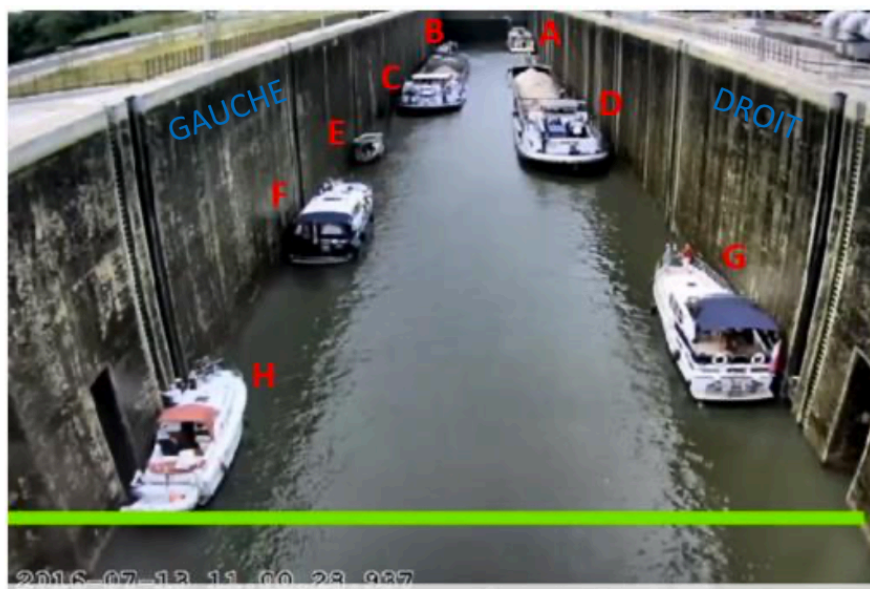


Figure 2-31 : Situation initiale avant bassin à la 4^{ème} écluse de Lanaye (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

La figure ci-dessus (Figure 2-31) montre la position des bateaux avant le remplissage. On peut déjà constater que les recommandations émises par la DRH n'ont pas été respectées :

- Les bateaux A, D et G ne sont pas amarrés du côté de l'aqueduc fonctionnel (côté gauche).
- Les bateaux A et B, C et D, D et E sont placés sur la même largeur du sas, ce qui est à éviter (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

Après ouverture des vannes

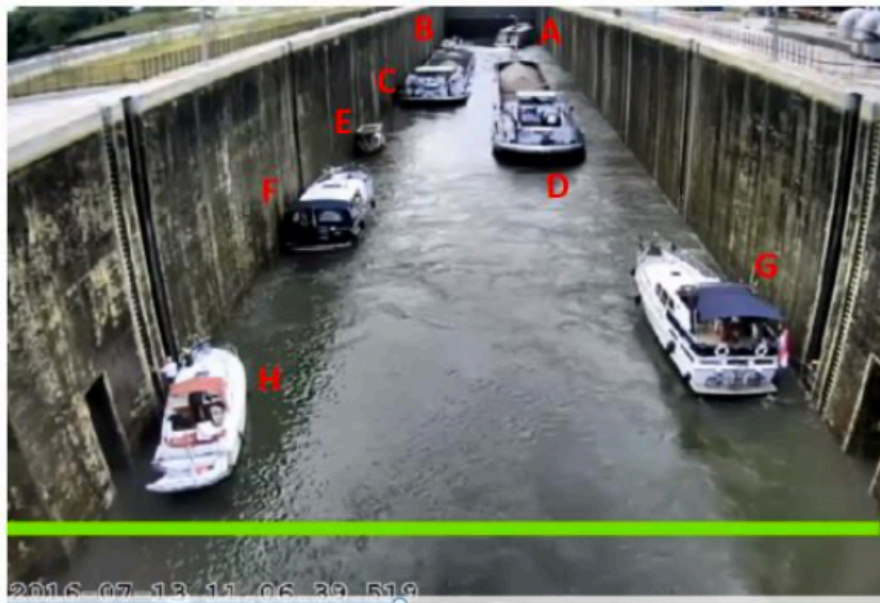


Figure 2-32 : Situation durant la bassin à la 4ème écluse de Lanaye (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

La figure ci-dessus (Figure 2-32) illustre la situation quelques minutes après l'ouverture des vannes. On observe que les bateaux A et D sont déplacés vers le milieu du sas depuis le bajoyer droit (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

Situation critique

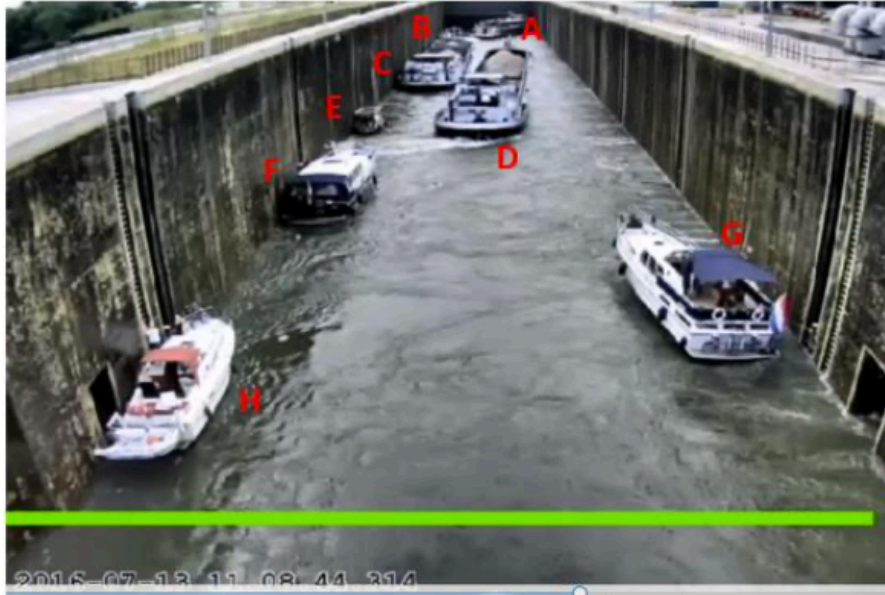


Figure 2-33 : Situation critique durant la bassinnet à la 4^{ème} écluse de Lanaye (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

On atteint la situation critique quelques minutes plus tard, illustrée sur la figure ci-dessus (Figure 2-33). On remarque que le bateau A s'est rapproché dangereusement du bateau B et que le bateau D a atteint une situation critique, il doit redémarrer ses moteurs pour éviter l'accident avec les bateaux B et C (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

■ Recommandations adaptées :

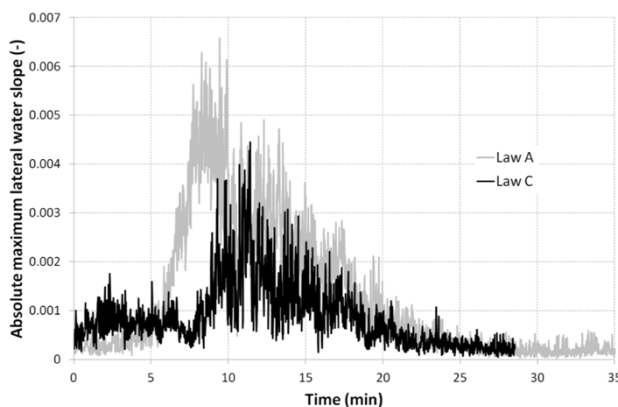


Figure 2-34 : Pente d'eau en mode dégradé de la 4^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

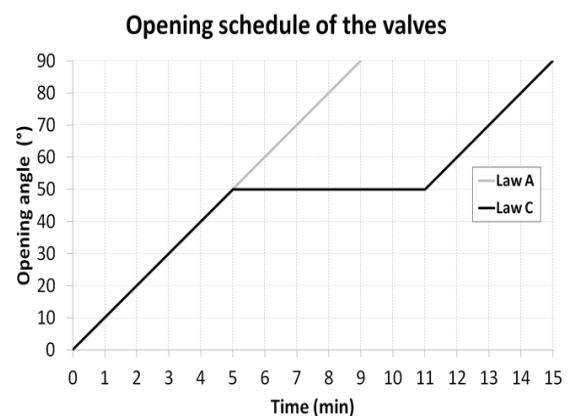


Figure 2-35 : Loi d'ouverture A et B de la 4^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)

Faisant suite aux événements du 13 juillet 2016, la Direction des Recherches Hydrauliques a décidé de réaliser une nouvelle campagne de mesures afin de déterminer une loi d'ouverture optimale permettant de diminuer les pentes d'eau transversale lors d'un remplissage en mode dégradé, mais en conservant un temps de sasement acceptable.

Après divers essais, la DRH a choisi la loi C avec une pente transversale en mode dégradé mesurée de 4 ‰. On passe d'une pente transversale de 6,5 ‰ (loi A) à 4 ‰ (loi C), soit une diminution de 2,5 ‰ (Figure 2-34). La loi C est une loi linéaire similaire

à la loi A jusqu'à la 5^{ème} minute, soit un angle d'ouverture de 50°. Ensuite, l'ouverture reste constante jusqu'à la 11^{ème} minute, soit un palier de 6 minutes. La loi reprend sa progression linéaire pour atteindre son ouverture complète de 90° à la 15^{ème} minute (Figure 2-35).

Cependant cette loi C ne permet toujours pas de respecter la valeur admissible de 0,5 ‰, valeur conservateur, permettant d'assurer la sécurité des bateaux et de l'ouvrage lors des sassements en mode dégradé.

La DRH recommande donc d'utiliser la loi C et de conserver les 2 recommandations préalables suivantes :

- Amarrer les bateaux du côté de l'aqueduc en fonctionnement.
- Éviter d'avoir plusieurs bateaux sur la même largeur du sas (Direction des Recherches Hydrauliques, 2016 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Savary, Bousmar et Swartenbroekx, 2013).

2.5.3 Études ultérieures

Suite aux incidents rencontrés et aux recommandations fournies, un travail de fin d'étude a été consacré aux "Efforts d'amarrage transversaux lors du remplissage en mode dégradé d'une écluse à aqueducs-larons" (El Ouamari et Lenaerts, 2019). Ce travail, basé sur des mesures sur modèle réduit, a permis de :

- Valider expérimentalement l'importance des efforts d'amarrage transversaux en mode dégradé par rapport aux efforts longitudinaux de manière générale.
- Établir le lien entre pentes d'eau et efforts d'amarrage transversaux.
- Décrire l'écoulement en travers du sas lors d'un remplissage en mode dégradé.
- Étudier l'influence de la loi d'ouverture de vannes sur les efforts d'amarrage.
- Étudier l'influence de la position de la barge sur les efforts d'amarrage.
- Étudier l'influence de la taille des éjecteurs sur le comportement de l'écoulement.

Ce travail a également permis de soulever de nouvelles interrogations et perspectives à étudier :

- Comparer les résultats obtenus en laboratoire avec ceux obtenus sur site.
- Comparer les résultats du modèle réduit avec les résultats d'un éventuel modèle numérique (existant ou à réaliser).
- Compléter la campagne d'essais réalisés sur modèle réduit :
 - Les champs de vitesse mesurés lors des différents tests l'ont été pour un maillage allant jusqu'à 24 cm de hauteur. L'analyse des champs de vitesse a mis en évidence que le phénomène giratoire se passait surtout juste sous la surface de l'eau. L'installation des sondes de vitesse directement fixées au bateau permettrait ainsi la prise de mesure de vitesse en continu sous la surface libre.

- Les mesures de champs de vitesse n'ont été réalisées que pour un temps d'ouverture en 30s. Ces tests pourraient aussi être réalisés pour des temps d'ouverture plus long (60s et 90s). L'intérêt est de vérifier et de quantifier le lien qui existe entre les temps d'ouverture et l'intensité du phénomène giratoire.
- Améliorer le modèle conceptuel des champs de vitesse au sein du sas. Pour le moment, les débits calculés analytiquement ne correspondent pas à ceux déduits des vitesses mesurées en laboratoire.
- Envisager d'autres lois d'ouverture de vanne pour l'étude de leur influence sur les efforts d'amarrage, par exemple une loi d'ouverture par palier.
- Rechercher, pour la comparaison entre éjecteurs de tailles différentes, les lois d'ouvertures respectives permettant des temps de remplissage ou des courbes de débit similaires.
- Envisager l'étude sur une barge de plus petit gabarit. En effet, dans le cas de l'incident à l'écluse de Lanaye, les bateaux présents étaient de dimensions beaucoup plus petites. L'influence de leur présence sur l'écoulement est moindre.
- Explorer la création d'un modèle conceptuel permettant de déduire directement la force hydrodynamique appliquée sur la barge
- Explorer et comparer le sens de la pente d'eau et du roulis. En effet, lors de l'analyse, le roulis était inverse à la pente d'eau (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

3 Efforts d'amarrage : État de l'art

Historiquement, seuls les efforts d'amarrage longitudinaux étaient considérés pour déterminer le critère sécuritaire, celui-ci étant le plus impactant. Hors, les phénomènes hydrauliques créés lors du sassement génèrent des efforts **longitudinaux et transversaux** avec impact sur le bateau amarré (Christiaens, 2015).

Les références scientifiques actuelles offrent essentiellement des descriptions et des illustrations relatives aux efforts d'amarrage longitudinaux lors d'un remplissage par les têtes. Cette configuration est partiellement transposable aux efforts d'amarrage transversaux lors d'un remplissage en mode dégradé mais permet surtout de prendre connaissance des différents intervenants. Les schémas de référence (Figure 3-1 à 3-6) présentés dans la section 3.1 ont été établis pour illustrer les efforts longitudinaux. Ils sont également illustratifs des efforts transversaux s'ils sont considérés, non pas comme des coupes longitudinales, mais comme des coupes transversales du sas (Christiaens, 2015 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019).

3.1 Différentes composantes des efforts d'amarrage

3.1.1 Efforts d'amarrage longitudinaux

Pour commencer, il est utile de clarifier le sens des grandeurs physiques abordées dans la section et illustré sur la Figure 3-1 :

- **L'effort transversal F** est défini positif lorsque celui-ci est orienté vers la rive aval de l'écluse.
- **La pente d'eau** est définie positive lorsque le niveau d'eau de la rive amont est supérieur au niveau d'eau de la rive aval.

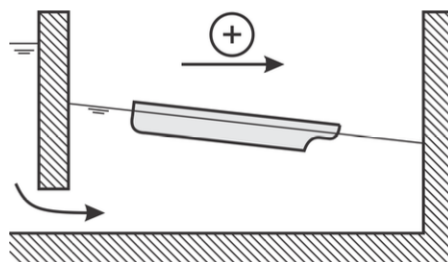


Figure 3-1 : Convention de signe (Christiaens, 2015)

Les différentes composantes hydrauliques sont illustrées et détaillées ci-dessous :

- La force due à la **pente d'eau (Figure 3-2)** :

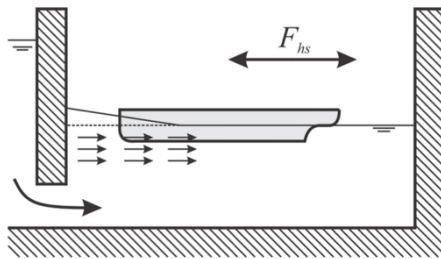


Figure 3-2 : Force hydrostatique F_{hs}
(Christiaens, 2015)

Les vagues longitudinales induisent une différence de niveau d'eau ou pente d'eau. Une pression hydrostatique apparaît sur la carène du bateau due à la différence de niveau d'eau entre la proue et la poupe. Étant donné que cette pente d'eau peut être positive ou négative due au mouvement de va-et-vient des vagues lors d'un remplissage en mode dégradé, la force induite par cette composante est donc dans les deux sens (Christiaens, 2015 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Reding, 2013).

- La force due à la diminution de la **quantité de mouvement (Figure 3-3)** :

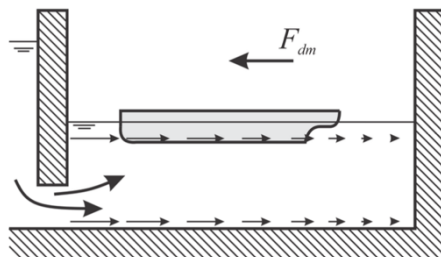


Figure 3-3 : Diminution de la quantité de mouvement F_{dm} (Christiaens, 2015)

La quantité de mouvement est proportionnelle au produit de la vitesse de l'eau et du débit. Plus on s'éloigne de l'éjecteur fonctionnel plus la vitesse diminue. Cette diminution induit une diminution de la quantité de mouvement qui engendre une différence de pression hydrodynamique et donc une force négative (Christiaens, 2015 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019).

La force due au **frottement de l'eau (Figure 3-4)** :

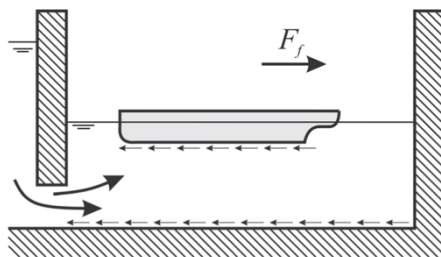


Figure 3-4 : Force de frottement F_f
(Christiaens, 2015)

La friction produite sur la carène du navire génère une force positive. Celle appliquée sur les parois du sas induit également une force positive. Le TFE réalisé par Tom Heinz a permis de confirmer que cette composante-ci est négligeable par rapport aux autres composantes. Dès lors, cette composante ne sera pas considérée dans la suite de ce travail (Christiaens, 2015 ; Heinz, 2013).

▪ La force due aux jets d'eau (Figure 3-5) :

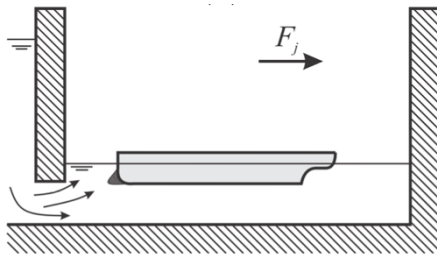


Figure 3-5 : Force des jets d'eau F_j (Christiaens, 2015)

En début de remplissage, lorsque le matelas d'eau du sas est faible, des jets d'eau viennent directement frapper la carène du bateau. Cet impact engendre une force positive. Cet effet n'est pertinent que pour l'opération de remplissage et son influence diminue avec l'augmentation du niveau d'eau. En effet, il agit uniquement sur la surface de la carène située en face de l'éjecteur et cette zone diminue avec l'élévation verticale du bateau lors du remplissage (Christiaens, 2015 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Heinz, 2013).

▪ La force due à la différence de densité (Figure 3-6) :

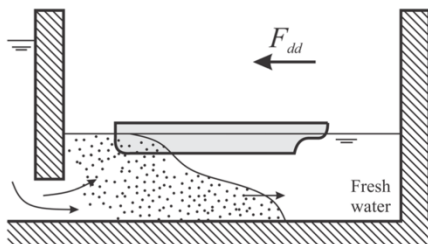


Figure 3-6 : Force due à la différence de densité F_{dd} (Christiaens, 2015)

Lors d'un sasement, il peut arriver que des eaux de densité différente soient mélangées dans le sas. Cette différence génère une force soit positive ou négative en fonction de la situation initiale du sas. On rencontre ce phénomène avec les écluses maritimes qui induisent un mélange entre l'eau salée et l'eau claire. Pour les écluses intérieures, cette influence n'est pas pertinente. Le modèle expérimental ne permettant pas de générer cette configuration, cette problématique ne sera pas abordée dans ce travail. (Christiaens, 2015 ; Reding, 2013).

Comme illustré sur la Figure 3-7 et vérifié lors des TFE de T. Heinz, de P. A. Reding et de R. Magotteaux, les deux composantes majeures de la force d'amarrage sont (El Ouamari et Lenaerts, 2019) :

- La force hydrostatique due à la différence de niveau d'eau dans le sas.
- La force hydrodynamique due à la vitesse de l'eau dans le sas.

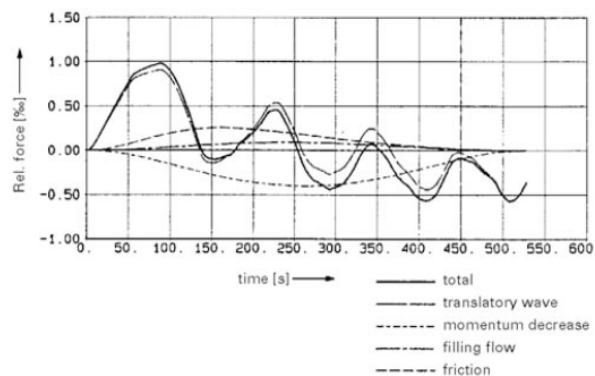


Figure 3-7 : Les différentes composantes de l'effort d'amarrage (Christiaens, 2015)

3.1.2 Efforts d'amarrage transversaux :

Il est également utile de définir le sens des grandeurs physiques abordées dans le sens transversal et illustré sur la Figure 3-8 :

- **L'effort transversal F** est défini positif lorsque celui-ci est orienté vers l'éjecteur non fonctionnel.
- **La pente d'eau** est définie positive lorsque le niveau d'eau de la rive avec l'éjecteur fonctionnel est supérieur au niveau d'eau de la rive avec l'éjecteur non fonctionnel.

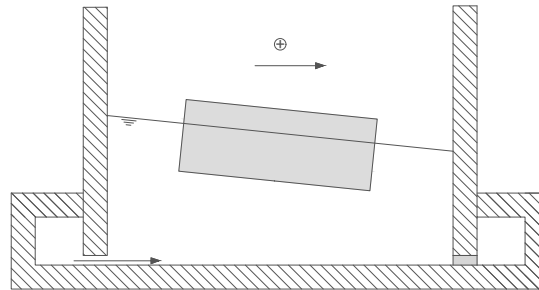


Figure 3-8 : Convention de singe – Transversale

Pour les efforts d'amarrage transversaux, aucune documentation scientifique et vérifiée n'est disponible. Les différentes composantes hydrauliques de l'effort transversal lors d'un remplissage en mode dégradé, présentées et illustrées ci-dessous, sont des hypothèses suite aux essais réalisés sur le modèle réduit et sur le modèle réel. Afin d'identifier les composantes hydrauliques transversales, ces essais ont été mis en relation avec les composantes hydrauliques longitudinales (présentées à la section 3.1.1), la configuration se rapprochant le plus d'un remplissage en mode dégradé en transposant le sens longitudinal en un sens transversal. On présente ci-dessous les trois composantes sur les cinq ayant le plus d'impact et pour lesquelles le comportement de l'eau dans le plan transversal est modifié.

▪ La force due à la pente d'eau (Figure 3-9) :

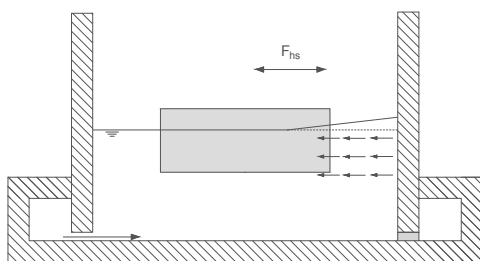


Figure 3-9 : Force hydrostatique F_{hs}

Les vagues transversales induisent une différence de niveau d'eau ou pente d'eau. Une pression hydrostatique apparaît sur la carène du bateau due à la différence de niveau d'eau entre les côtés bâbord et tribord. Étant donné que cette pente d'eau peut être positive ou négative due au mouvement de va-et-vient des vagues lors du remplissage, la force induite par cette composante est donc dans les deux sens (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

- La force due à la diminution de **la quantité de mouvement (Figure 3-10)** :

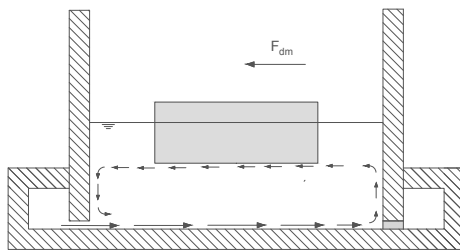


Figure 3-10 : Diminution de la quantité de mouvement F_{dim}

La quantité de mouvement est proportionnelle au produit de la vitesse de l'eau et du débit. Plus on s'éloigne de l'éjecteur plus la vitesse diminue. Le jet d'eau sortant de l'éjecteur fonctionnel se propage sur le fond du radier, remonte ensuite le long du bajoyer opposé puis reviens vers le bajoyer fonctionnel dans la partie supérieure du matelas d'eau pour finir par redescendre le long du bajoyer fonctionnel. Le mouvement de l'eau décrit, soit le champ de vitesse, va générer un effet giratoire et donc une force négative (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

- La force due **aux jets d'eau (Figure 3-11)** :

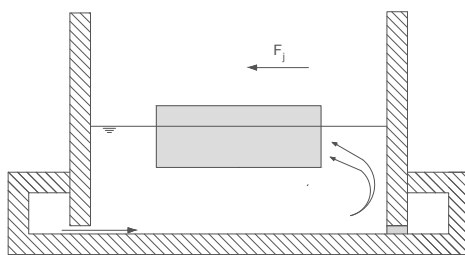


Figure 3-11 : Force des jets d'eau F_j

En début de remplissage lorsque le matelas d'eau du sas est faible, les jets d'eau se propagent sur le fond du radier. Ensuite, ils remontent le long du bajoyer et c'est le jet de retour qui vient frapper la carène du bateau. Cet impact engendre une force négative. Cet effet n'est pertinent que pour l'opération de remplissage et son influence diminue avec l'augmentation du niveau d'eau. Cette composante ne sera pas approfondie dans ce travail car il est difficile d'isoler et de quantifier son influence sur le modèle réduit utilisé (Christiaens, 2015 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Heinz, 2013).

3.2 Force hydrostatique

La force hydrostatique est induite par la pente d'eau dans le sas. Par analogie avec le phénomène physique où un objet placé sur une pente subit une force dans le sens de la pente proportionnelle à son poids. Nous avons, pour un bateau, une force proportionnelle au poids propre du bateau et de la pente d'eau (visible sur la Figure 3-12) (El Ouamari et Lenaerts, 2019) :

$$F_{hs} = P \cdot \sin(\theta_w)$$

Où :

$F_{hs}[kN]$: la composante hydrostatique de la force d'amarrage

$P[kN]$: le poids du bateau

$\theta_w[^\circ]$: l'angle d'inclinaison du plan d'eau

Étant donné que l'angle d'inclinaison des pentes d'eau généré par le sassement est très petit, nous pouvons approximer que :

$$F_{hs} = P \cdot \sin(\theta_w) \cong P \cdot \tan(\theta_w) = P \cdot S_w$$

Où :

$S_w = \tan(\theta_w)$: la pente de l'eau

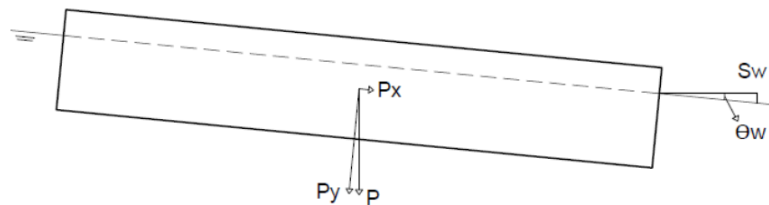


Figure 3-12 : Force hydrostatique - pente d'eau (Margotteaux, 2014)

3.3 Force hydrodynamique

La force hydrodynamique s'exprime comme la force de trainée résultant de la différence de pression appliquée sur la carène bâbord et tribord du bateau (El Ouamari et Lenaerts, 2019) :

$$F_{hd} = C_T \cdot \Delta p_{hd} \cdot l_B \cdot h_B$$

Où

$F_{hd}[kN]$: la composante hydrodynamique de la force d'amarrage

$C_T[-]$: le coefficient de trainée

$l_B[m]$: la largeur du bateau

$h_B[m]$: le tirant d'eau du bateau

$p_{hd}[kN/m^2]$: la pression hydrodynamique

La pression hydrodynamique appliquée sur la carène de la barge est générée par la vitesse de l'eau induite lors d'un remplissage par le débit. Elle vaut :

$$p_{hd} = \frac{1}{2} \cdot \rho_w \cdot v^2$$

Où :

$\rho_w = 1000 [kg/m^3]$: la densité de l'eau

$v [m/s]$: la vitesse de l'eau

3.4 Roulis

Les mouvements de rotation d'un bateau sont caractérisés par :

- Le roulis pour la rotation de la barge autour de son axe longitudinal (symbolisé par l'axe x sur la Figure 3-13).
- Le tangage pour la rotation de barge autour son axe transversal (symbolisé par l'axe y sur la Figure 3-13).
- Le lacet pour la rotation de la barge autour de son axe vertical (symbolisé par l'axe z sur la Figure 3-13).

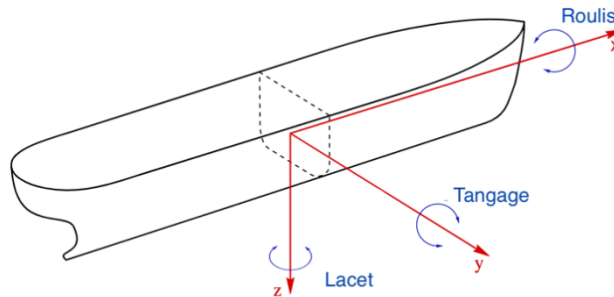


Figure 3-13 : Les mouvements de rotation d'un bateau (Wikipédia,2020)

Le roulis étant le mouvement de rotation le plus marqué lors d'un remplissage asymétrique, il est intéressant d'analyser ce phénomène. L'approche utilisée pour analyser le roulis est une approche quasi-statique où l'on compare les couples stabilisants et déstabilisants s'appliquant sur la barge. Si les 2 couples s'annulent à l'équilibre, la méthode est vérifiée (Margotteaux, 2014).

Le **couple stabilisant** est lié à l'angle d'inclinaison du roulis de la barge. Le bateau est à l'équilibre, pas de couple, lorsque son centre de gravité G et le centre de la poussée d'Archimède C se situent sur la même verticale. Lorsque le bateau quitte sa position d'équilibre et qu'un angle de roulis apparaît, le centre de gravité et le centre de poussée ne sont plus alignés verticalement. Ce déséquilibre induit un espacement e_s générant un couple, étant donné que le centre de poussée est situé au-dessus du centre de gravité (condition nécessaire à la stabilité d'un corps flottant), celui-ci tend à redresser le bateau et à revenir à la situation d'équilibre (Margotteaux, 2014).

Le **couple déstabilisant** est lié aux pressions hydrostatiques et hydrodynamiques qui s'appliquent sur la carène de la barge. Les efforts transversaux P doivent être équilibrés par les efforts d'amarrage R . Un bras de levier e_D est induit car le point d'attache des amarres (au niveau du pont) n'est pas situé à la même position que la résultante des efforts transversaux. Ce bras de levier génère un couple qui tend à faire chavirer le bateau (Margotteaux, 2014).

La situation à l'équilibre et en déséquilibre sont représentées sur la Figure 3-14 :

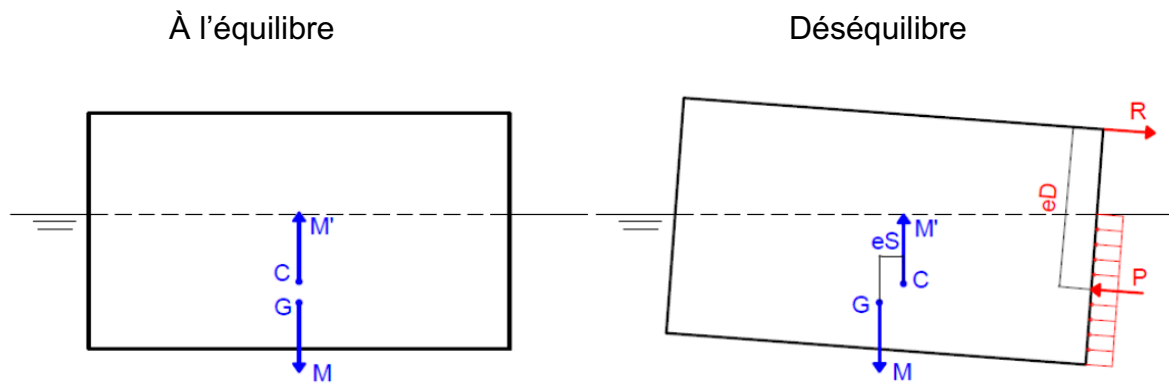


Figure 3-14 : Étude du roulis - situation à l'équilibre et en déséquilibre (Margotteaux, 2014)

3.5 Critères de sécurité existants

Comme introduit précédemment à la section 2.4, le batelier doit amarrer son bateau à l'aide de minimum deux amarres, l'une à la proue et l'autre à la poupe lors d'un sassement.

Pour rappel, les amarres ont pour rôle de maintenir le bateau dans une position fixe contre le bajoyer. La configuration d'amarrage recommandée pour un bateau de navigation intérieure est visible sur la Figure 3-15 illustrée ci-dessous.



Figure 3-15 : Configuration d'amarrage d'un bateau de navigation intérieure (Christiaens, 2015)

Le critère de sécurité C à respecter pour la force d'amarrage totale est exprimé généralement sous la forme d'une fraction du poids du bateau, en ‰ (EL Ouamari et Lenaerts, 2019) :

$$C = \frac{F_{max}}{P} \cdot 1000$$

Où

C [‰] : le critère de sécurité de l'effort d'amarrage

P [kN] : le poids du bateau

F_{max} [kN] : la force d'amarrage maximale admissible

Les règles de navigation sont propres à chaque pays, ainsi chacun possède ses propres valeurs sécuritaires. Lors d'un sasement, les efforts d'amarrage sont sujets aux efforts longitudinaux et transversaux. Or chaque pays n'a pas réglementé, certains (dont la Belgique) se basent sur les valeurs proposées par d'autres. En Belgique, les valeurs ne sont pas communes pour tout le pays et elles n'ont pas été établies dans une réglementation. Pour le design des écluses récentes, le SPW a retenu un critère 0,5 ‰, basé sur ceux des autres pays avec une sécurité supplémentaire. Ce critère, dont la valeur est conservatrice, est valable pour les efforts longitudinaux et les efforts transversaux. Les Pays-Bas ont établi un critère de sécurité uniquement selon la composante longitudinale. Contrairement à l'Allemagne et à la Chine qui ont établi pour leur part un critère de sécurité pour les deux composantes.

Afin de permettre une comparaison pertinente, les règles propres à chaque pays ont été adaptées et standardisées dans les tableaux ci-dessous. On entend par "adaptées", l'utilisation de la formule ci-dessus afin d'exprimer le critère en ‰ étant donné que l'Allemagne et la Chine ont exprimé leurs critères en kN (EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

Le critère sécuritaire étudié et détaillé ci-dessous est le critère à respecter lors d'un sasement. Le critère sécuritaire est identique pour le remplissage et la vidange. À noter qu'en général, le remplissage est plus critique que la vidange. Cette différence est due à l'emplacement où s'effectue la dissipation de l'énergie lors du sasement. Pour une vidange, la dissipation s'effectue dans le bief aval, contrairement au remplissage où elle s'effectue dans le sas provoquant plus de perturbations (EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

À partir des tableaux ci-dessous (Tableau 3-1 à Tableau 3-7), on peut observer deux choses :

- Premièrement, les valeurs des critères de sécurité sont relativement semblables et varient avec le poids du bateau. Comme expliqué précédemment, la Belgique ne possède pas de réglementation. Les projets récents du SPW utilisent un critère de sécurité constant de 0,5 ‰ pour tous types de bateaux. En comparant les valeurs sécuritaires, le SPW propose la valeur la plus sécuritaire.
- Deuxièmement, en observant le critère de sécurité appliqué par la Chine et l'Allemagne, on remarque que la valeur à respecter est plus sécuritaire pour les efforts transversaux que longitudinaux. Les efforts transversaux sont donc à considérer avec plus de précautions.

Pour ce travail, les bateaux sont de classe CEMT Vb, on utilisera donc un critère de sécurité pour les efforts transversaux de 0,5 ‰.

Efforts d'amarrage longitudinaux

Critère de sécurité : projets récents SPW	
Classe CEMT	Effort d'amarrage longitudinal maximum [‰]
Tout type	0,5 (max 1)

Tableau 3-1 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - projets récents SPW (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015)

Critère de sécurité : Pays-Bas	
Classe CEMT (tonnage [t])	Effort d'amarrage longitudinal maximum [‰]
III (650-1000)	2
IV (1000-1500)	1,5
Va (1500-3000)	1,15

Tableau 3-2 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - Pays-Bas (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015)

Critère de sécurité : Allemagne	
Tonnage [t]	Effort d'amarrage longitudinal maximum [‰]
280	0,8
1665	0,9
≥3120	1,1

Tableau 3-3 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - Allemagne (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015)

Critère de sécurité : Chine	
Tonnage [t]	Effort d'amarrage longitudinal maximum [‰]
50	10,2
100	8,2
300	6,1
500	5,1
1000	3,3
2000	2
3000	1,6

Tableau 3-4 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - Chine (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015)

Efforts d'amarrage transversaux

Critère de sécurité : projets récents SPW	
Classe CEMT	Effort d'amarrage transversal maximum [‰]
Tout type	0,5 (max 1)

Tableau 3-5 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - projets récents SPW (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015)

Critère de sécurité : Allemagne	
Tonnage [t]	Effort d'amarrage transversal maximum [‰]
280	0,39
1665	0,45
≥3120	0,54

Tableau 3-6 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage transversaux - Allemagne (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015)

Critère de sécurité : Chine	
Tonnage [t]	Effort d'amarrage transversal maximum [‰]
50	6,1
100	4,1
300	3,1
500	2,7
1000	1,6
2000	1
3000	0,8

Tableau 3-7 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage transversaux – Chine (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015)

4 Modèle expérimental

Dans le cadre de ce travail, l'approche utilisée pour étudier les phénomènes observés in situ est la modélisation physique. Elle se base sur l'utilisation de modèles réduits des sites et ouvrages à étudier à partir des lois de similitude. Les modèles réduits permettent d'étudier divers phénomènes et de tester des paramètres dans un environnement contrôlé. L'utilisation d'un modèle nécessite des infrastructures appropriées et implique des coûts de mise en œuvre élevés et du personnel qualifié. La fin du 19^{ème} siècle marque le développement de la modélisation physique avec les premiers grands laboratoires d'hydrauliques européens de Dresde et Karlsruhe. Malgré le développement de la modélisation numérique, apparue à partir de 1960, la modélisation physique reste intéressante car l'approche numérique ne permet pas encore de modéliser tous les phénomènes physiques (Bousmar, 2008).

Pour réaliser la campagne de mesures, nous disposons d'un modèle réduit de la 4^{ème} écluse de Lanaye dans le hall d'essai de la Direction des Recherches Hydrauliques du Service Public de Wallonie à Châtelet (Figure 4-1). Le nom complet est le hall d'essai "André Sterling" en l'honneur du célèbre ingénieur civil hydraulicien belge.



Figure 4-1 : Hall d'essais de la Direction des Recherches Hydrauliques- Vue intérieur (Bousmar, 2008)

4.1 Description du modèle réduit

Le modèle réduit reproduit les caractéristiques de l'ouvrage réel, la 4^{ème} écluse de Lanaye. Il s'agit d'une écluse avec un système d'alimentation par aqueducs et larrons. Les principaux éléments constituant le modèle vont être décrits et détaillés dans cette section. Avant de commencer, voici ci-dessous une représentation 3D légendée d'une écluse par aqueducs-larrons type afin de prendre connaissance de la globalité de sa structure (Figure 4-2). Lors de la conception de la 4^{ème} écluse de Lanaye, la largeur du sas a été modifiée. Initialement, la largeur était de 18 m mais a finalement été construite pour 25 m. La largeur du modèle réduit n'est donc pas à l'échelle. Ainsi, les résultats obtenus sur le modèle réduit ne correspondent donc pas avec exactitude avec ceux obtenus sur site mais permettent d'observer les phénomènes hydrauliques, d'étudier l'influence de certains paramètres et d'aboutir à des conclusions intéressantes.

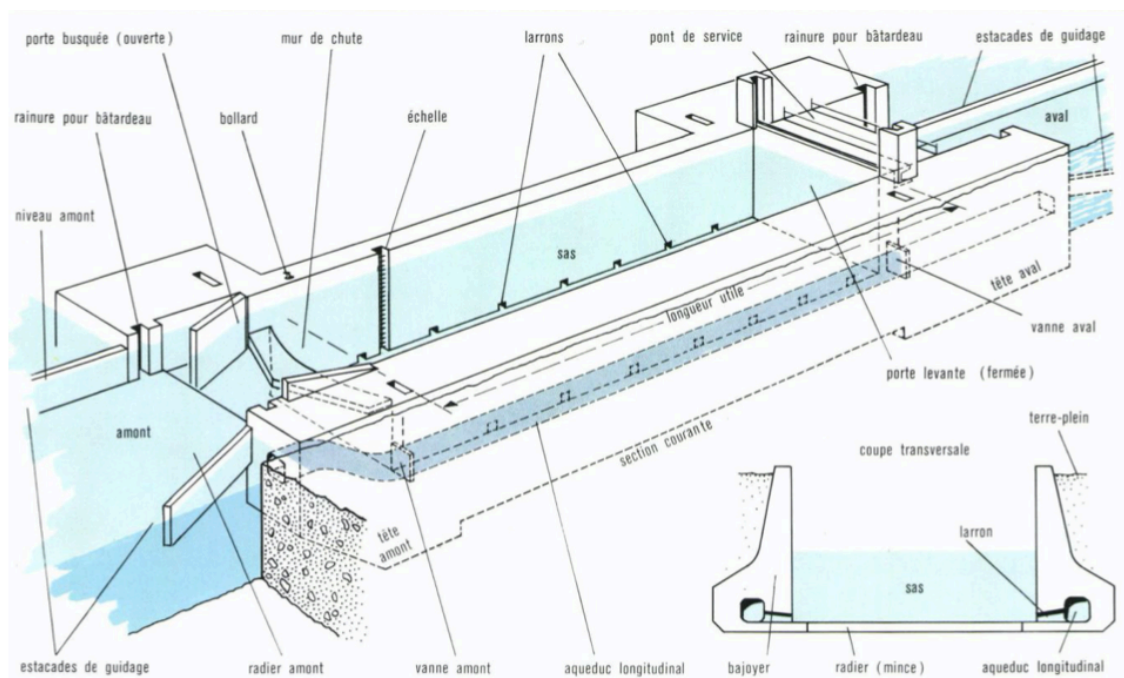


Figure 4-2 : Représentation (3D) d'une écluse avec un système d'alimentation par aqueducs et larrons (Margoiteaux, 2014)

4.1.1 Les lois de similitude

Le modèle réduit consiste à reproduire les phénomènes étudiés à une plus petite échelle. Afin de faire correspondre les grandeurs des phénomènes physiques étudiés in situ et le modèle réduit, il faut respecter les lois des similitudes et ainsi permettre de définir les échelles entre le modèle in situ et le modèle réduit. Il faut donc tenir compte de :

- La similitude géométrique dont le rapport entre les dimensions entre le modèle in situ et le modèle réduit doit être constant :

$$\hat{L} = \frac{L_{in\ situ}}{L_{réduit}} = cste$$

avec $\hat{L}$ étant l'échelle de longueur.

- La similitude cinématique dont le rapport entre les accélérations en tous points entre l'écoulement in situ et l'écoulement réduit doit être constant :

$$\hat{T} = \frac{t_{in situ}}{t_{réduit}} = cste$$

$$\hat{V} = \frac{\hat{L}}{\hat{T}} \quad \text{et} \quad \hat{a} = \frac{\hat{V}}{\hat{T}} = \frac{\hat{L}}{\hat{T}^2}$$

- La similitude dynamique dont le rapport des forces appliquées aux éléments homologues entre le modèle in situ et le modèle réduit doit être constant.

Mais également respecter :

- La similitude de Froude exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de pesanteur.

$$Fr = 1 \quad \text{où} \quad Fr = \frac{V}{c} = \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} \quad (\text{Nombre de Froude})$$

Avec V : la vitesse de l'eau L : la longueur caractéristique
 c : la vitesse des ondes dans l'eau g : la gravité

- La similitude de Reynolds exprime le rapport entre les forces d'inertie et les forces de viscosité.

$$Re = 1 \quad \text{où} \quad Re = \frac{VL}{\nu} \quad (\text{Nombre de Reynolds})$$

Avec ν : la viscosité dynamique de l'eau

La similitude parfaite implique le respect des conditions de similitude de Froude et de Reynolds :

$$Fr = Re = 1 \Leftrightarrow \frac{V}{\sqrt{g \cdot L}} = \frac{VL}{\nu}$$

$$\Leftrightarrow L^{3/2} = \nu$$

Étant donné que le fluide utilisé par le modèle réduit est identique à celui de la réalité, l'eau, il n'est pas possible de respecter les deux conditions de similitude. Pour les modèles à surfaces libres, le cas de la 4^{ème} écluse de Lanaye, la similitude de Froude est conservée. Pour la similitude de Reynolds, soit les forces de viscosité, on vérifie qu'elle n'a pas d'influence car on a un écoulement turbulent avec un nombre de Reynolds supérieur à 2000. Cette vérification a de l'importance pour les écoulements dans les aqueducs (Christiaens, 2015 ; Reding, 2013).

Pour la 4^{ème} écluse de Lanaye, le modèle réduit a été considéré avec une échelle de $\frac{1}{n} = \frac{1}{25}$, les relations de similitude donnent les rapports suivants :

Paramètre	$1/n$	$1/25$
Débit [m^3/s]	$1/n^{2,5}$	$1/3125$
Force [kN]	$1/n^3$	$1/15625$
Temps [s]	$1/\sqrt{n}$	$1/5$
Vitesse [m^2/s]	$1/\sqrt{n}$	$1/5$
Longueur [m]	$1/n$	$1/25$

Tableau 4-1 : Relation de similitude - Valeur échelle réduit

4.1.2 L'écluse

Le modèle réduit du hall d'essai est à l'échelle 1/25, avec une vue depuis l'amont à la Figure 4-3 et depuis l'aval à la Figure 4-4. De manière plus concrète, le modèle réduit se compose principalement de :

- Un **bief amont**, dont le rôle est de simuler le cours d'eau alimentant l'écluse. Il est alimenté via une pompe qui prélève l'eau dans le réservoir du hall. La sortie du tuyau acheminant l'eau de la pompe est munie d'un système de dissipation pour diminuer les ondes et petites vagues. Afin d'assurer un niveau d'eau constant, le bief dispose d'un déversoir en labyrinthe (EL Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Margotteaux, 2014).
- Un **sas**, qui a pour rôle de contenir le bateau, détaillé à la section suivante, lors du sasement. Il est alimenté par 2 aqueducs-larons munis pour chacun de vannes papillons, une à l'amont, une à l'aval soit au total 4 vannes papillons. Les aqueducs ont été construits en plexiglas pour assurer un contrôle visuel. La section 4.1.5 présente le système d'alimentation et ses caractéristiques de manière plus précise (EL Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Margotteaux, 2014).
- Un **bief aval**, dont le rôle est de simuler le cours d'eau situé en aval de l'écluse. Il est pourvu également d'un déversoir afin d'assurer un niveau d'eau constant. Le déversoir est réglé pour avoir une hauteur de chute d'eau de 58 cm (EL Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Margotteaux, 2014).

Comme expliqué précédemment, la largeur n'est pas à l'échelle 1/25. La largeur du sas est de 0,72 m au lieu d'être de 1 m. Les 0,72 m correspondent aux 18 m établis lors de la conception de la 4^{ème} écluse de Lanaye, mais finalement construite avec une largeur de 25 m.

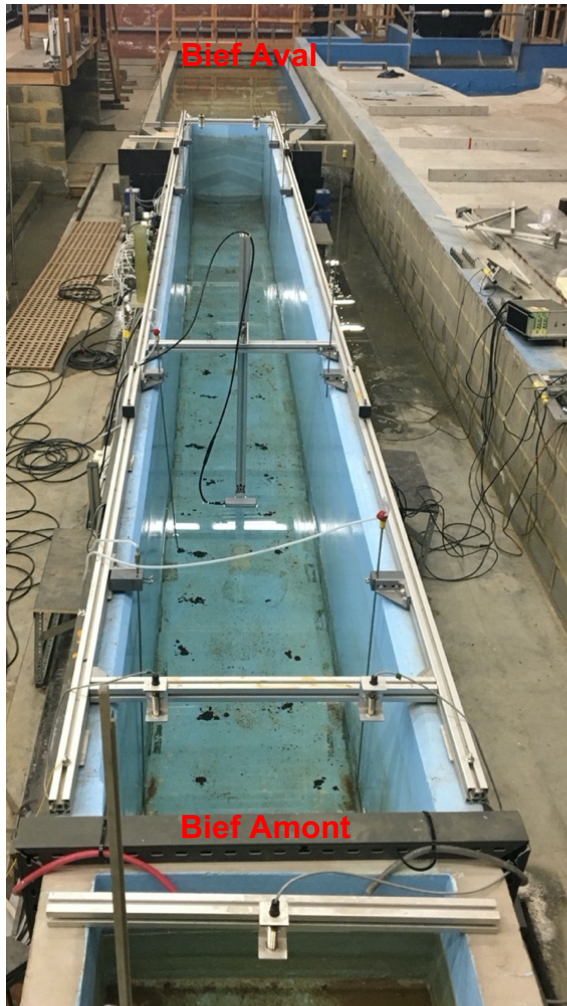


Figure 4-3 : Vue amont du sas



Figure 4-4 : Vue aval du sas

Les plans généraux du modèle réduit sont disponibles à l'annexe 10.1. Un plan (Figure 4-5) et une coupe (Figure 4-6) simplifiés reprenant les dimensions (Tableau 4-2) principales du modèle sont illustrés ci-dessous :

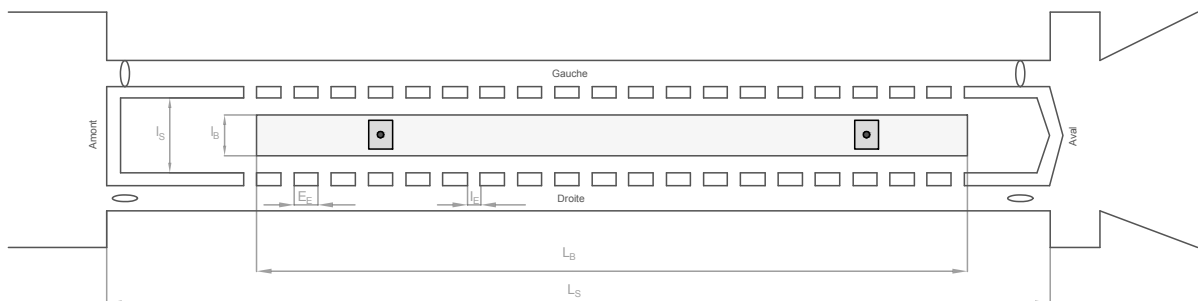


Figure 4-5 : Modèle réduit - Plan simplifié

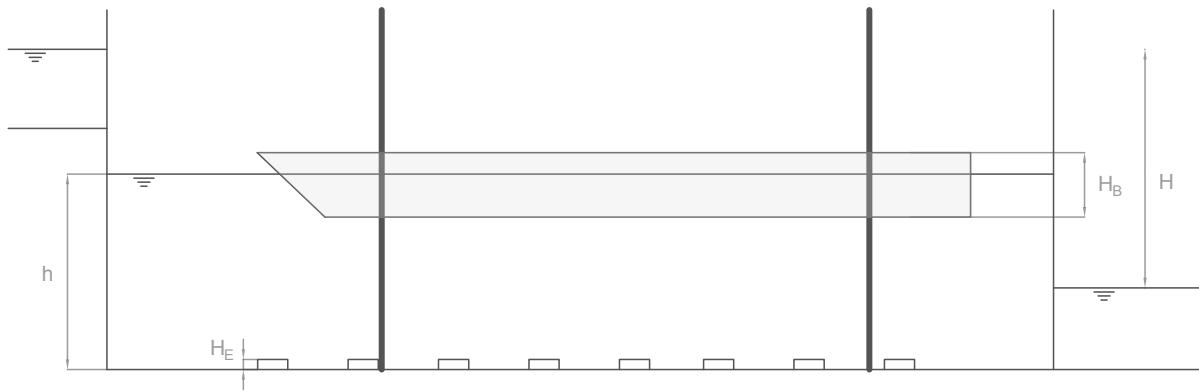


Figure 4-6 : Modèle réduit - Coupe simplifiée

Notation	Description	Valeur
L_s	Longueur du sas	900 [cm]
l_s	Largeur du sas	72 [cm]
l_E	Largeur de l'éjecteur	8 [cm]
H_E	Hauteur de l'éjecteur	1 [cm]
E_E	Entraxe entre éjecteurs	36 [cm]
H	Hauteur de chute	58 [cm]
h	Hauteur d'eau dans le sas	Variable
L_B	Longueur du bateau	720 [cm]
l_B	Largeur du bateau	50 [cm]
H_B	Hauteur du bateau	30 [cm]

Tableau 4-2 : Dimensions principales du modèle réduit

4.1.3 Le bateau

Le bateau utilisé sur le modèle réduit correspond à un convoi de classe Vb à l'échelle 1/25. Ses dimensions sont une longueur de 7,2 m, une largeur de 0,5 m et une hauteur de 0,3 m.

La Figure 4-7 illustre le bateau à sec et la Figure 4-8 permet de le visualiser dans le sas amarré en position centrale et avec un niveau d'eau élevé. La proue et la poupe du bateau sont visibles respectivement sur la Figure 4-9 et la Figure 4-10. Le bateau à vide pèse 137,8 kg et avec le dispositif d'amarrage 167,8 kg. Pour correspondre à la réalité, le bateau est lesté via des barres de lestage de 10 kg chacune pour atteindre une masse totale de 607,2 kg. Le système d'amarrage ainsi que les différents capteurs utilisés sur le bateau seront détaillés dans les sections suivantes (EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

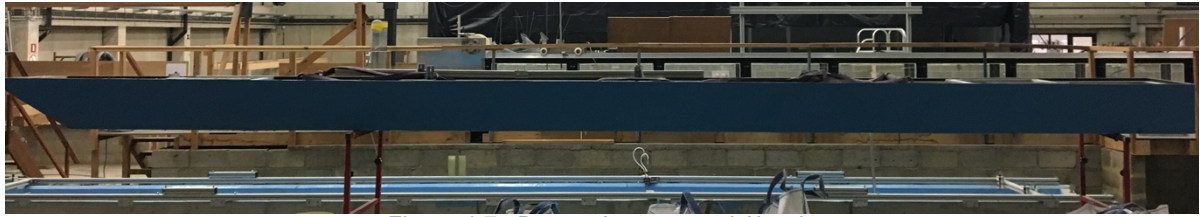


Figure 4-7 : Bateau à sec – vue bâbord

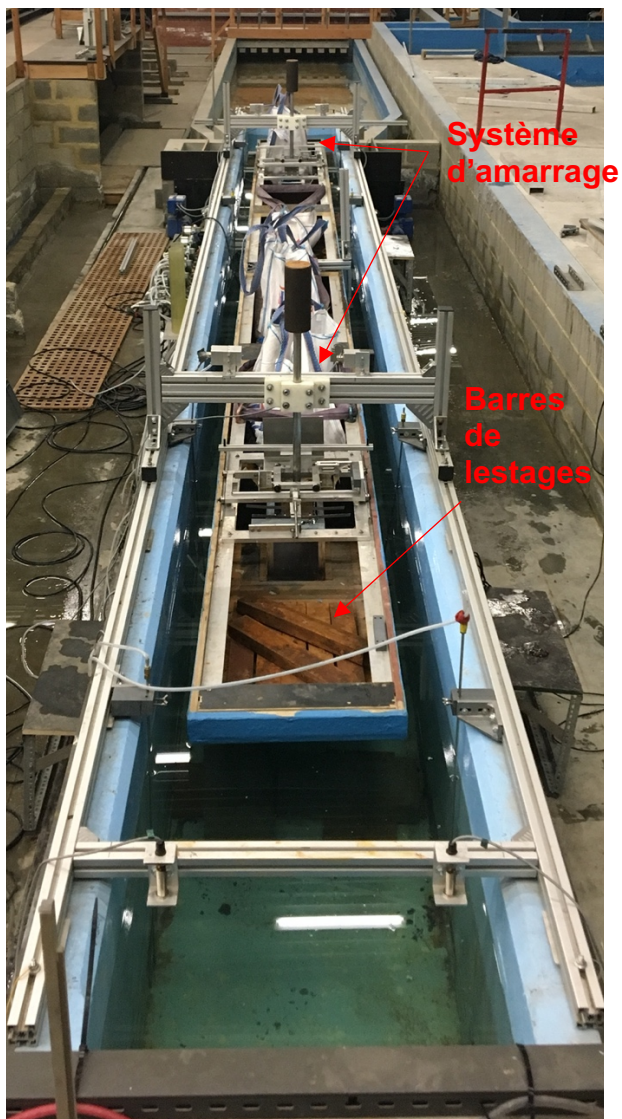


Figure 4-8 : Bateau mis à l'eau dans le sas



Figure 4-9 : Proue du bateau

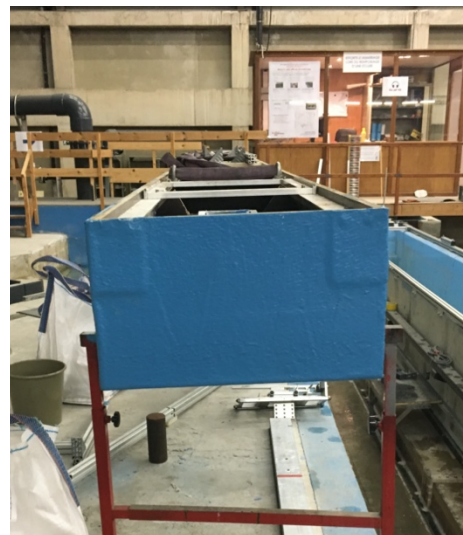


Figure 4-10 : Poupe du bateau

4.1.4 Le système d'amarrage

Le système d'amarrage, visible sur la Figure 4-11, a pour rôle de maintenir le bateau à sa position durant le sassement. Le système se compose de deux axes verticaux traversant le bateau par deux orifices prévus à cet effet. Chaque axe vertical est constitué d'une base carrée, posé sur le radier du sas et maintenu fixe via un portique et un contrepoids. L'ensemble du système est visible sur la Figure 4-12 (EL Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Margotteaux, 2014).

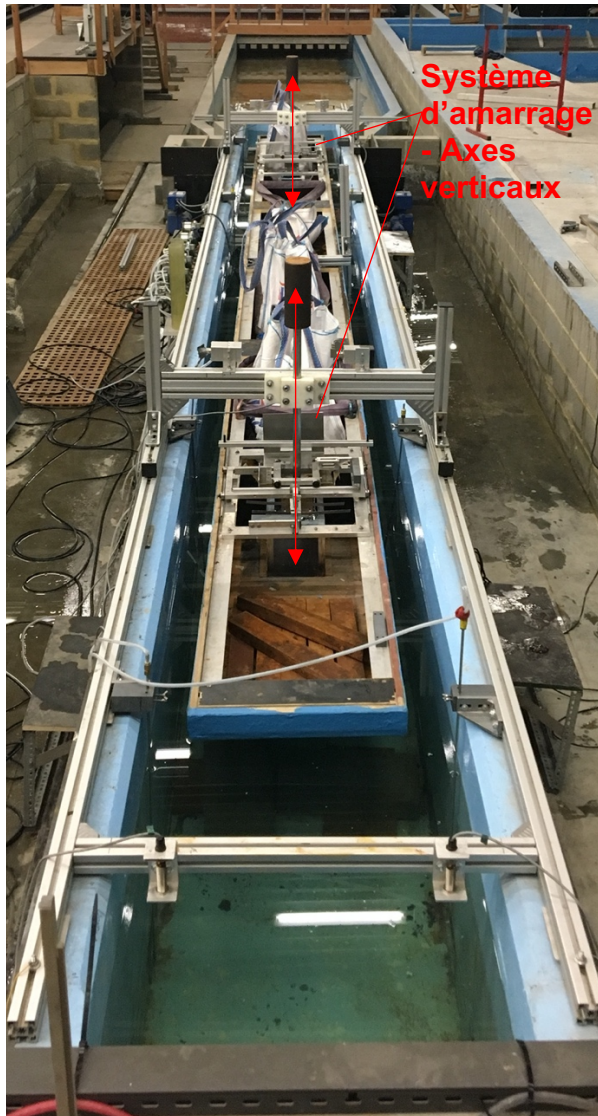


Figure 4-11 : Système d'amarrage – Axes verticaux

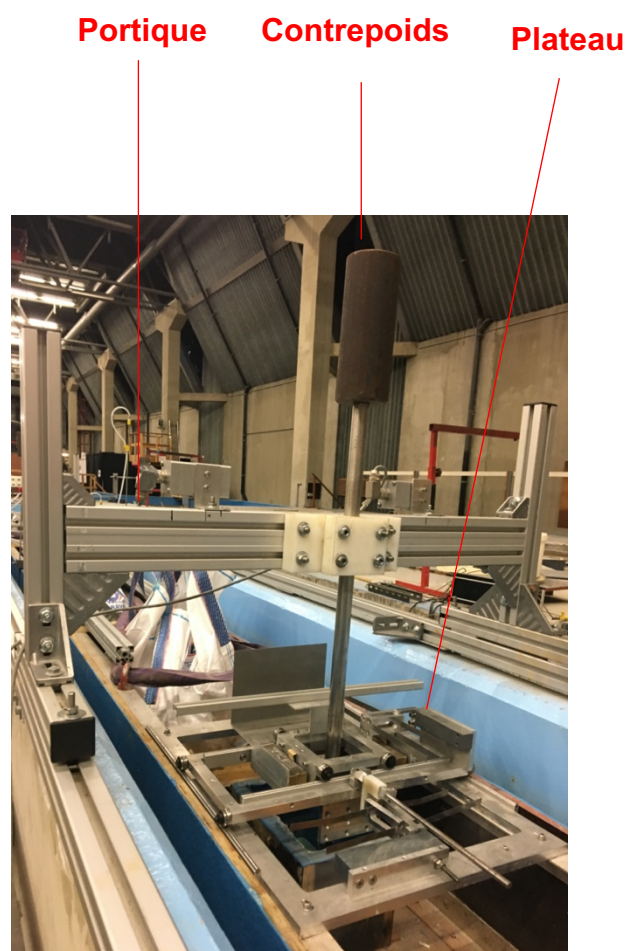


Figure 4-12 : Système d'amarrage - Portique et contrepoids

Le plateau, visible sur la Figure 4-12 et Figure 4-13, est le dispositif reliant les axes verticaux au bateau. Étant donné que les déformations ne sont pas à l'étude dans ce travail, les jauges de déformation, nommées également capteurs de force, ont été remplacées par des blocs en PVC de dimensions identiques afin de préserver ces derniers d'éventuels chocs. Des capteurs de position à corde, dont le principe de fonctionnement sera détaillé plus loin, fixés sur le portique et reliés au plateau permettent de mesurer le roulis et le tangage. Le système de roulement permet de décomposer les mouvements longitudinaux et transversaux durant le sassement.

Le déplacement vertical sans frottement du bateau est réalisé via une liaison par rotule entre la barge et l'axe vertical (EL Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Margotteaux, 2014).

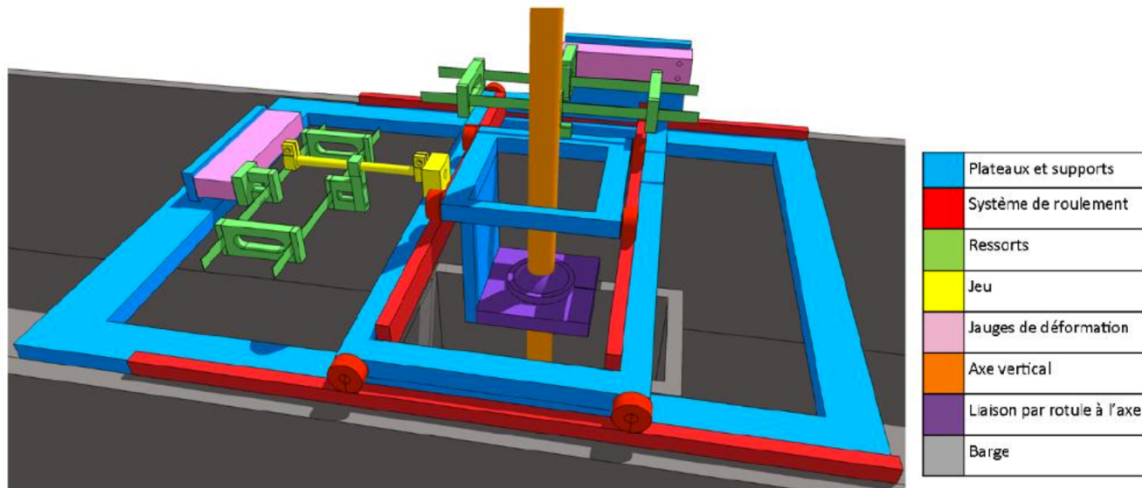


Figure 4-13 : Système d'amarrage – Plateau (Margotteaux, 2014)

Pour étudier le rôle des amarres et plus précisément l'effet de son élasticité sur les efforts, plusieurs configurations du dispositif sont possibles. La simulation de l'élasticité est réalisée avec un ressort lame et le jeu permet d'étudier les effets d'une amarre non tendue. La configuration avec amarre élastique et jeu est visible à la Figure 4-14 et celle avec amarre rigide et sans jeu est visible à la Figure 4-15 (EL Ouamari et Lenaerts, 2019 ; Margotteaux, 2014).

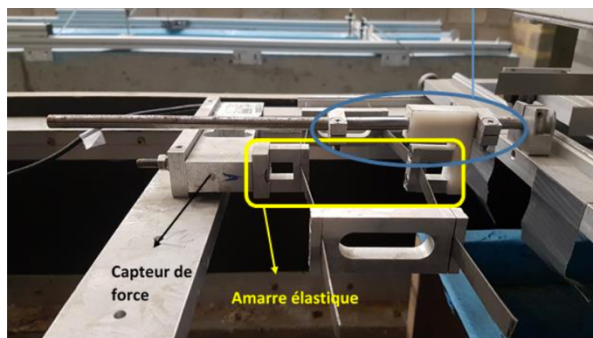


Figure 4-14 : Configuration amarre élastique et avec jeu (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

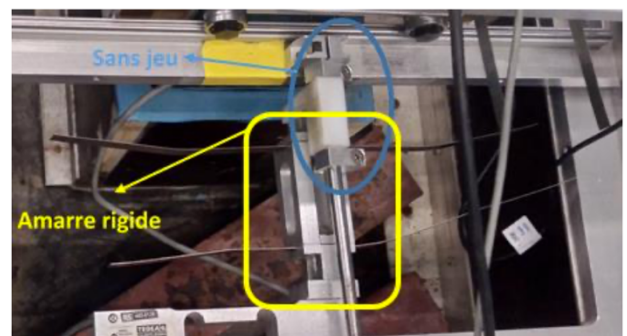


Figure 4-15 : Configuration amarre rigide et sans jeu (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

Pour ce travail, la barge est amarrée selon une configuration pour des amarres rigides et sans jeu. Les configurations utilisées peuvent être observées sur la Figure 4-16 et la Figure 4-17 pour le dispositif amont et les Figure 4-18 et Figure 4-19 pour le dispositif aval. Le dispositif aval est identique au dispositif amont, mais il ne permet pas de mouvement dans le sens longitudinal et donc pas de ressort ni de jeu.



Figure 4-16 : Système d'amarrage amont – Vue du haut

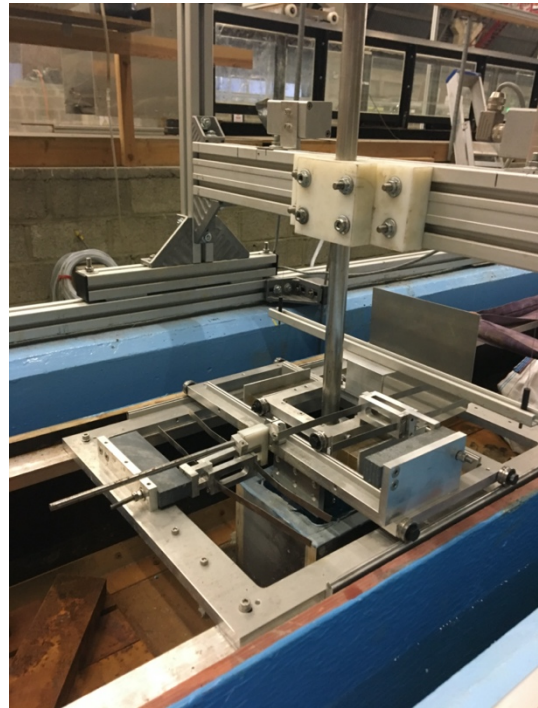


Figure 4-17 : Système d'amarrage amont – Vue en perspective



Figure 4-18 : Système d'amarrage aval – Vue du haut

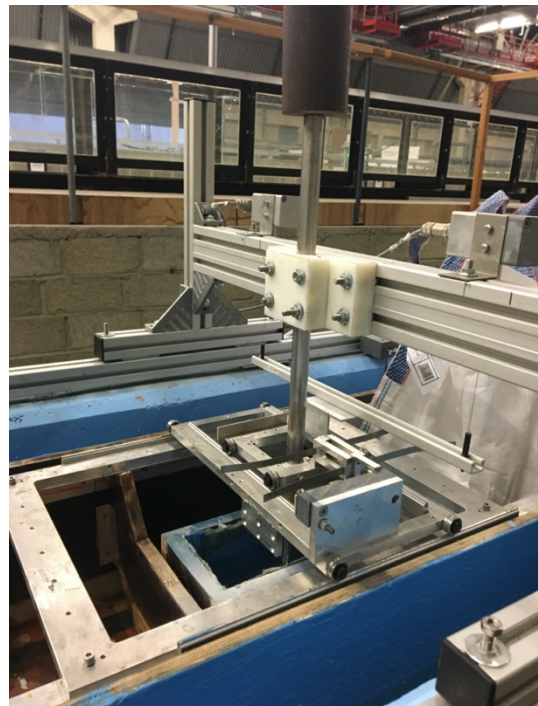


Figure 4-19 : Système d'amarrage aval – Vue en perspective

4.1.5 Système de remplissage et de vidange

Le système d'alimentation est un système par aqueducs et larrons. Comme expliqué précédemment à la section 2.2.2, le système est pourvu de deux aqueducs qui bordent respectivement chaque bajoyer sur toute leur longueur. Les aqueducs, visibles sur la Figure 4-20, ont été construits en Plexiglas afin de permettre un contrôle visuel lors du sassement et prévenir tout problème lié à l'obstruction. Les aqueducs permettent le remplissage du sas par le bief amont et la vidange via le bief aval. La liaison entre les aqueducs et le sas est réalisée au travers de larrons répartis sur toute la longueur du sas. Chaque bajoyer possède 20 larrons disposés symétriquement par rapport à l'autre bajoyer et équitablement sur la longueur, hormis les premiers centimètres en amont et les derniers centimètres en aval où les larrons ne sont pas présents, comme illustré précédemment à la Figure 4-5 (El Ouamari et Lenaerts, 2019).



Figure 4-20 : Aqueduc

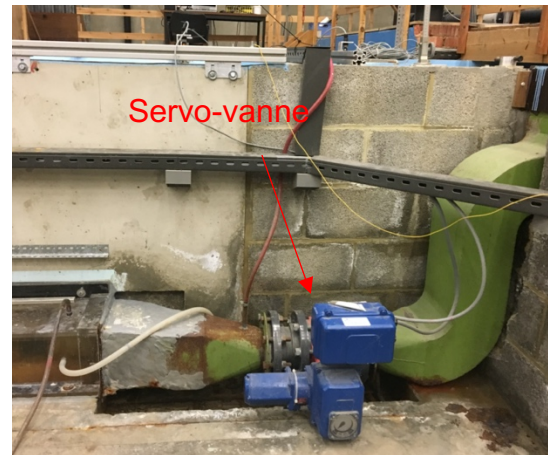


Figure 4-21 : Servo-vanne



Figure 4-22 : Boîtier de contrôle des servo-vannes

Le système de remplissage et de vidange est contrôlé par quatre servo-vannes papillon indépendantes permettant un remplissage ou une vidange en mode normal ou dégradé. Le logiciel Hydrocap 3 permet de contrôler à distance les temps d'ouverture des servo-vannes. En effet, chaque servo-vanne est équipée d'un servomoteur permettant l'ouverture de 0° à 90° de la vanne. Celles-ci sont visibles sur la Figure 4-21 et le boîtier de contrôle sur la Figure 4-22.

Le modèle réduit dispose de deux formats d'éjecteurs :

- Un éjecteur de référence, correspond à l'éjecteur du modèle réel à l'échelle 1/25 avec une largeur de 8 cm et une hauteur de 1 cm.
- Un éjecteur réduit avec une largeur de 4 cm et une hauteur de 1 cm.

Les dimensions de l'éjecteur de référence ont été réduites afin de pouvoir étudier l'influence de la taille de l'éjecteur lors d'un sassement en mode dégradé (El Ouamari et Lenaerts, 2019). Les éjecteurs sont visibles sur la Figure 4-23 et la Figure 4-24.

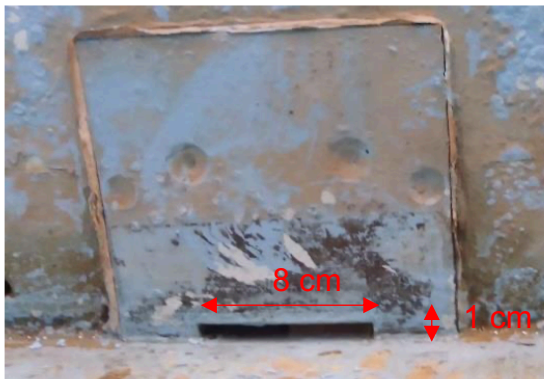


Figure 4-23 : Éjecteur de référence (EL Ouamari et Lenaerts, 2019)

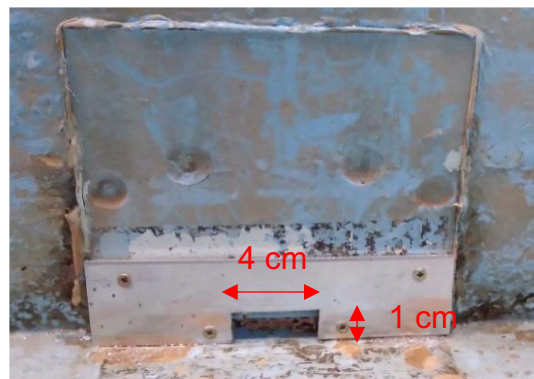


Figure 4-24 : Éjecteur réduit (EL Ouamari et Lenaerts, 2019)

4.2 Système de mesures

4.2.1 Dispositifs de mesure

Pour étudier les différents phénomènes dans le cadre des objectifs définis dans ce rapport, il faut réaliser différentes mesures. Pour cela, différents types de capteurs et de sondes ont été placés sur le modèle réduit (Figure 4-25) :

- Les capteurs de niveau à ultrasons (US)
- Les capteurs de pression différentielle (P_{diff})
- Les capteurs de position à corde (CC)
- La sonde de vitesse électromagnétique (SV)

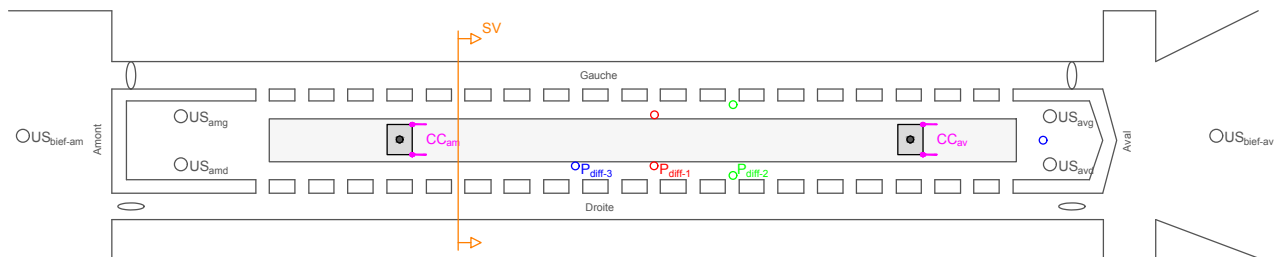


Figure 4-25 : Plan modèle réduit - Dispositifs de mesure

4.2.2 Chaîne de mesure

Pour réaliser les mesures et les enregistrer, il est utile d'utiliser une chaîne de mesure constituée de plusieurs éléments :

1.a Le capteur :

Il va transformer la grandeur physique observée en un signal électrique. Les différents capteurs utilisés sont présentés dans cette section (Bousmar, 2008).

1.b Le conditionneur :

Il va amplifier le signal électrique reçu et le conditionner dans une gamme standardisée (4-20 mA, 0-10 V, +/- 10 V, ...). Le conditionneur, visible à la Figure 4-27, permet de réaliser l'étalonnage et la calibration du binôme capteur-conditionneur. Ainsi, l'étalonnage permet d'établir la relation entre la grandeur physique et la grandeur indiquée par le capteur. Dans ce travail, on utilise des ensembles capteurs – conditionneurs permettant de lier linéairement un signal électrique V à la grandeur physique X mesurée (Figure 4-26) :

$$X = a V + b$$

Avec a , le gain et b , le décalage. Ces deux constantes dépendent du capteur et sont idéalement insensibles aux conditions extérieures.

À partir de quelques points de référence, on peut déterminer la droite de calibration, correspondant à l'équation ci-dessus, par régression linéaire et ainsi implémenter le programme d'acquisition (Bousmar, 2008).

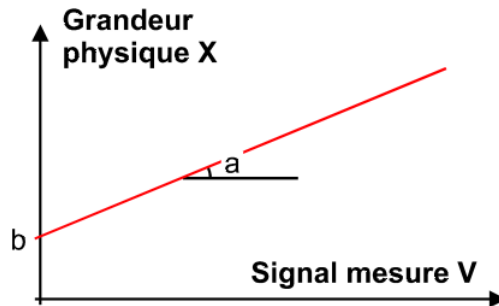


Figure 4-26 : Relation linéaire entre grandeur physique et signal de mesure (Bousmar, 2008)

La calibration correspond au réglage de l'instrument par l'utilisateur en fonction du dispositif mesuré. Lors d'une campagne de mesure, il est utile de vérifier la mesure obtenue avec le dispositif et la grandeur (Bousmar, 2008).

2. Les cartes d'acquisition : Elles permettent de convertir le signal analogique envoyé par le conditionneur en un signal digital utilisable par un ordinateur (Bousmar, 2008). Le boîtier contenant cette carte est visible à la Figure 4-28.
3. Le logiciel d'acquisition : Il permet de recueillir les signaux digitalisés, d'afficher et d'enregistrer les mesures. À partir de ces enregistrements, les mesures pourront être traitées et analysées. Pour la campagne de mesure réalisée dans le cadre de ce travail, c'est le logiciel HydroCap 3 qui a été utilisé (Bousmar, 2008).



Figure 4-27 : Conditionneur

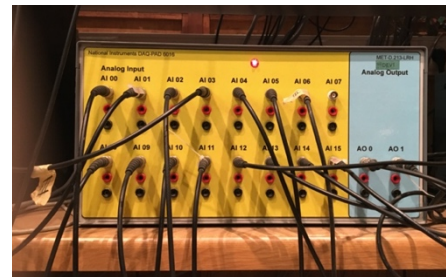


Figure 4-28 : Carte d'acquisition



Figure 4-29 : Logiciel Hydrocap 3 : interface utilisateur (Bousmar, 2008)

4.2.3 Capteur de niveau à ultrasons

Le capteur de niveau à ultrasons permet de déterminer la hauteur d'eau. Il mesure la distance entre le capteur et la surface libre de l'eau via un train d'ondes ultrasons réfléchies sur cette dernière. Connaissant la vitesse du son dans l'air et en mesurant le temps de propagation de l'onde aller-retour, il détermine cette distance (Bousmar, 2008 ; EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

Pour la campagne de mesure, les sondes utilisées sont du type Baumer Uman18U6903, visible à la Figure 4-30, dont la résolution est de 0,3 mm. À noter qu'en présence d'une surface libre "agitée", l'écho peut être atténué et la mesure troublée. (Bousmar, 2008 ; EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

Les six capteurs Baumer utilisés sur le modèle réduit ont été disposés de la manière suivante : un capteur dans le bief aval, quatre capteurs dans le sas (deux à l'amont et deux à l'aval sur chaque bajoyer) et le dernier dans le bief amont.

Les 2 capteurs placés dans les biefs permettent de contrôler le niveau d'eau amont et aval. Ceux présents dans le sas permettent de contrôler et de suivre le niveau d'eau dans le sas ainsi que son évolution lors des sassements.



Figure 4-30 : Capteur de niveau à ultrasons Baumer

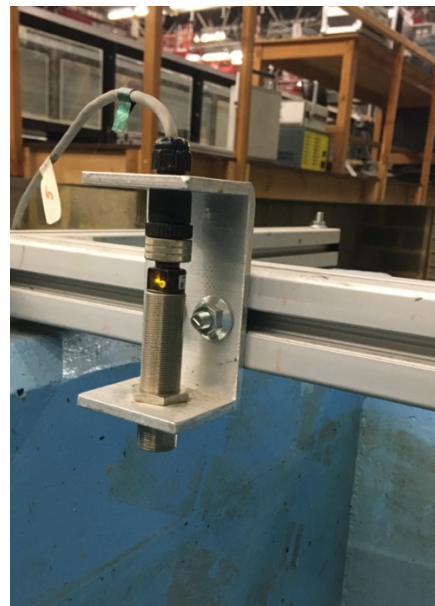


Figure 4-31 : Capteur Baumer sur son support

4.2.4 Capteur de pression différentielle

Le capteur de pression différentielle, illustré à la Figure 4-32 et la Figure 4-33, permet de déterminer la pente d'eau en mesurant la différence entre deux pressions. Celui-ci se compose d'un boîtier circulaire (1) possédant deux chambres (2) séparées par deux membranes flexibles (3). Chaque membrane est reliée à la position de mesure définie de la pression via des tuyaux (4). L'eau va exercer une pression sur les membranes, celle subissant la plus forte pression correspondra à la position avec le niveau d'eau le plus élevé (Bousmar, 2008 ; EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

Pour la campagne de mesure, les capteurs utilisés sont des capteurs de pression différentielle de type YOKOGAWA EJA110E, visible à la Figure 4-33, avec une gamme de mesure de ± 50 mm et une précision de 0,02 m. À noter qu'il est nécessaire de vérifier qu'aucune bulle d'air ne soit présente dans les chambres et/ou dans les tuyaux. Celles-ci ont comme conséquence de provoquer l'apparition de perturbation ou d'un bruit supérieur au signal à mesurer. Afin d'éviter cela, il est nécessaire de purger le dispositif via ses orifices (Bousmar, 2008 ; EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

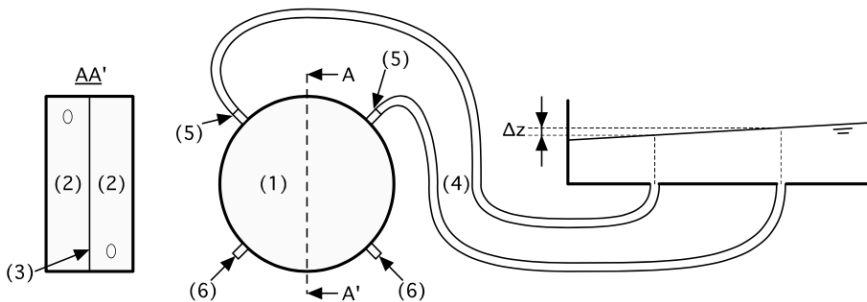


Figure 4-32 : Description du fonctionnement du capteur de pression différentielle [13]



Figure 4-33 : Capteur de pression différentielle YOGOGAWA

Avec (1) : boîtier circulaire
(2) : chambre
(3) : membrane flexible

(4) : tuyau
(5) : valve supérieure
(6) : valve inférieure

Pour ce type de mesure, M. Lenaerts et I. El Ouamari ont réalisé des essais afin de déterminer le type de tube à utiliser. Les résultats sont disponibles en annexe 10.4. Leur conclusion est d'utiliser des tubes à ouverture sur le côté et de positionner ces tubes à une hauteur de 25 cm pour la prise de pression au bajoyer, permettant d'obtenir une prise de pression proche de la pression hydrostatique (EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

Pour la campagne de mesure de ce TFE, nous avons utilisé deux types de tubes, les tubes droits à ouverture sur les côtés (Figure 4-34 et Figure 4-35), utilisés également par M. Lenaerts et I. El Ouamari, ainsi qu'un tube coudé à ouverture sur les côtés (Figure 4-36 et Figure 4-37). Pour le tube coudé, seule la composante hydrostatique a été mesurée (une seule tige-tube utilisé).



Figure 4-34 : Tube droit à ouverture sur les cotés



Figure 4-35 : Zoom sur les ouvertures (tube droit)



Figure 4-36 : Tube coudé à ouverture sur les cotés



Figure 4-37 : Zoom sur les ouvertures (tube coudé)

4.2.5 Capteur de position à corde

Le capteur à corde sert à mesurer une distance dynamique. Celui-ci est composé d'un filin enroulé autour d'un tambour équipé d'un ressort de rappel pour permettre l'enroulement automatique du câble. Le déroulement du filin entraîne la rotation du tambour actionnant le potentiomètre multi-tours, permettant de déterminer la longueur du filin. Le capteur a pour rôle de mesurer le roulis et le tangage du bateau lors des sassements (Bousmar, 2008 ; EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

Les capteurs utilisés sont des capteurs ASM WS10SG, visibles sur la Figure 4-38, possédant une plage de mesure de 1 m et une précision de 0,1%. Le bateau est équipé de 4 capteurs à corde, 2 placés à l'amont et 2 placés à l'aval du bateau. Ceux-ci sont positionnés plus précisément au niveau du système d'amarrage, comme on peut l'observer sur la Figure 4-39 (Bousmar, 2008 ; EL Ouamari et Lenaerts, 2019).



Figure 4-38 : Capteur de position à corde ASM WS10SG

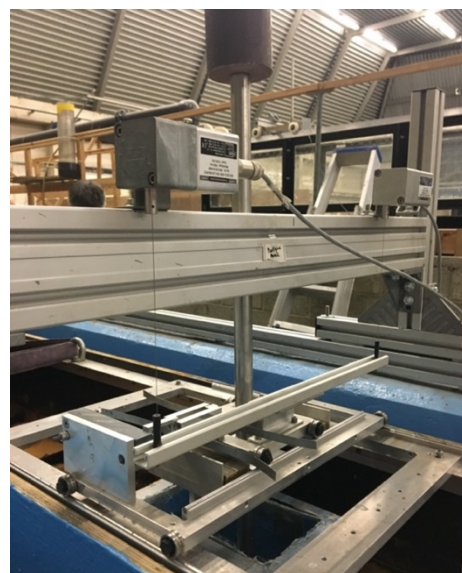


Figure 4-39 : Capteur de position à corde sur son support

4.2.6 Sonde de vitesses électromagnétiques

La sonde électromagnétique permet la mesure de la vitesse de l'eau. Son fonctionnement est basé sur la mesure du courant électrique généré par l'écoulement d'un fluide conducteur au sein d'un champ magnétique. La sonde génère donc un champ magnétique et deux paires d'électrodes mesurent le courant électrique généré par l'écoulement à travers ce champ. La conception de la sonde permet d'avoir une proportionnalité entre le courant électrique (la tension) mesuré et la vitesse du liquide parallèle au plan des électrodes (Bousmar, 2008 ; EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

Pour la campagne de mesure, la sonde utilisée est une sonde bidirectionnelle droite du type P-EMS de WL Deft Hydraulics, visible à la Figure 4-40. La tête de la sonde, visible à la Figure 4-41, est une ellipsoïde de 33 mm de diamètre et 11 mm d'épaisseur. La gamme de vitesse paramétrée choisie est de $\pm 2,5$ m/s (via le conditionneur) avec une précision de 0,01 m/s (Bousmar, 2008 ; EL Ouamari et Lenaerts, 2019).

Étant donné que les sondes de vitesse mises à disposition par le SPW avaient un certain âge, il a été décidé de réaliser des tests préliminaires afin de s'assurer qu'elles mesuraient encore de manière précise. Les vérifications consistaient à tester les sondes sur un canal vitré et à comparer les résultats avec ceux réalisés avec la sonde de référence. Les tests sur canal vitré et les tests sur le modèle réduit ont conclu qu'une seule sonde était encore capable de mesurer précisément. Uniquement cette sonde fut utilisée durant toute la campagne d'essai. La procédure d'essai ainsi que les résultats détaillés sont disponibles en annexe.

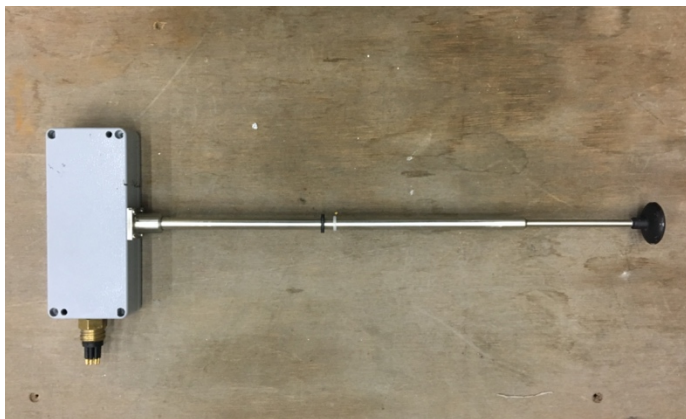


Figure 4-40 : Sonde de vitesse électromagnétique PEMS

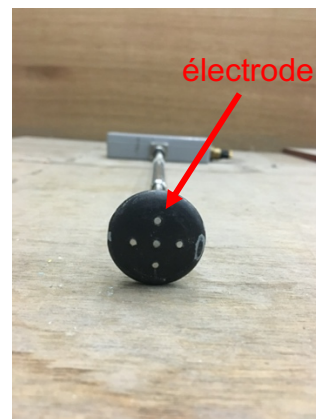


Figure 4-41 : Tête de la sonde PEMS

4.3 La loi d'ouverture

Le temps de remplissage et de vidange ainsi que les perturbations dans le sas peuvent être influencés par les lois d'ouvertures des vannes. Voici les différentes lois d'ouvertures :

- Ouverture instantanée : La vanne s'ouvre instantanément.

$$\omega_1(t) = \Omega_1 = cste \quad \text{en } \forall t$$

Il s'agit d'une loi simplifiée, impossible à réaliser en réalité.

La puissance à dissiper en $t = 0$ est maximale alors que le matelas d'eau est minimal, le sas est presque vide, cela va générer beaucoup de remous dans le sas (Bousmar, 2020 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019).

- Ouverture linéaire : La vanne s'ouvre en fonction de l'angle d'ouverture de 0° à 90° à vitesse angulaire constante.

$$\omega_2(t) = \Omega_2 \frac{t}{T} \quad \text{en } \forall t$$

Avec T , le temps de sasement total.

Cette loi permet de limiter les perturbations lors du remplissage, mais les dimensions des vannes et aqueducs doivent être doublés (Bousmar, 2020 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019).

- Ouverture quadratique : La vanne s'ouvre de manière à ce que son ouverture soit fonction du carrée du temps

$$\omega_3(t) = \Omega_3 \frac{t^2}{T^2} \quad \text{en } \forall t$$

Cette loi n'offre pas de gain supplémentaire sur les perturbations par rapport à la loi linéaire, mais demande d'augmenter encore les dimensions des vannes et aqueducs (Bousmar, 2020 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019).

- Ouverture complexe : La vanne s'ouvre linéairement jusqu'à la moitié du temps de sasement et puis instantanément.

$$\begin{aligned} \omega_4(t) &= \Omega_4 \frac{t}{T/2} && \text{pour } t < T/2 \\ \omega_4(t) &= \Omega_4 && \text{pour } t \geq T/2 \end{aligned}$$

Cette loi est équivalente à la loi linéaire, mais où les dimensions des vannes et aqueducs sont plus petites. Il existe plusieurs possibilités d'ouvertures complexes, le principe de paliers peut être répété plusieurs fois dans une même loi. Ainsi, nous pouvons avoir une ouverture linéaire jusqu'à un certain angle, ensuite l'ouverture reste constante puis à nouveau linéaire. L'action peut être répétée jusqu'à ouverture totale de la vanne (Bousmar, 2020 ; El Ouamari et Lenaerts, 2019).

Les quatre lois d'ouverture sont représentées graphiquement sur la Figure 4-42 avec un temps de sasement T identique pour chacune des lois. La taille de la vanne doit être multipliée par le facteur repris en ordonnée pour respecter le temps de sasement.

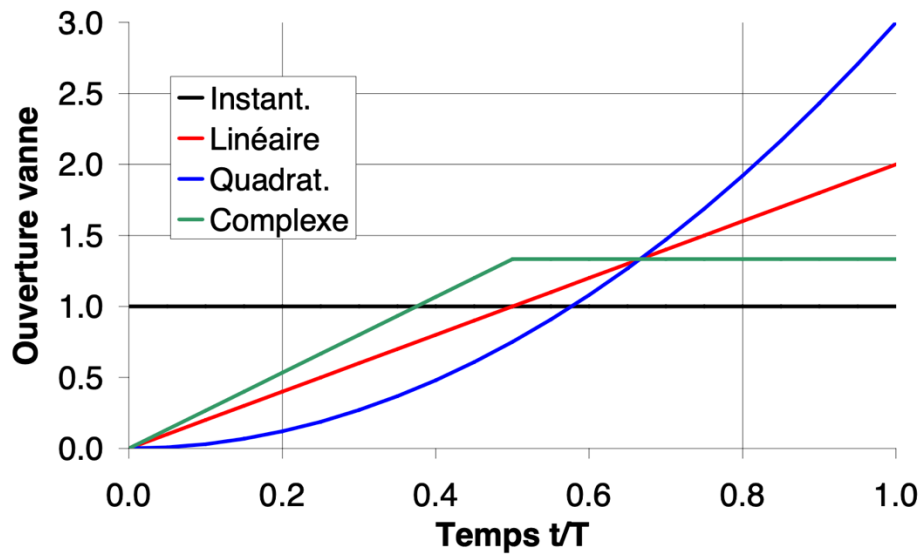


Figure 4-42 : Lois d'ouverture des vannes (Bousmar, 2020)

La loi d'ouverture et le temps d'ouverture sont fixes et identiques durant toute cette étude. Nous avons utilisé une loi d'ouverture linéaire avec un temps d'ouverture de 30 s, comme illustré sur la Figure 4-43. La vanne s'ouvre de 0° à 90° en 30 s avec une vitesse angulaire constante. Pour l'étude de l'éjecteur de référence, nous ouvrons la vanne amont droit du modèle réduit et pour l'éjecteur réduit, la vanne amont gauche.

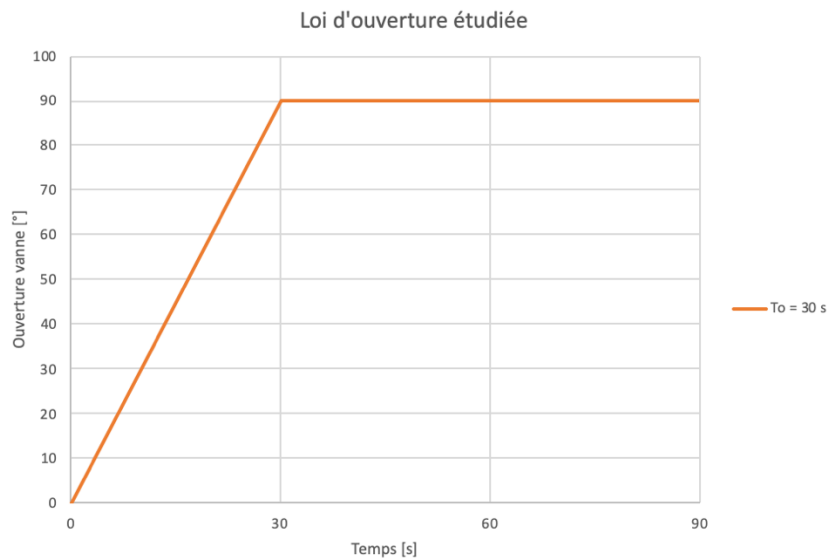


Figure 4-43 : Loi d'ouverture avec $T_o = 30$ s

4.4 Procédure des essais

La campagne de mesure réalisée sur le modèle réduit se décompose en 4 parties :

1. La mesure des champs de vitesse dans le sas sans bateau.
2. La mesure des champs de vitesse dans le sas en présence du bateau.
3. La mesure des différences de pression dans le sas en présence du bateau.
4. La mesure du roulis et de tangage du bateau.

Pour l'ensemble de la campagne de mesure, les essais ont respecté un protocole de mesure ainsi qu'une nomenclature définie dans cette section. Ensuite, les différents dispositifs de mesure utilisés sur le modèle réduit seront présentés.

4.4.1 Protocole de mesure

A partir du logiciel Hydrocap 3, il est possible de réaliser à la fois l'enregistrement des mesures ainsi que la commande automatique des vannes. Un protocole de remplissage/vidange a été défini afin de faire correspondre et de comparer de manière précise les résultats entre les essais.

Dans le cadre de ce travail, le protocole utilisé selon les entrées d'Hydrocap 3 est le suivant :

Opération débutant au temps t [s]	Angle d'ouverture des vannes [°]				Description de l'opération
	V1	V2	V3	V4	
0	0	0	0	0	Début enregistrement
30	0	0	90	0	Remplissage dégradé : loi d'ouverture 30s par ej. référence
330	0	0	90	0	Remplissage complété
360	0	0	0	0	Vannes fermées
390	0	90	0	90	Début vidange symétrique
690	0	90	0	90	Vidange complétée
720	0	0	0	0	Vannes fermées
870	0	0	0	0	Repos
900	90	0	0	0	Remplissage dégradé : loi d'ouverture 30s par ej. réduit
1350	90	0	0	0	Remplissage complété
1380	0	0	0	0	Vannes fermées
1410	0	90	0	90	Début vidange symétrique
1710	0	90	0	90	Vidange complétée
1740	0	0	0	0	Vannes fermées
1890	0	0	0	0	Repos

Tableau 4-3 : Protocole de mesure

Avec V1 : Vanne amont gauche
V2 : Vanne aval gauche
V3 : Vanne amont droit
V4 : Vanne aval droit

Le côté gauche correspond au bajoyer de l'éjecteur réduit.
Le côté droit correspond au bajoyer de l'éjecteur référence.

Un repos de 2 min 30 secondes est appliqué avant un nouveau remplissage afin de laisser le temps au plan d'eau de se stabiliser et d'éviter des perturbations parasites.

Comme il a été développé par M. Lenaerts et I. El Ouamari lors de leur TFE et sera rappelé à la section 5.1, le temps de remplissage en mode dégradé par éjecteur de référence est 330 s et pour éjecteurs de réduit est de 480 s. La vidange se fait de manière symétrique en 330 s, afin d'économiser du temps et de plus, l'étude ne porte pas sur cela.

Pour pouvoir être utilisé par Hydrocap 3, le protocole doit être transposé sous un format ".txt".

4.4.2 Nomenclature

Pour les 2 premières parties portant sur les mesures de vitesse, chaque essai a été réalisé suivant le protocole défini ci-dessus. À partir de cela, un fichier ".dat" est généré par le logiciel HydroCap 3. Afin de pouvoir différencier les fichiers résultats et de les classer, une nomenclature a été définie :

PX_Y

Où PX correspond à la Position horizontale X de la sonde dans le sas avec X qui varie de 1 (l'axe verticale le plus à droite) à 5 (l'axe verticale le plus à gauche).

Y correspond à la hauteur de la sonde par rapport au radier. Les mesures étant réalisées tous les 2 cm verticalement, Y varie de 2 à 50 par 2.

Pour les mesures doublées, le suffixe "bis" est rajouté à la nomenclature de base et pour les mesures triplées, le suffixe "tri".

Exemple :

P2_24 signifie que la sonde de vitesse est placée à la position 2 à une hauteur de 24 cm du radier (Figure 4-44).

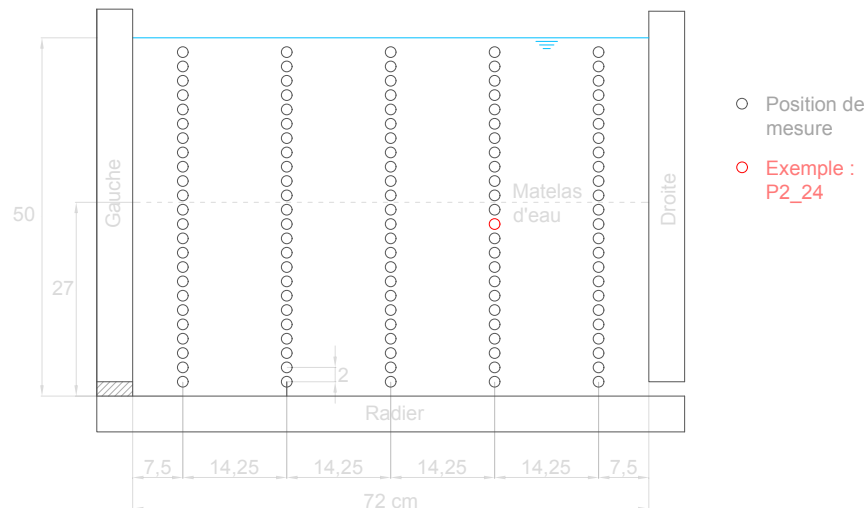


Figure 4-44 : Maillage - Prises de mesure de vitesse sans bateau - Nomenclature

Concernant les essais avec bateau, le préfixe "Bat" est rajouté à la nomenclature de base. L'ajout du bateau dans le sas modifie le repère de Y qui n'est plus le radier mais le fond du bateau.

Exemple :

Bat_P3_4_bis signifie que la sonde de vitesse a été placée, en présence du bateau, à la position 3 à une hauteur de 4 cm par rapport au fond du bateau. Il s'agit de la deuxième mesure pour ce point.

Les fichiers résultats ont été enregistrés dans un dossier nommé par date de réalisation des essais.

Les premières lignes du fichier résultats contiennent toutes les informations de l'essai : la date, la description de l'essai, le nom de l'opérateur et le détail de toutes les entrées (capteur, sonde, ...). [1]

Pour la 3^{ème} partie, les mesures de différence de pression, la nomenclature utilisée est la suivante :

P°_PA_B

Où P° correspond à l'essai concernant les mesures de pression.

PA correspond à la position verticale le long de la carène de la tige par rapport au fond du bateau avec A qui varie de 0 (la position en dessous du bateau) à 5 (la position le plus proche de la surface libre).

B correspond à la position de la tige par rapport au bateau. B peut valoir G pour gauche et D pour droite.

Pour les mesures réalisées entre les éjecteurs, le suffixe "En" est rajouté à la nomenclature de base. Le cas par défaut étant au droit des éjecteurs, aucun suffixe n'a été rajouté.

Exemple :

P°_P2_G signifie qu'on mesure les différences de pression avec les tiges mobiles positionnées à la position 2 (voir maillage) à la gauche du bateau au droit de l'éjecteur de référence (Figure 4-45).

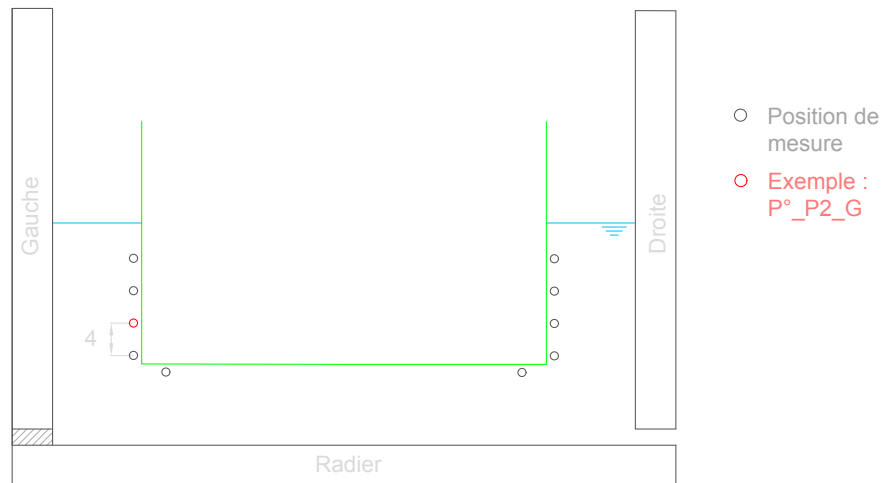


Figure 4-45 : Maillage - Prises de mesure de pression - Nomenclature

Pour la dernière partie, la mesure de roulis via les capteurs de position à corde, la nomenclature utilisée est la suivante :

H_X

Où H correspond aux essais pour les mesures de roulis.

X correspond au numéro d'essai

Exemple :

H_3 signifie qu'on mesure les hauteurs de corde avec les capteurs de position à corde. Il s'agit du 3^{ème} essai.

4.4.3 Mesure du champ de vitesse

▪ Sans bateau

Les mesures ont été prises via une sonde de vitesse électromagnétique (SV) et six capteurs de niveau à ultrasons (US). Le plan de l'écluse avec les dispositifs de mesure est visible à la Figure 4-46 et le maillage pour les prises de vitesse à la Figure 4-47. La position de prises de mesure est réalisée verticalement tous les 2 cm. Les mesures ont été prises au droit de l'éjecteur et devant le 6^{ème} éjecteur/larron.

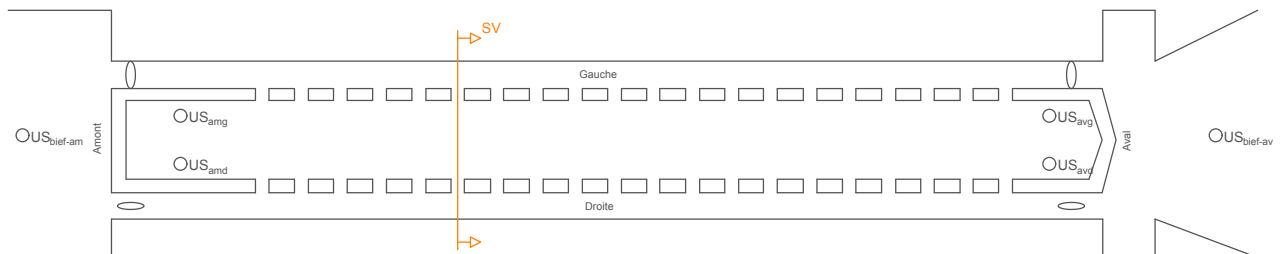


Figure 4-46 : Plan modèle réduit - Prises de vitesse sans bateau

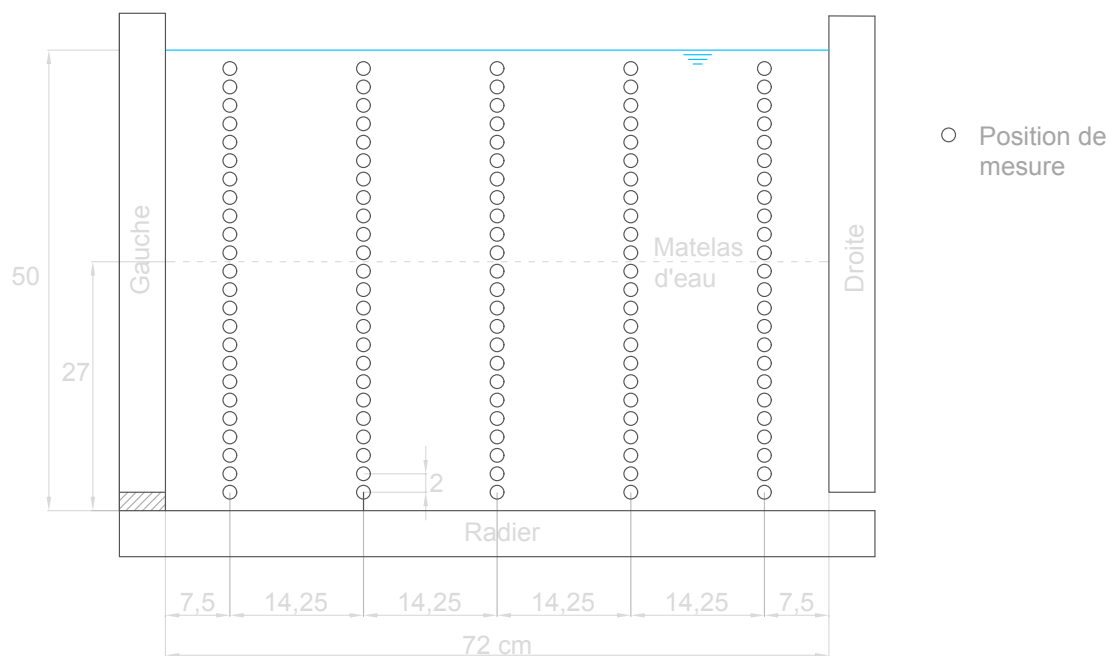


Figure 4-47 : Coupe Maillage - Prises de vitesses sans le bateau

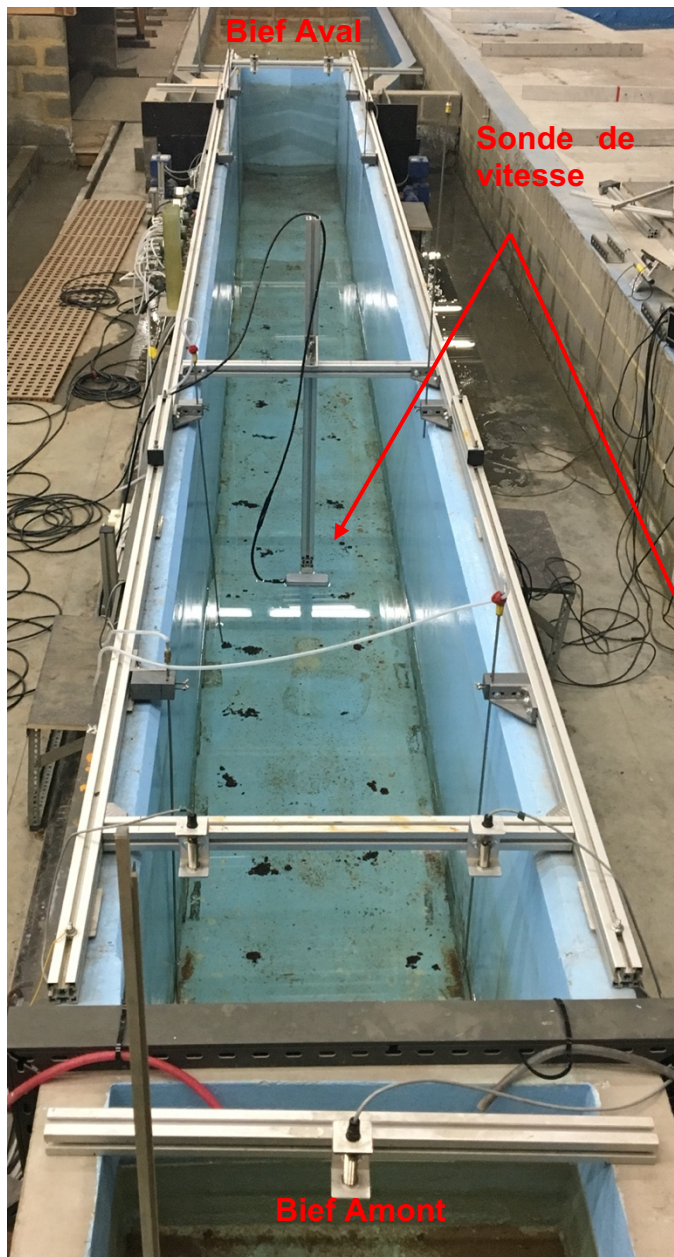


Figure 4-48 : Modèle réduit avec sonde de vitesse

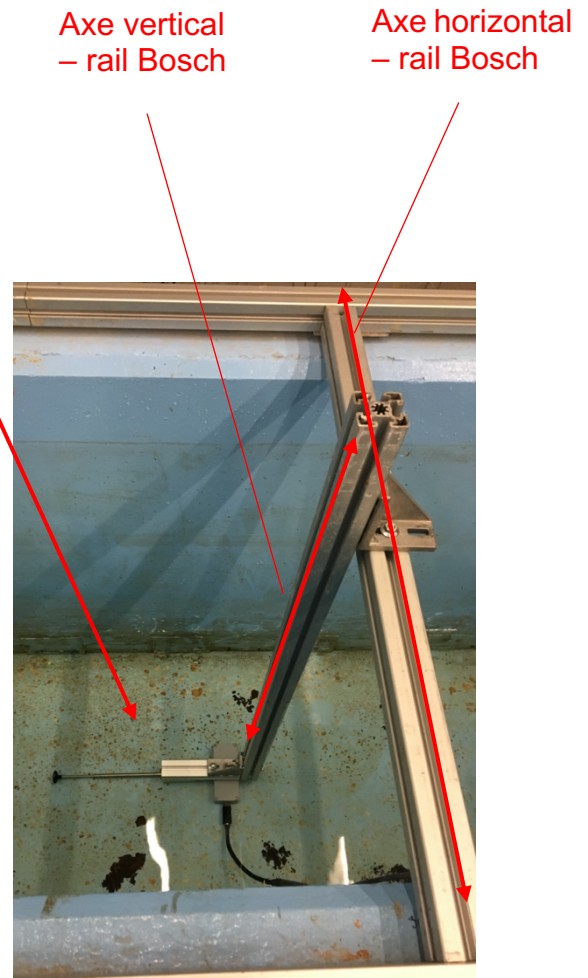


Figure 4-49 : Modèle réduit avec sonde de vitesse - Zoom

La Figure 4-48 et la Figure 4-49 permettent d'observer le dispositif utilisé sur le modèle réduit pour la mesure de la vitesse sans le bateau dans le sas. La sonde de vitesse suit les positions définies par le maillage illustré ci-dessus. Le système de fixation via les rails Bosch permet son déplacement verticalement et horizontalement. À noter que des études préalables, dont les résultats détaillés sont disponibles en annexe, ont été réalisées pour voir l'influence du dispositif sur l'écoulement au niveau de la tête de la sonde, où se situent les électrodes. L'étude a permis de conclure qu'aucune perturbation significative impacte la mesure de la vitesse.

▪ Avec bateau

Les mesures ont été prises via une sonde de vitesse électromagnétique (SV) et six capteurs de niveau à ultrasons (US). Le plan de l'écluse avec les dispositifs de mesure est visible à la Figure 4-50 et le maillage pour les prises de vitesse à la Figure 4-51. La position de prises de mesure est réalisée verticalement tous les 2 cm. Les mesures ont été prises sur la même coupe transversale que les prises de mesures sans bateau, soit au droit de l'éjecteur et devant le 6^{ème} éjecteur/larron.

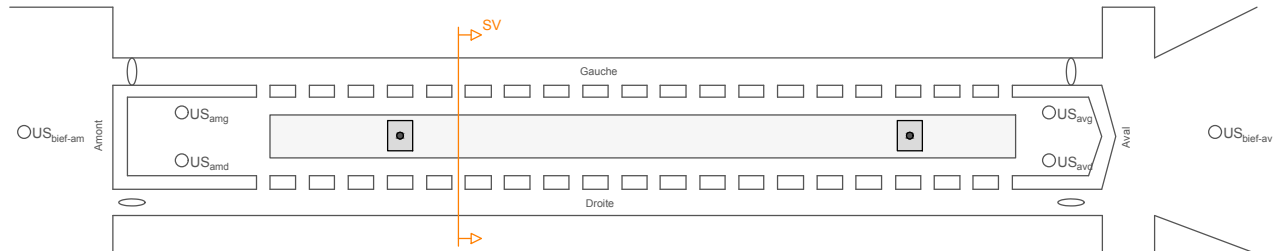


Figure 4-50 : Plan modèle réduit - Prises de vitesses avec bateau

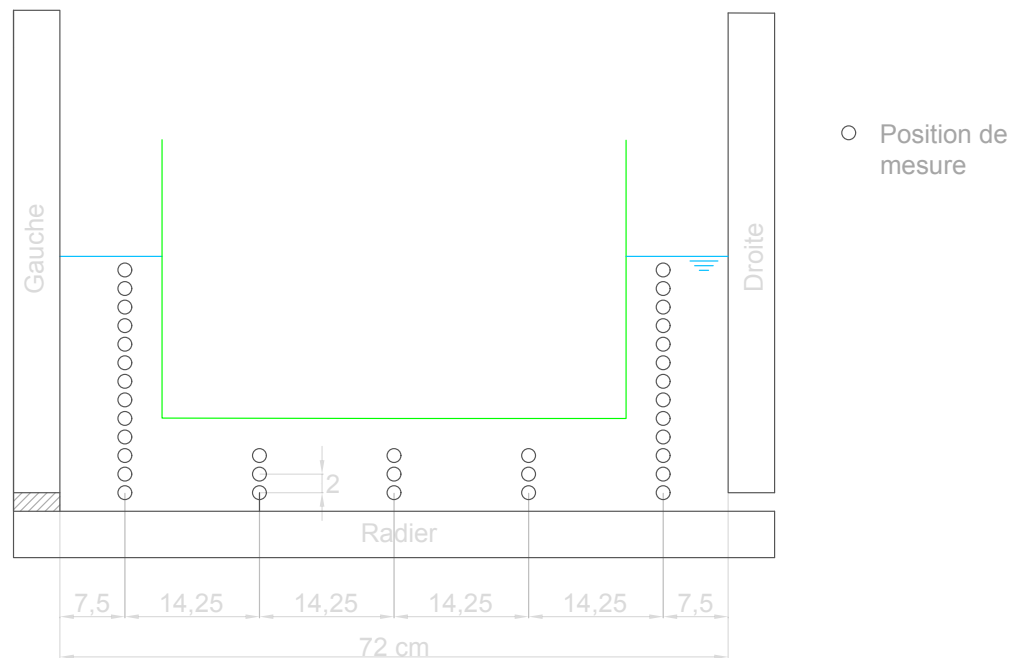


Figure 4-51 : Coupe Maillage - Prises de vitesse avec bateau

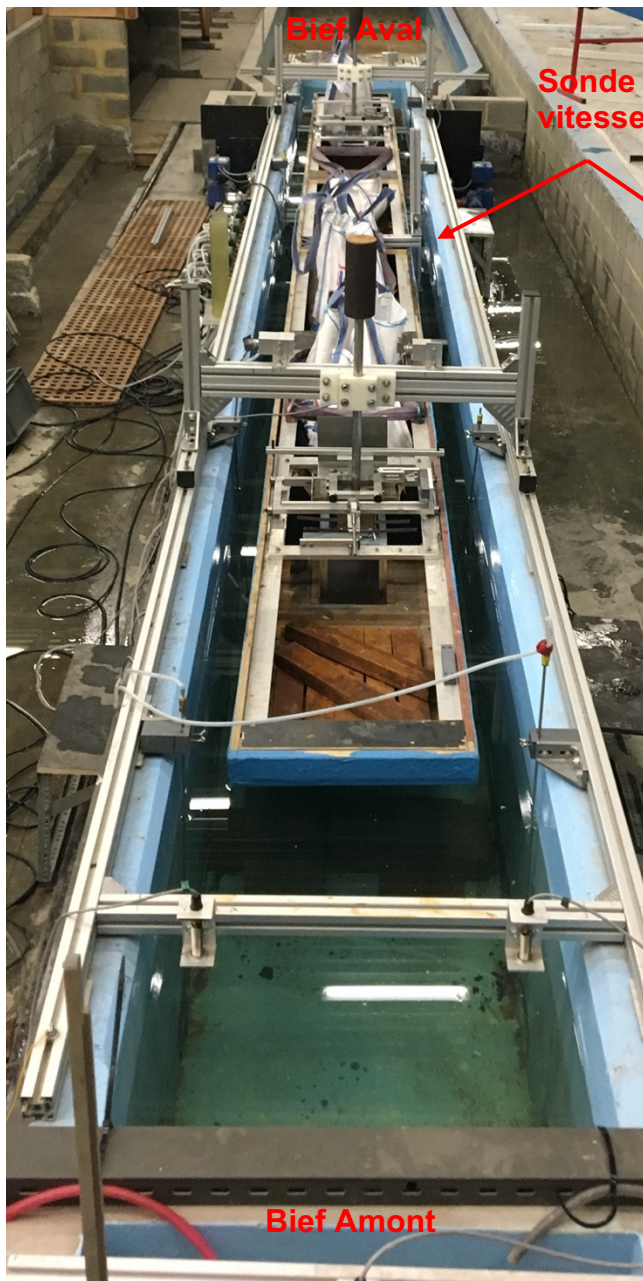


Figure 4-52 : modèle réduit avec sonde de vitesse et bateau



Figure 4-53 : Sonde de vitesse sur bateau -
Mesure en-dessous

Axe vertical
– rail Bosch

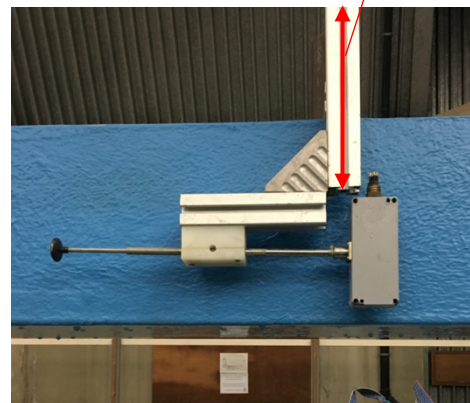


Figure 4-54 : Sonde de vitesse sur bateau -
Mesure latérale

La Figure 4-52, la Figure 4-53 et la Figure 4-54 permettent d'observer le dispositif utilisé sur le modèle réduit pour la mesure de la vitesse avec bateau dans le sas. La sonde de vitesse suit des positions définies par le maillage illustré sur la Figure 4-51. Le système de fixation via les rails Bosch permet son déplacement uniquement de manière verticale. Pour le déplacement horizontal, donc la mesure d'un autre axe vertical, le dispositif en entier est déplacé dans le cas de la mesure latérale. Pour la mesure en dessous, le dispositif est modifié en déplaçant la sonde sur le petit rail visible sur la Figure 4-53. En réalité, il y a un second rail placé parallèlement au premier afin d'assurer que la sonde reste fixe durant les essais. Ce dispositif, permet d'éviter de sortir le bateau du sas pour changer la configuration entre 2 essais.

4.4.4 Mesure des différences de pression

La Figure 4-55 définit la position des capteurs. On retrouve les six capteurs de niveaux à ultrasons (US) et les trois capteurs de pression différentielle (P_{diff}) correspondant à trois cas de mesure, visibles sur la Figure 4-55 :

- Le cas Carène (P_{diff-1}), permet de comparer la force hydrostatique agissant sur la carène de chaque côté du bateau.
- Le cas Bajoyer (P_{diff-2}), est utilisé pour déterminer la mesure de la pente d'eau au sein du sas.
- Le cas Carène-Référence (P_{diff-3}), permet de comparer la force hydrostatique agissant sur la carène par rapport à une position de référence.

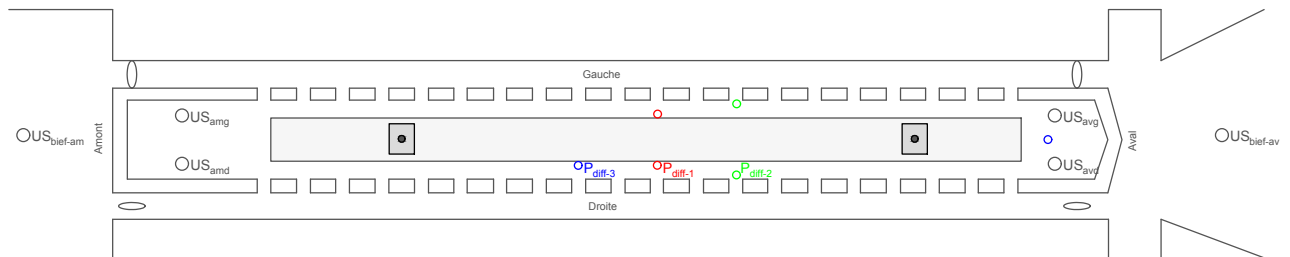


Figure 4-55 : Plan modèle réduit - Prises de pression avec bateau

Les 3 cas utilisent les tubes droits pour leurs prises de mesure. Le tube coudé est utilisé seulement dans le cas Carène-Référence pour la prise de mesure en dessous du bateau.

Certaines données brutes ont été adimensionnalisées afin de permettre une interprétation efficace.

La pente d'eau S_w est déterminée à partir de la différence de niveau d'eau Δh [m] mesurée à partir des capteurs de pression différentielle dans le cas Bajoyer divisé par la largeur du sas l_s [m] :

$$S_w = \frac{\Delta h}{l_s} \cdot 1000 [\text{‰}]$$

Ci-dessous, on retrouve les maillages pour chacun des 3 cas ainsi qu'une représentation sur le modèle réduit :

▪ Cas Carène (P_{diff-1})

Les positions des prises de pression sont effectuées sur un même plan horizontal, soit à la même hauteur par rapport au fond du bateau, lors d'un essai pour permettre une comparaison pertinente. Il y a 2x4 positions de prises de mesure, 2 car chaque prise de mesure est réalisée simultanément de chaque côté du bateau au même niveau horizontal et 4 car on déplace la prise de mesure verticalement quatre fois le long de la carène, espacé entre eux de 4 cm (Figure 4-56). On compare les deux positions de mesure qui ont la même hauteur.

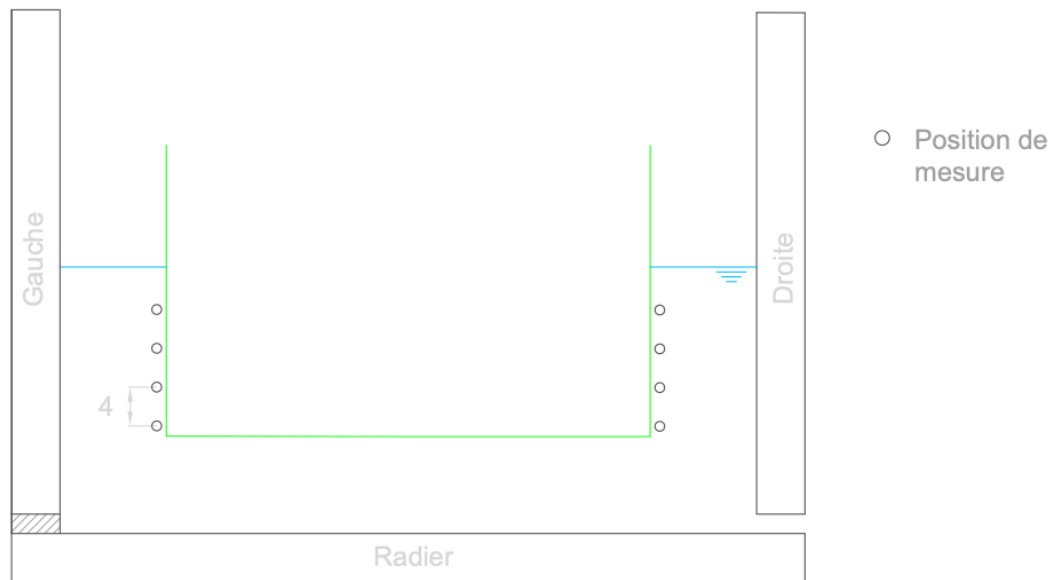


Figure 4-56 : Coupe Maillage - Prises de pression avec bateau - Cas Carène (P_{diff-1})

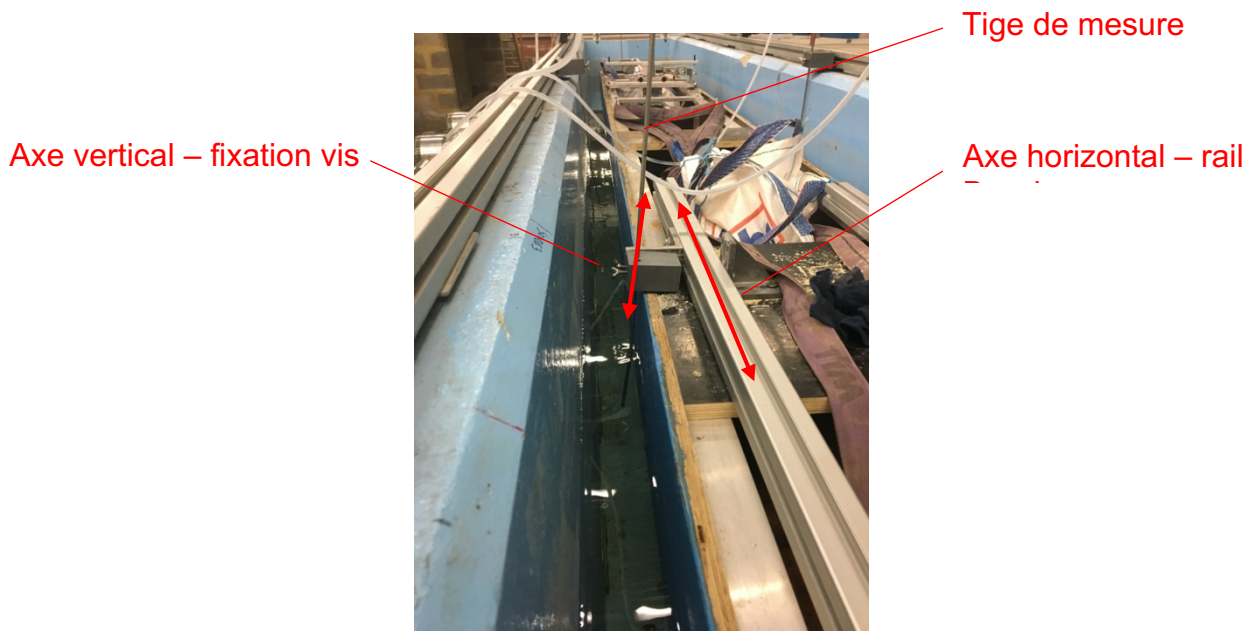


Figure 4-57 : Image modèle réduit - Prises de pression avec bateau – Cas Carène (P_{diff-1})

La Figure 4-57 permet d'observer le dispositif utilisé sur le modèle réduit pour la mesure du cas carène. La tige est localisée le long de la carène et le système fixation permet de la déplacer verticalement afin de mesurer les différentes positions définies. Le déplacement horizontal est réalisé sur le rail Bosch permettant la mesure au droit de l'éjecteur et entre les éjecteurs.

■ Cas Bajoyer (P_{diff-2})

La position à 25 cm du radier du sas est fixe durant les essais (Figure 4-58). Cette position pertinente a été déterminée par M. Lenaerts et I. El Ouamari lors des essais durant leur TFE, expliqué précédemment à la section 4.2.4. Les deux positions de mesure sont comparées entre elles.

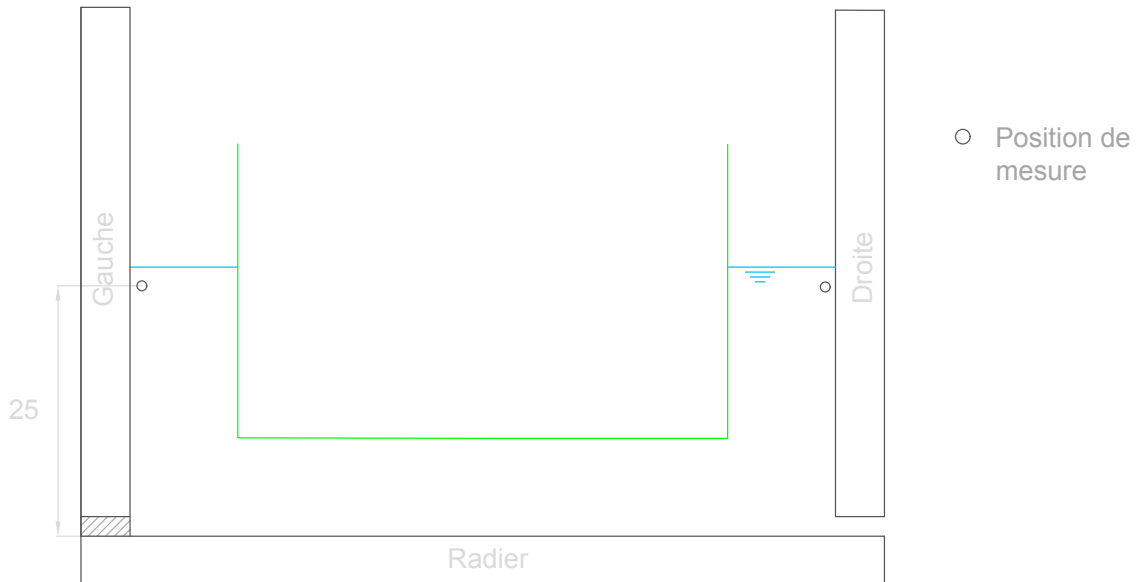


Figure 4-58 : Coupe Maillage - Prises de pression avec bateau - Cas Bajoyer (P_{diff-2})



Tige de mesure

Figure 4-59 : Image modèle réduit - Prises de pression avec bateau - Cas Bajoyer (P_{diff-2})

La Figure 4-59 permet d'observer le dispositif utilisé sur le modèle réduit pour la mesure du cas bajoyer. La tige est localisée le long du bajoyer à une hauteur de 25 cm du radier du sas comme expliqué précédemment.

■ Cas Carène-Référence (P_{diff-3})

Pour ce cas-ci, les positions de prise de pression différentielle sont une position fixe, appelée position de référence (visible à la Figure 4-61), et une position variable le long de la carène (visible à la Figure 4-62). La position de prise de mesure est réalisée verticalement tous les 4 cm (Figure 4-60). Chaque position de mesure est comparée avec la position de référence.

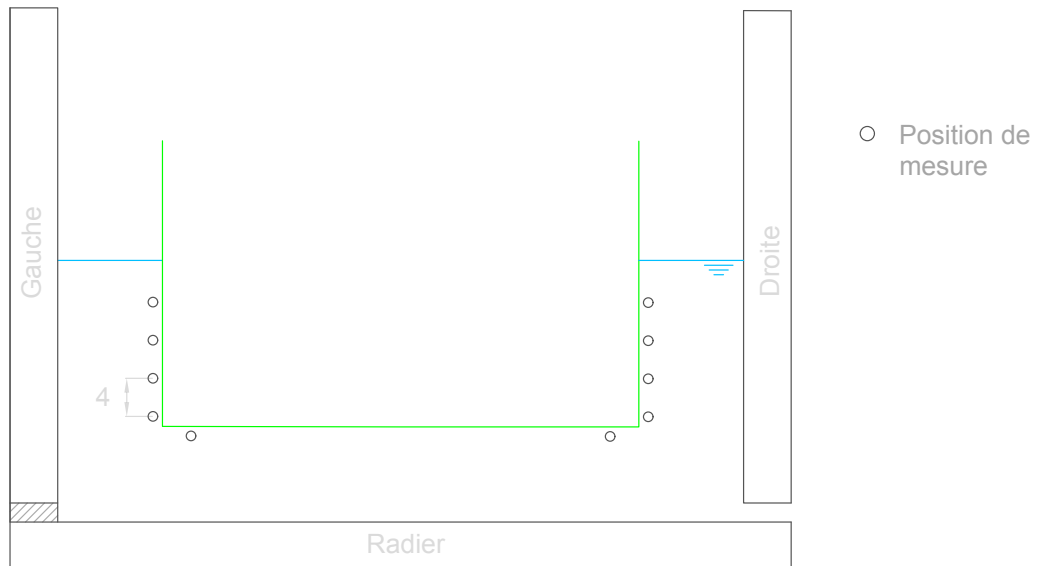


Figure 4-60 : Coupe Maillage - Prises de pression avec bateau - Cas Carène-Référence (P_{diff-3})

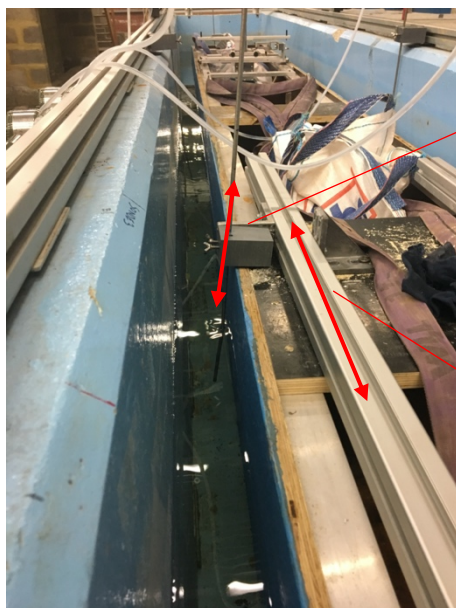


Figure 4-61 : Image modèle réduit - Prises de pression contre la carène du bateau - Cas Carène-Référence (P_{diff-3})



Figure 4-62 : Image modèle réduit - Prises de pression à la position de référence - Cas Carène-Référence (P_{diff-3})

La Figure 4-61 et la Figure 4-62 permettent d'observer le dispositif utilisé sur le modèle réduit pour la mesure du cas carène-référence. La tige de la figure gauche est localisée le long de la carène et le système fixation permet de la déplacer verticalement afin de mesurer les différentes positions définies. Le déplacement horizontal est réalisé sur le rail Bosch permettant la mesure au droit de l'éjecteur et entre les éjecteurs. La tige de la figure de droite correspond à la position de référence, elle est située à la poupe du bateau et est éloignée de la carène pour éviter les perturbations. La position de la tige est fixe, mais le dispositif se déplace avec le bateau lors des sassements.

4.4.5 Mesure du roulis du bateau

La mesure de roulis est réalisée à partir de quatre capteurs à corde (CC), utilisés en binôme, et de six capteurs de niveau à ultrasons (US). La Figure 4-63 permet de visualiser leur position.

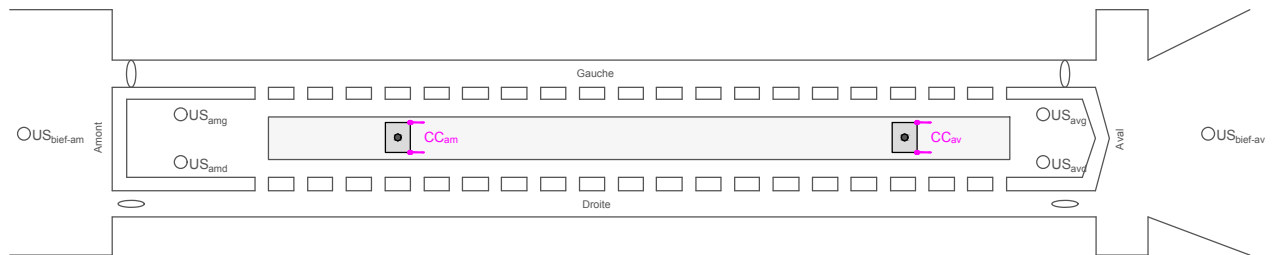


Figure 4-63 : Plan modèle réduit - Prises de roulis du bateau

Un binôme de capteurs est placé à l'amont et un autre à l'aval. Le roulis est déterminé par la différence de distance entre les deux capteurs d'un binôme. Le deuxième binôme permet de vérifier les résultats obtenus. Le principe de fonctionnement est illustré à la Figure 4-64. La distance mesurée par les deux capteurs situés sur le même portique (binôme) est représentée par les flèches rouges. Comme expliqué à la section 4.2.5, la différence des distances mesurées ramenée à l'écart entre les deux capteurs permettra de déterminer le roulis du bateau. L'interprétation des données brutes nécessite de les adimensionnaliser. Le roulis S_v est déterminé par la différence de niveau de la barge Δr [m], obtenu par les mesures de la distance verticale par les capteurs à cordes, divisé par la distance horizontale l_c [m] entre les deux capteurs :

$$S_v = \frac{\Delta r}{l_c} \cdot 1000 \text{ [‰]}$$

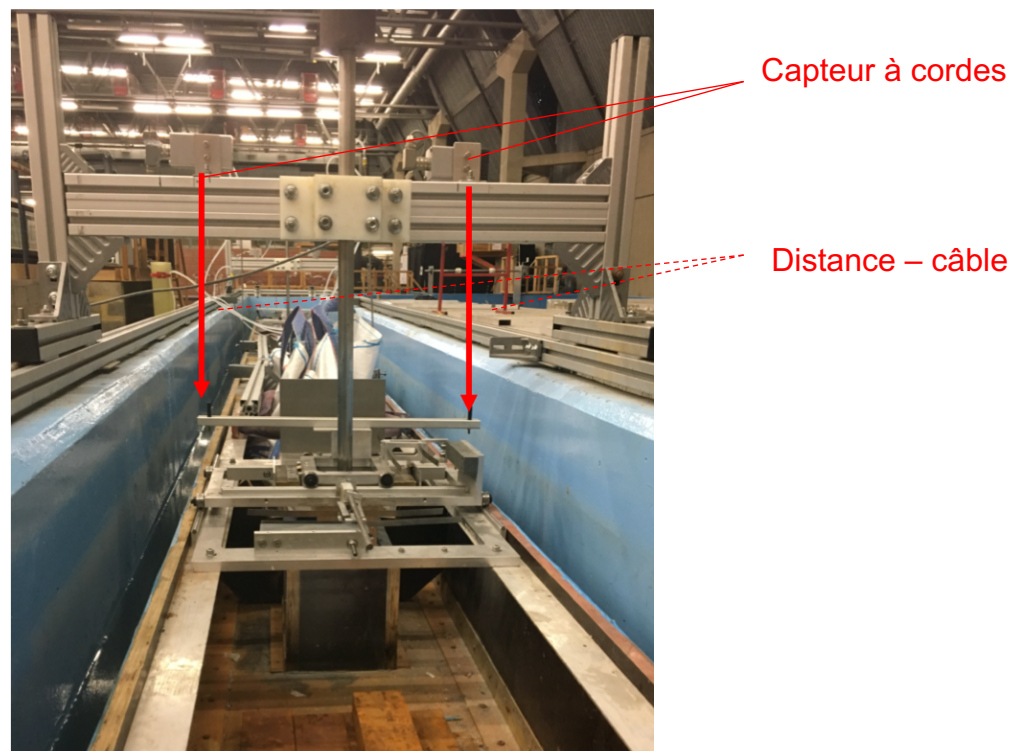


Figure 4-64 : Prises de roulis

5 Résultats

5.1 Notes préliminaires

5.1.1 Convention de signe

Afin de pouvoir comparer plus facilement les résultats obtenus, il nous est apparu utile de reprendre les mêmes conventions de signes de grandeurs physiques que le travail de fin d'étude de El Ouamari et Lenaerts (2019).

Pour rappel, les rives gauche et droite d'une écluse sont déterminées en regardant vers l'aval.

Dans le cadre des essais réalisés en mode dégradé, l'aqueduc droit était fonctionnel et l'aqueduc gauche était fermé, comme indiqué par la Figure 5-1. La capacité de fonctionnalité des aqueducs est fonction de l'ouverture ou non de la vanne correspondante à l'aqueduc. Pour des raisons pratiques, les éjecteurs de référence ont été gardés sur l'aqueduc droit et les éjecteurs de réduit ont été placés sur l'aqueduc gauche. Ainsi afin de réduire le nombre de manipulations, les essais ont été réalisés de manière inversée. Pour faciliter la comparaison et conserver la même convention, les résultats ont été symétrisés (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

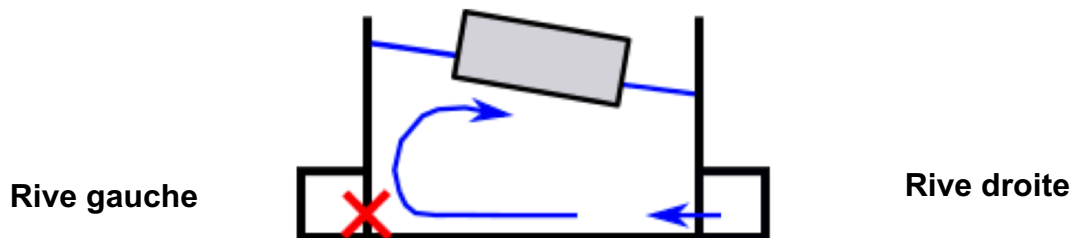


Figure 5-1 : Coupe transversale - Remplissage en mode dégradé (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

Les grandeurs physiques étudiées sont définies et illustrées sur la Figure 5-2 comme suit :

- "Le débit (Q) : est défini positif lors que le sas se remplit et négatif lorsque le sas se vide.
- La pente d'eau transversale (S_w) : est définie positive lorsque le niveau d'eau de la rive gauche est plus élevé que le niveau d'eau de la rive droite.
- La pente de roulis (S_v) : est déterminée positive lorsque le niveau de la barge à gauche est plus élevé que le niveau de la barge à droite.
- Les composantes transversale V_x et verticale V_y de la vitesse de l'eau : sont définies positives lorsque dirigées vers le bajoyer gauche et vers la surface libre, respectivement." (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

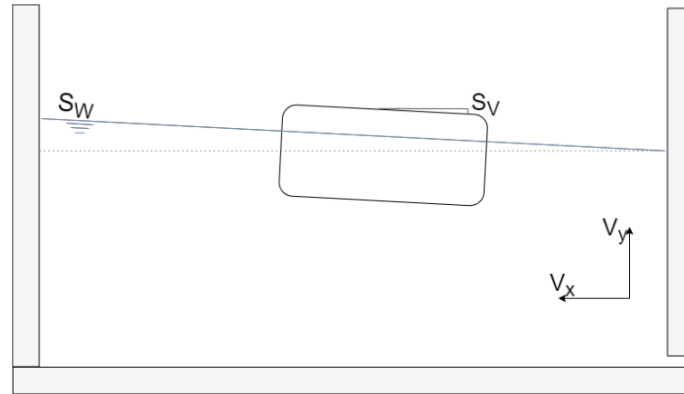


Figure 5-2 : Convention de signes (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

5.1.2 Lissage des données

Lors de la campagne de mesure, les essais ont été réalisés avec une fréquence de 5 Hz, soit 5 mesures toutes les secondes. Afin d'atténuer les perturbations ou les bruits de mesure et dans le but de réduire les disparités pour mieux mettre en évidence les tendances des phénomènes étudiés, un lissage est réalisé avec une moyenne mobile sur 5 secondes, soit 26 mesures, l'équation vaut (El Ouamari et Lenaerts, 2019 : Wikipédia, 2020) :

$$X_n = \text{moyenne}(X_{n-13}, X_{n+13})$$

5.1.3 Répétabilité des mesures

Lors de la campagne de mesure pour les mesures de vitesse, tous les essais n'ont pas été systématiquement répétés. Vu la durée très importante de par le nombre élevé d'essais à réaliser, il a été décidé de répéter les essais seulement pour quelques points. Également, afin d'assurer la validité des résultats obtenus, les résultats ont été comparés avec les résultats obtenus lors du TFE de El Ouamari et Lenaerts. La concordance des résultats entre les essais répétés et les essais effectués lors du TFE de El Ouamari et Lenaerts a consolidé ce choix.

Pour les mesures de pression différentielle et les mesures de roulis, chaque essai a été réalisé 2 fois afin d'assurer la validité des mesures.

Sur la Figure 5-3, on peut observer trois essais pour la mesure de la vitesse aux mêmes positions et pour les mêmes conditions d'essai (loi d'ouverture 30 s, éjecteur de référence). On remarque que les résultats concordent entre eux. On considère alors ces essais comme valides et utilisables pour le TFE. A noter que Vx_E1 et Vx_E2 correspondent respectivement au premier essai et deuxième essai réalisé par moi-même et Vx_M&I correspond à l'essai réalisé par M. Lenaerts et I. El Ouamari.

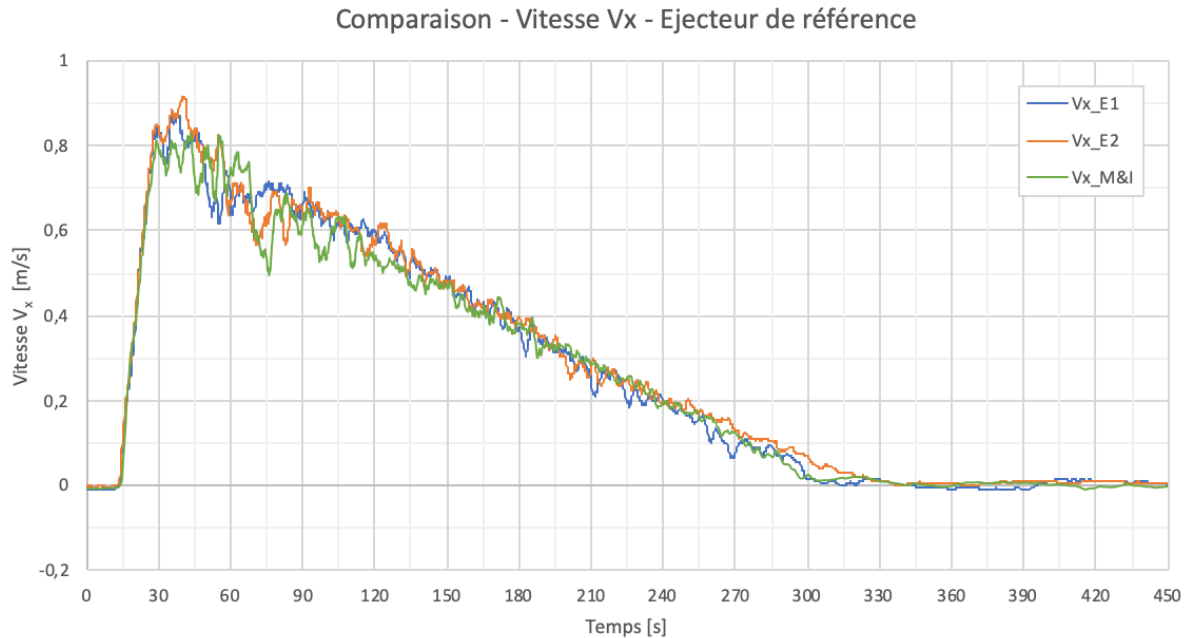


Figure 5-3 : Répétabilité des essais - Comparaison des vitesses (données lissées)

Lorsque les résultats sont contradictoires, après analyse des données, entre le premier essai et l'essai bisé, nous réalisons alors un nouvel essai jusqu'à avoir une concordance entre les résultats et des résultats pertinents. La pertinence de l'essai porte sur la validité des mesures et de manière plus concrète sur le fait que les capteurs et les sondes ont bien été calibrés.

5.1.4 Hydrogramme et Limnigramme

L'hydrogramme et le limnigramme permettent de représenter respectivement l'évolution du niveau d'eau et l'évolution du débit dans le sas en fonction du temps. Lors de leur TFE, El Ouamari et Lenaerts ont réalisé les hydrogrammes et limnigrammes du mode normal et du mode dégradé. Ils permettent de quantifier l'influence du mode dégradé par rapport au mode normal sur le temps de sassement. Cette sous-section a pour objectif de reprendre leur développement et leurs conclusions afin de permettre au lecteur une meilleure compréhension des essais réalisés dans ce travail. Étant donné que ce travail porte sur l'étude des phénomènes lors d'un remplissage, seulement la partie consacrée à ce dernier sera présentée (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

Les hydrogrammes et limnigrammes, présentés ci-dessous, sont les résultats d'essais réalisés avec la configuration suivante :

- Mode dégradé comparé au mode normal.
- Loi d'ouverture de vanne linéaire de 30 s.
- Éjecteur de référence (8cm x 1cm).
- Sas sans barge.

Pour obtenir ces graphes, leurs résultats ont été traités de la manière suivante : "l'évolution du niveau d'eau moyen est directement tirée de la moyenne des mesures des 4 capteurs de distance à ultrasons. Le débit est calculé à partir de la relation le liant à la variation de la hauteur d'eau :

$$Q = S \cdot \frac{dh}{dt}$$

Où S est la surface du sas." (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

A partir de la Figure 5-4 et du Tableau 5-1 ci-dessous, ils ont conclu que :
 "Le débit maximum est environ deux fois plus faible en remplissage dégradé qu'en remplissage normal. Le temps de remplissage est 1,8 fois plus long en mode dégradé qu'en mode normal." (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

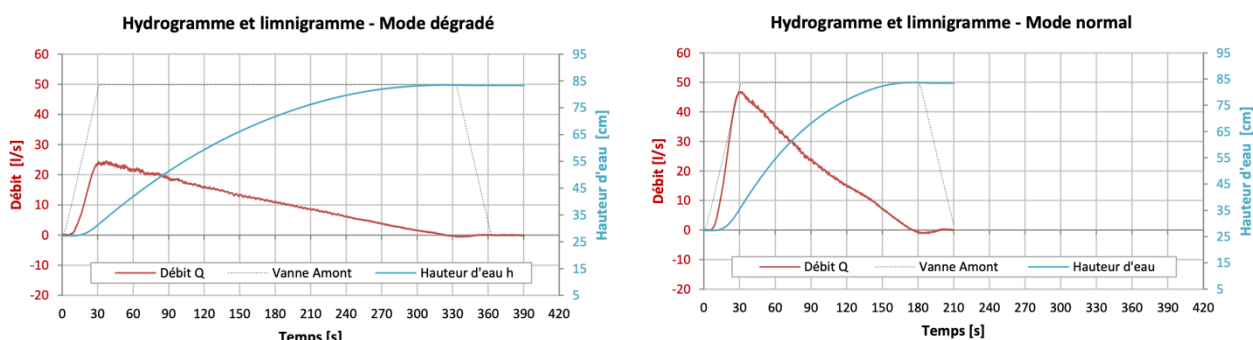


Figure 5-4 : Remplissage – Hydrogramme et limnigramme (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

	Débit maximum [l/s]	Durée de remplissage [s]
Mode dégradé	24,6	320,8
Mode normal	47,9	175,8

Tableau 5-1 : Remplissage – Comparaison entre le mode dégradé et le mode normal (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

Ils ont également conclu que la présence de la barge dans le sas n'influence pas les hydrogrammes et limnigrammes. Ces derniers sont similaires et peuvent être repris pour les essais réalisés avec bateau dans le sas (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

5.1.5 Facteur d'homothétie

Le graphe de gauche de la Figure 5-5 permet de comparer le remplissage dégradé, à niveau d'eau égal dans le sas, entre les éjecteurs de référence et les éjecteurs réduits. En effet, ces derniers étant réduits de moitié, on observe sur le graphe de droite de la Figure 5-5 que le temps de remplissage associé, avec la même loi d'ouverture de vanne, est augmenté (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

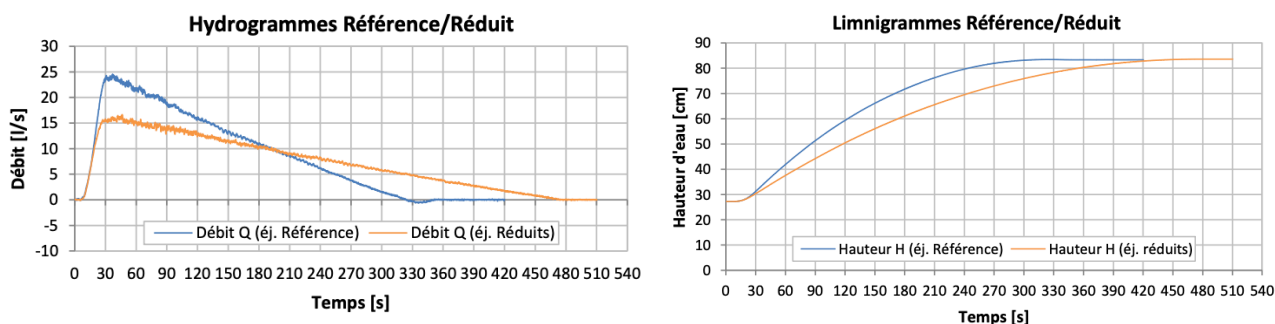


Figure 5-5 : Remplissage – Hydrogrammes et limnigrammes – Comparaison entre éjecteurs de référence et réduit (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

Avec la Figure 5-6, on peut observer l'hydrogramme original et l'hydrogramme adapté à l'évolution du niveau d'eau relative aux éjecteurs de référence. Afin de permettre une comparaison pour un remplissage à niveau égal, ils ont déterminé un facteur d'homothétie (Figure 5-7). Ce facteur permet de lier le débit adapté et le débit original. Il doit être appliqué aux champs de vitesse mesurées lors du remplissage avec les éjecteurs réduits pour permettre une comparaison pertinente avec les champs de vitesse mesurées lors du remplissage avec les éjecteurs de référence (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

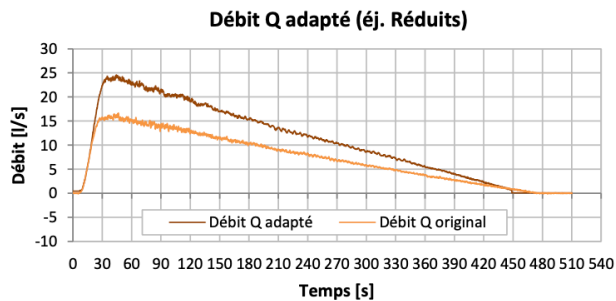


Figure 5-6 : Remplissage - Hydrogramme adapté aux éjecteurs réduits (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

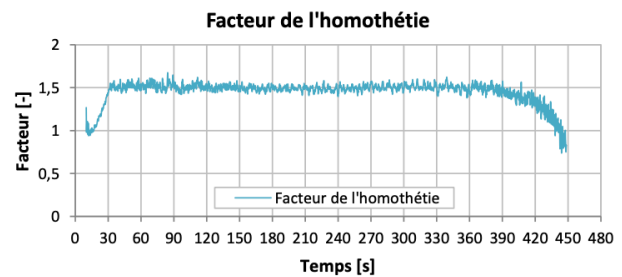


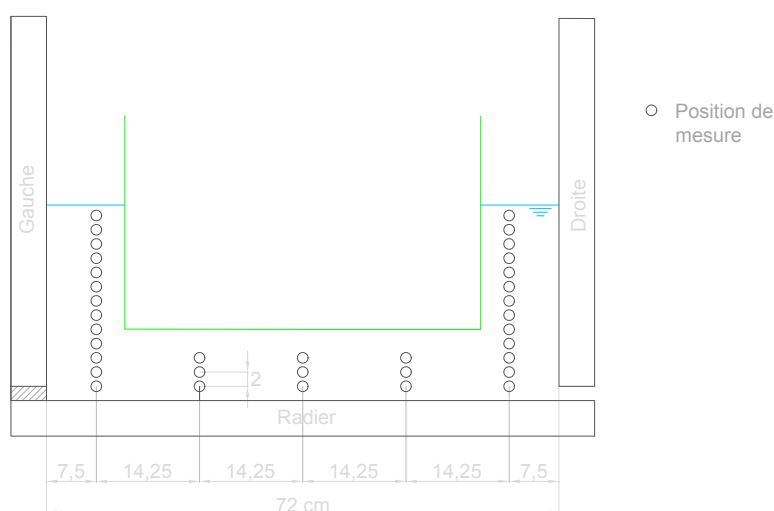
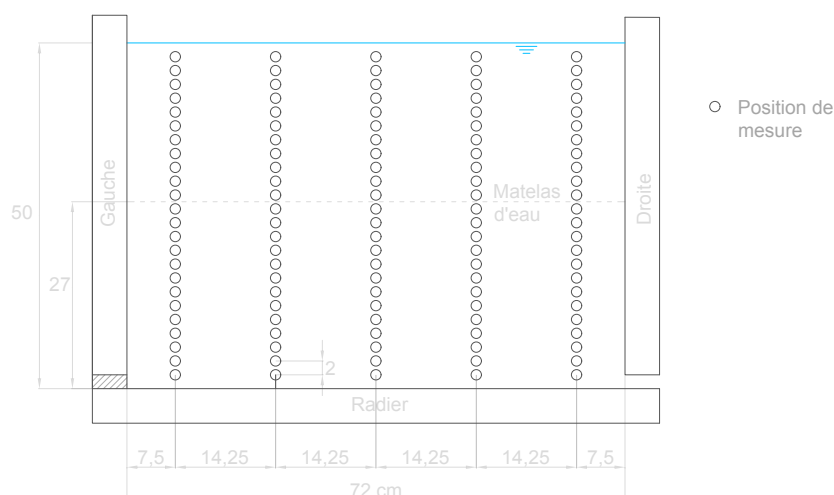
Figure 5-7 : Facteur de l'homothétie des champs de vitesses (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

5.2 Résultats Expérimentaux

5.2.1 Composantes de vitesse dans le sas

Comme introduit précédemment à la section 4, nous avons réalisé des mesures de vitesse sur le modèle réduit pour étudier les recirculations de l'eau au sein de sas lors d'un remplissage en mode dégradé. La campagne de mesures considère les deux éjecteurs disponibles : l'éjecteur de référence (8cm x 1cm) et l'éjecteur réduit (4cm x 1cm). Elle considère également les mesures de vitesse avec et sans bateau dans le sas pour une loi d'ouverture de vanne linéaire de 30s. Pour rappel, les maillages utilisés sont visibles sur la Figure 5-8 et la Figure 5-9.

Pour permettre de visualiser et de comprendre le comportement de l'eau lors d'un remplissage en mode dégradé, les mesures des champs de vitesse transversaux ont été représentés pour les différentes configurations et à différents temps de sassement.



5.2.1.1 Champ de vitesse sans bateau

1^{ère} configuration :

Sortie : Éjecteur de référence

Positionnement de la section transversale : Au droit de l'éjecteur

Cette configuration permet d'observer le phénomène giratoire.

Sur la Figure 5-11, on observe le champ de vitesse 20 secondes après l'ouverture de la vanne. Le jet sort de l'éjecteur fonctionnel et se propage sur le fond du sas jusqu'au bajoyer opposé.

A partir de la 30^{ème} seconde, le champ de vitesse est visible sur la Figure 5-12, la vanne est complètement ouverte et le débit est maximum. On observe que le jet sortant remonte le long du bajoyer opposé jusqu'à la surface libre. Dans la partie supérieure du matelas d'eau, on remarque que le champ de vitesse continue son développement, indiquant son retour vers le bajoyer fonctionnel. L'analyse globale du champ de vitesse permet de voir l'effet giratoire dans le sas.

La Figure 5-13 et la Figure 5-14 permettent d'observer le développement de l'effet giratoire respectivement à 60 secondes et 90 secondes après l'ouverture de la vanne. On observe que l'effet giratoire suit la surface libre lors du remplissage. L'observation de la partie supérieure des champs de vitesse à 30 s, 60 s et 90 s permettent de voir que l'intensité des vecteurs de vitesse diminue avec le temps dans cette zone. On lie cette diminution avec l'augmentation de la masse d'eau dans le sas. Cette diminution est également présente dans une moindre mesure au fond du sas due à la diminution du débit. Le phénomène giratoire s'amenuise avec le temps.

Cette première configuration permet de tirer une première conclusion. La création et la confirmation du phénomène giratoire lors d'un remplissage en mode dégradé (déjà observé de manière limitée par El Ouamari et Lenaerts lors de leur TFE) et l'évolution du phénomène avec la surface libre, il suit son élévation verticale. L'intensité des vitesses diffère entre la partie supérieure et inférieure, les vitesses de la partie inférieure sont nettement plus élevées que celles de la partie supérieure.

La Figure 5-10 illustre l'évolution du phénomène giratoire au cours du temps.

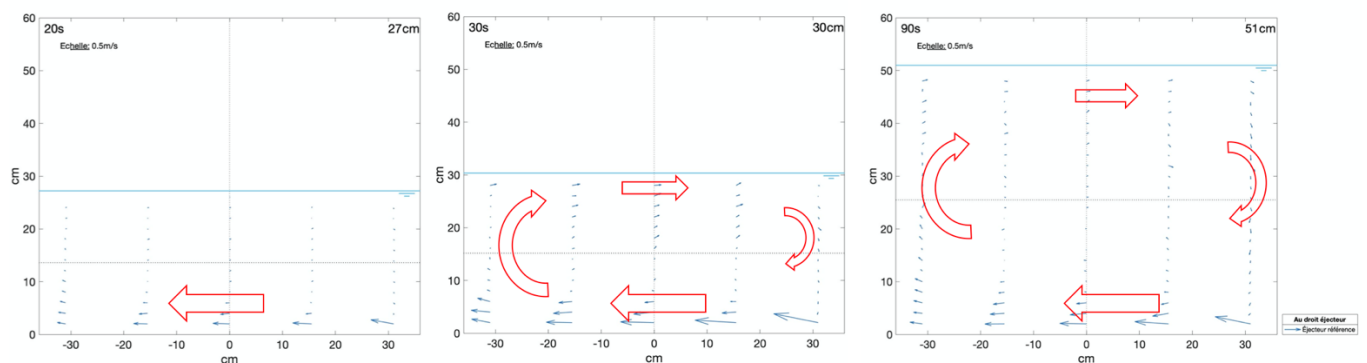


Figure 5-10 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence – Évolution

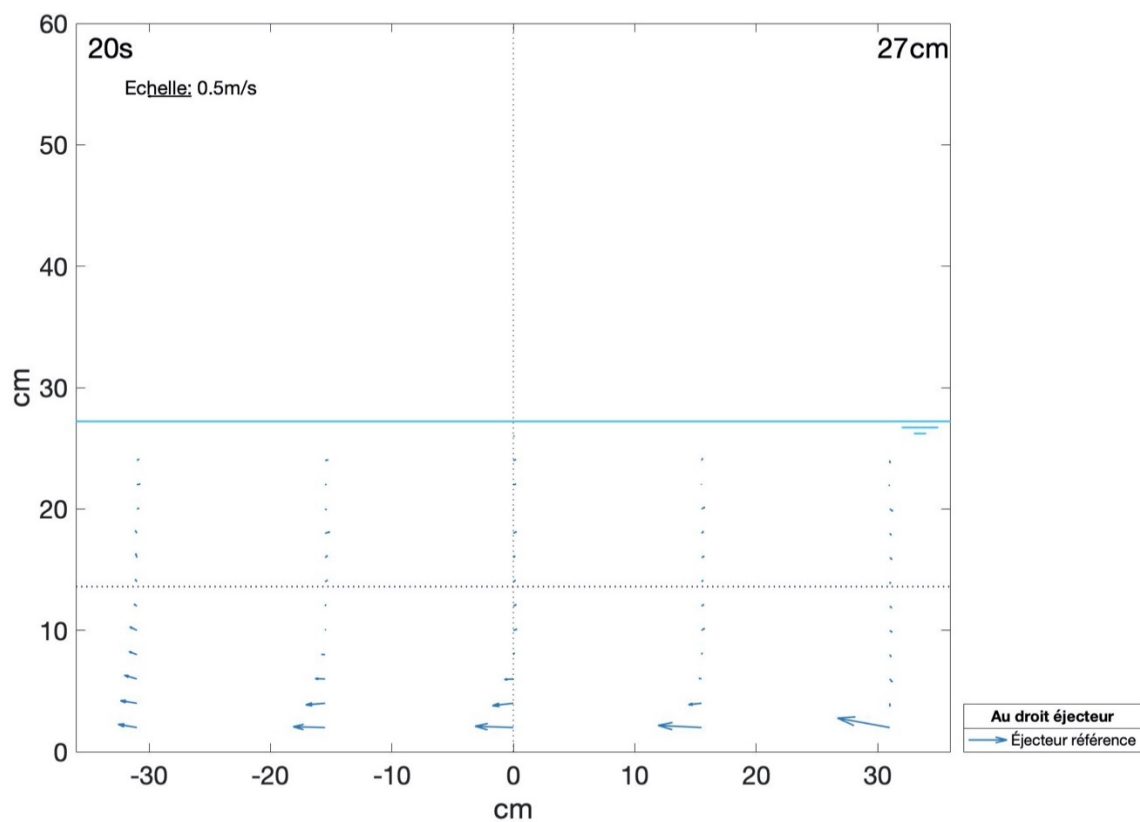


Figure 5-11 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence - 20s après ouverture

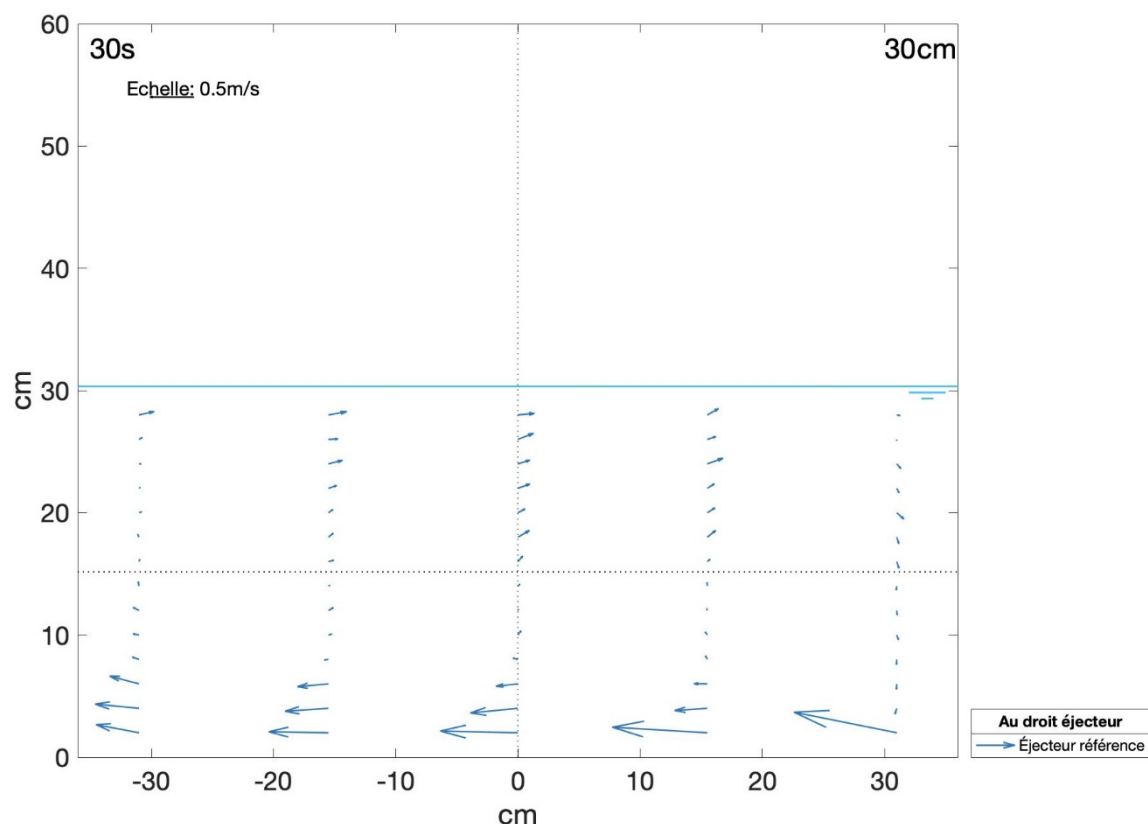


Figure 5-12 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence - 30s après ouverture

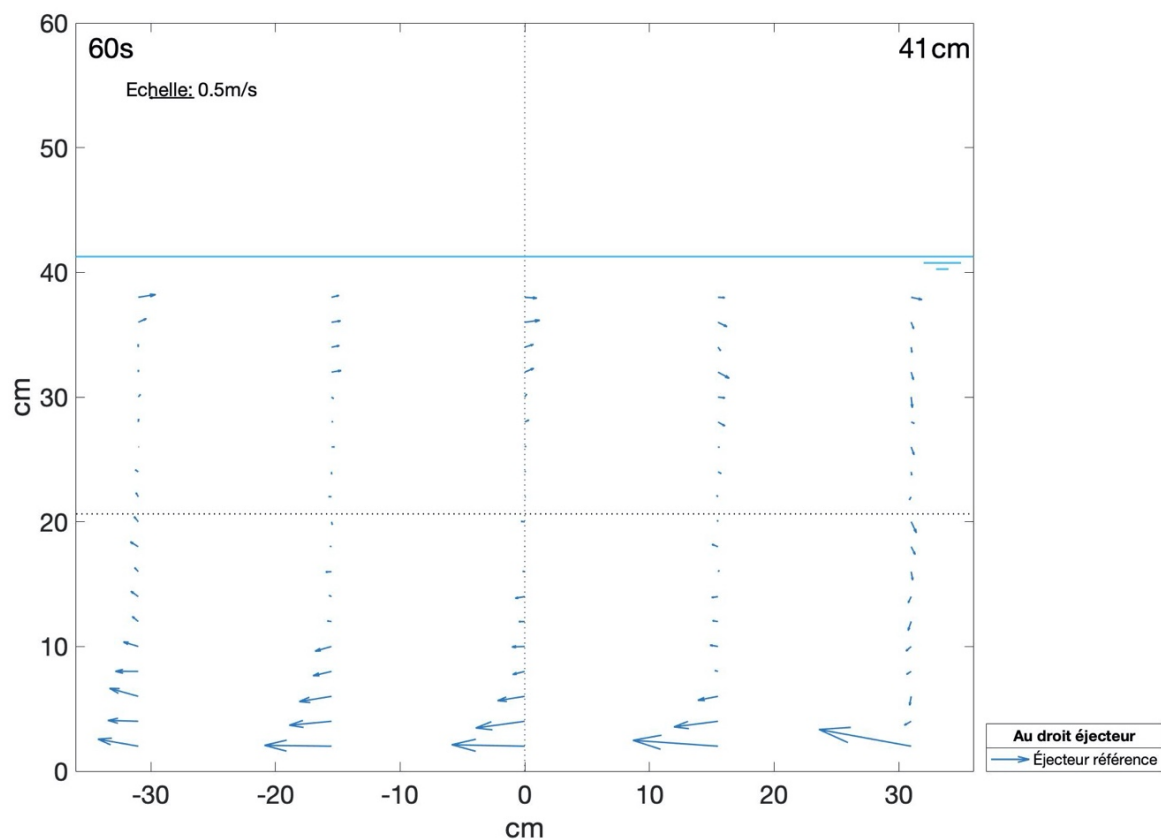


Figure 5-13 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence - 60s après ouverture

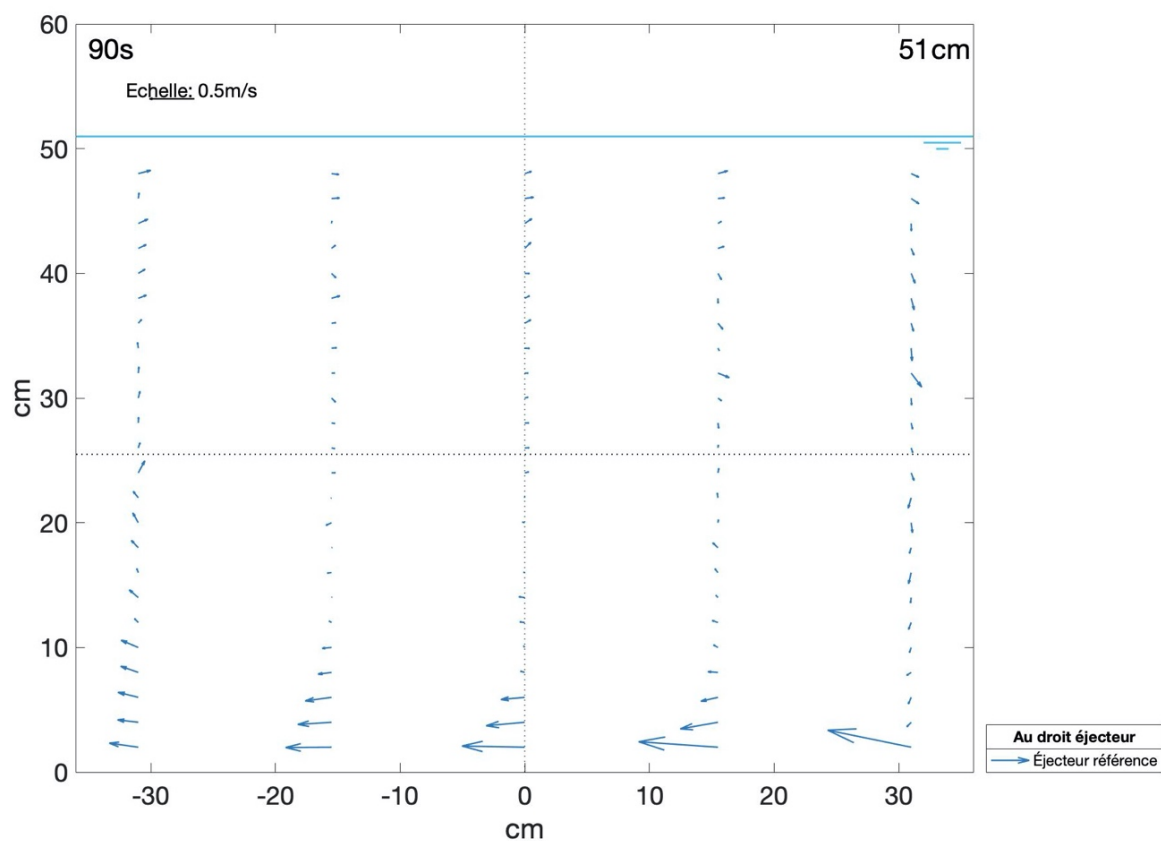


Figure 5-14 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence - 90s après ouverture

2^{ème} configuration :

Sortie : Comparaison entre éjecteur de référence et éjecteur réduit

Positionnement de la section transversale : Au droit de l'éjecteur

Cette configuration permet de comparer l'intensité du champ de vitesse pour les deux tailles d'éjecteurs différentes. Comme introduit à la section 5.1.5, le facteur d'homothétie permet d'effectuer cette comparaison pour un remplissage à niveau égal.

On observe à la Figure 5-15 et la Figure 5-16, le champ de vitesse respectivement à 20 s et 30 s après l'ouverture de la vanne. On remarque que l'intensité des vecteurs pour l'éjecteur réduit est plus importante que pour ceux de l'éjecteur de référence. On observe également que le comportement de l'eau est totalement identique dans le développement et la création du phénomène giratoire. Hormis une légère avance du développement de l'effet giratoire pour l'éjecteur réduit, bien visible dans la zone supérieure gauche du champ de vitesse à 20 s.

Sur la Figure 5-17 et Figure 5-18, on observe le champ de vitesse à 60 s et 90 s respectivement. L'intensité est toujours plus importante pour l'éjecteur réduit. Entre les deux éjecteurs, le comportement de l'eau reste identique et l'effet suit toujours la surface libre. Comme observé à la 1^{ère} configuration, l'intensité du jet d'eau diminue avec le temps et le phénomène giratoire s'amenuise. Ce dernier perdure plus longtemps dans le cas de l'éjecteur réduit. En effet, on a atteint une plus haute intensité des vecteurs de vitesse pour une même masse d'eau car le jet se diffuse sur une largeur réduite.

Cette comparaison permet de tirer une conclusion et conforter l'analyse réalisée par El Ouamari et Lenaerts. La taille des éjecteurs n'influence pas le comportement global de l'eau mais seulement l'intensité et la durée du phénomène giratoire.

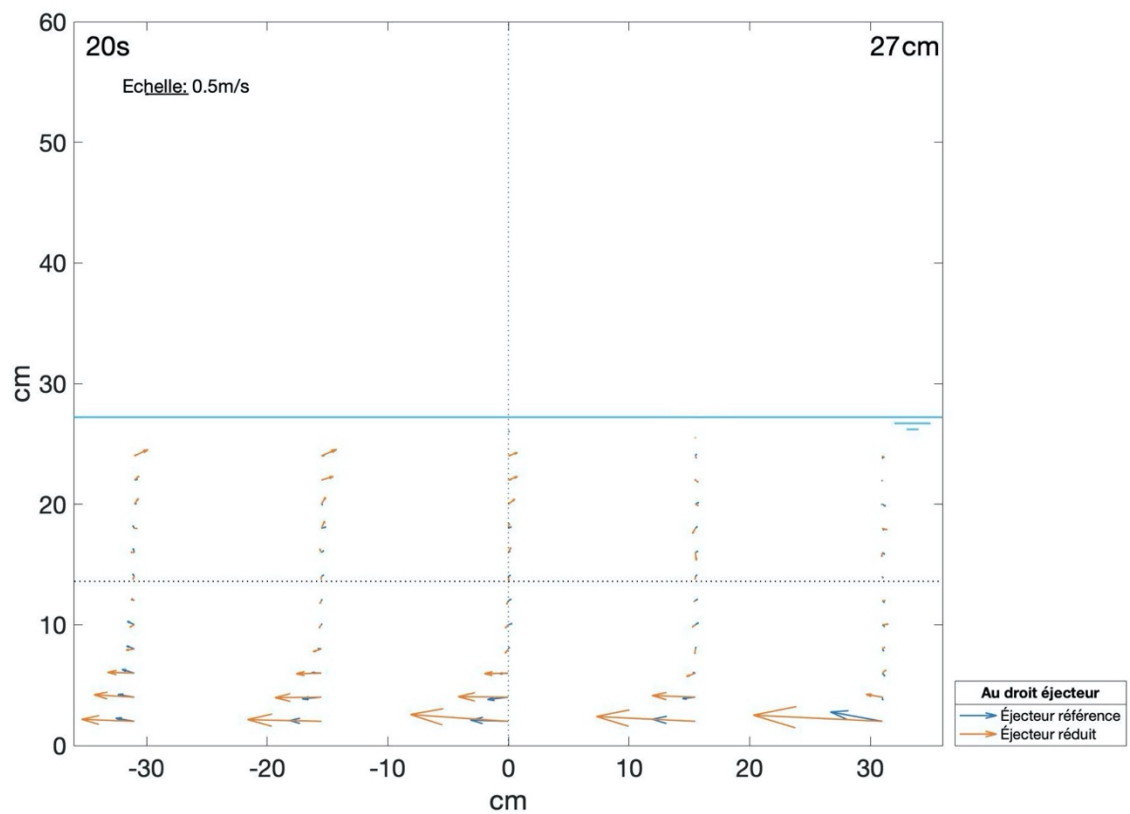


Figure 5-15 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 20s après ouverture

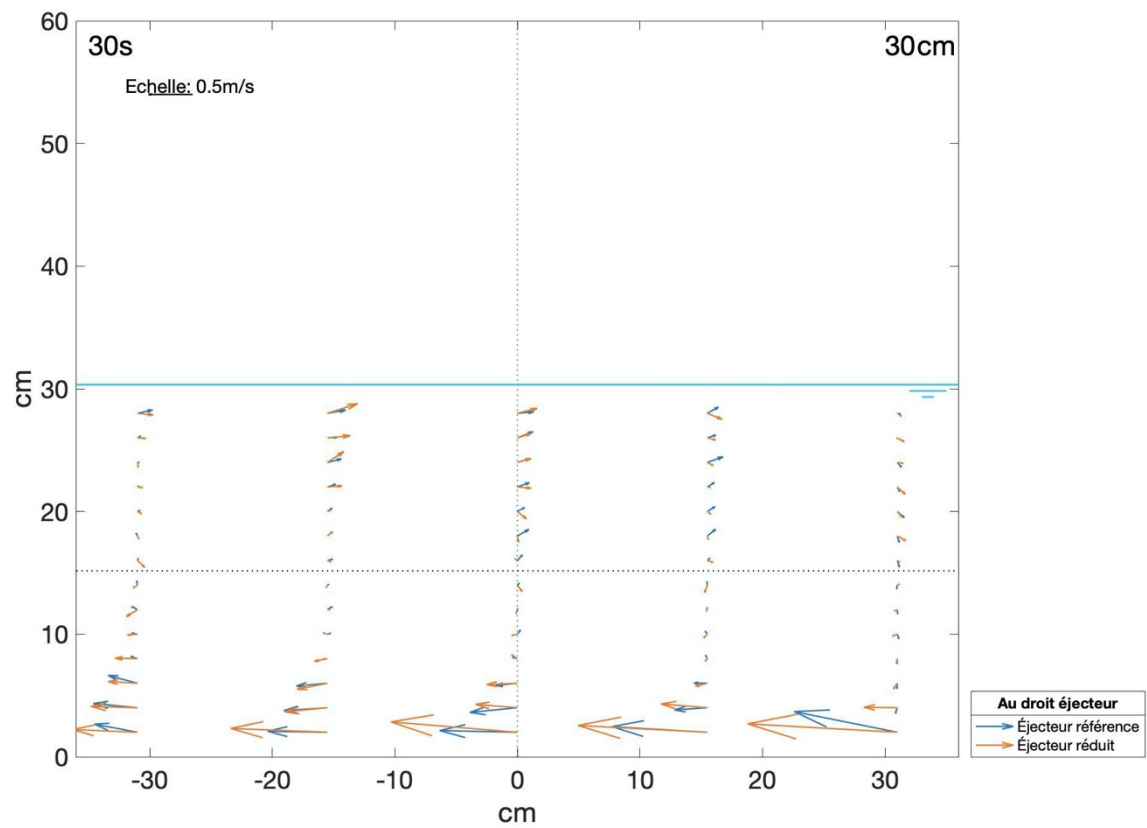


Figure 5-16 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 30s après ouverture

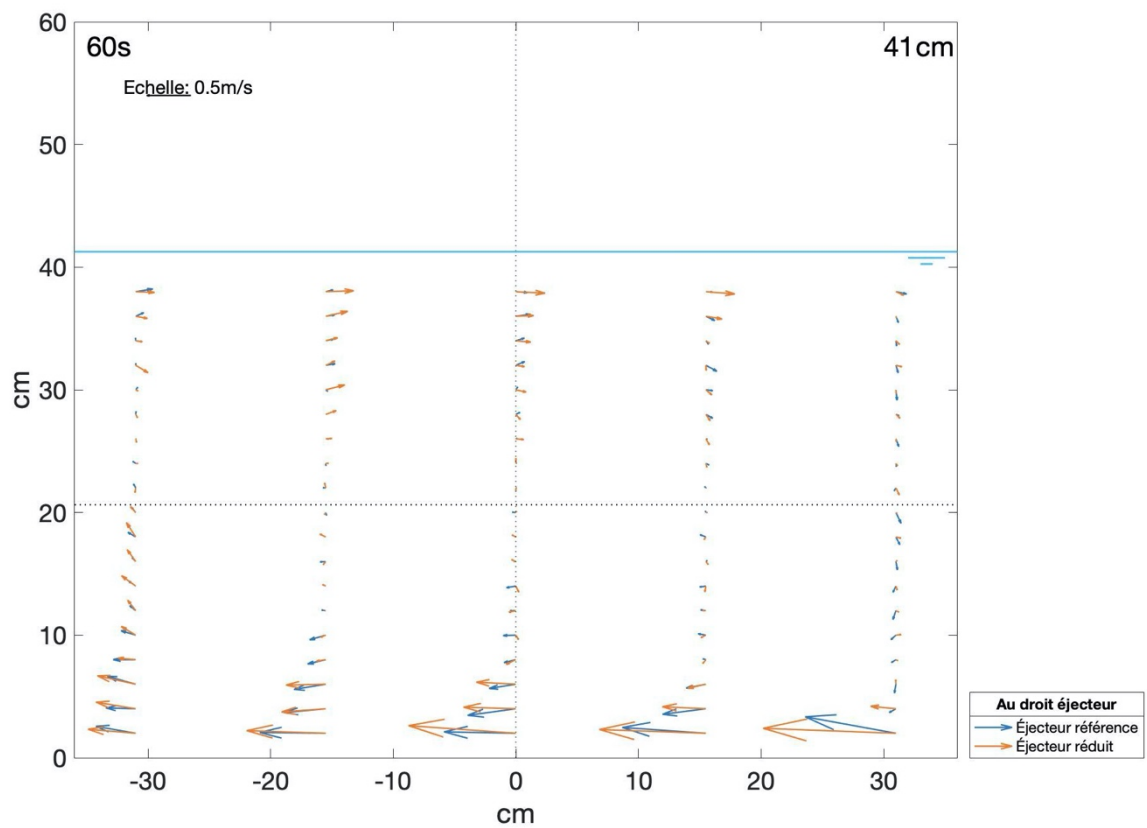


Figure 5-17 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 60s après ouverture

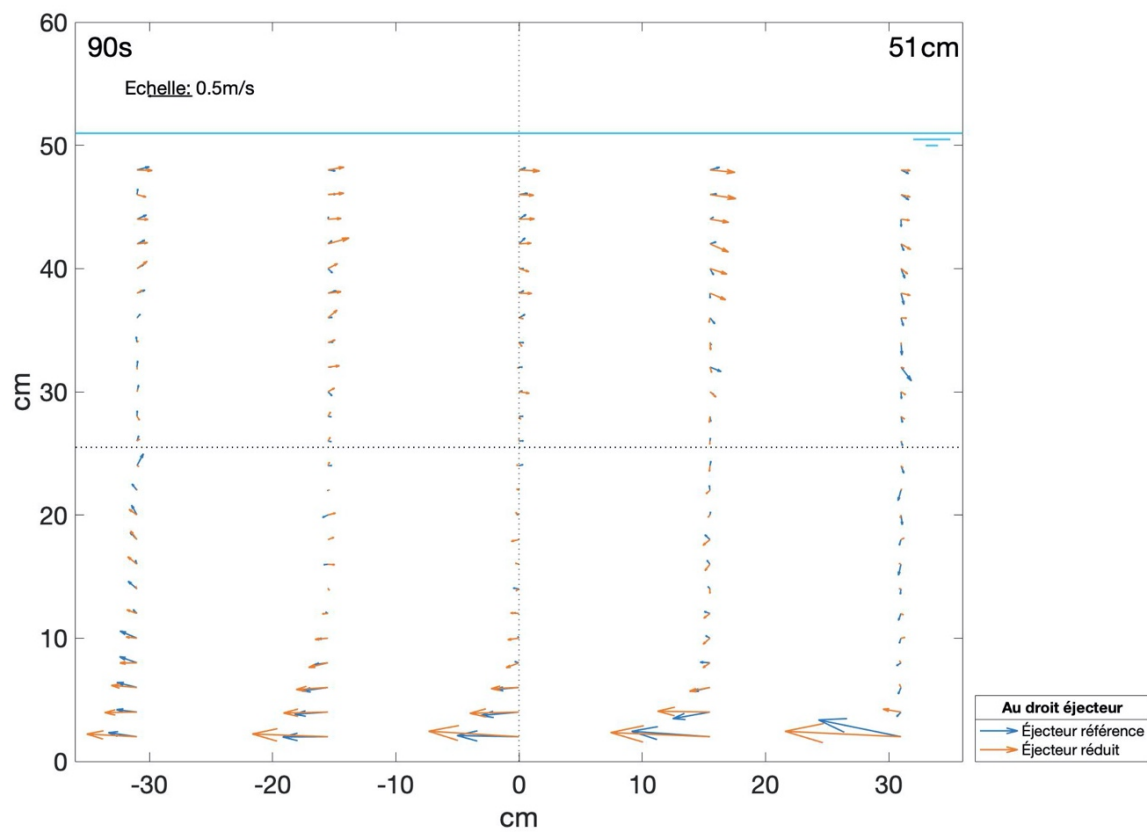


Figure 5-18 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 90s après ouverture

5.2.1.2 Champ de vitesse avec bateau

1^{ère} configuration :

Sortie : Éjecteur de référence avec bateau

Positionnement de la section transversale : Au droit de l'éjecteur

Cette configuration permet d'observer le phénomène giratoire en présence du bateau.

Sur la Figure 5-20, on observe le champ de vitesse 20 s après l'ouverture de la vanne. Le jet sortant de l'éjecteur est observable à la sortie de l'éjecteur fonctionnel et se propage sur le fond du sas jusqu'au bajoyer opposé.

On observe, à la Figure 5-21, le champ de vitesse 30 s après l'ouverture, la vanne est complètement ouverte et le débit est maximum. On observe sur la zone supérieure gauche, entre le bajoyer et le bateau, que le jet sortant remonte le long du bajoyer opposé jusqu'à la surface libre.

La Figure 5-21 permet d'observer le début du développement de l'effet giratoire, 40 s après l'ouverture. On remarque que le jet remontant le long du bajoyer se sépare en deux. Une partie poursuit le long du bajoyer tandis que l'autre se déplace en dessous du bateau. Cette deuxième partie amorce l'effet giratoire. Pour rappel, le dispositif de mesure suit le bateau dans l'élévation verticale lors du remplissage offrant des données autour des bateaux mais plus aucune donnée dans la zone du fond du sas. Cette zone de "non-information" augmente avec le remplissage.

On observe sur la Figure 5-22 et la Figure 5-23, le développement complet du phénomène giratoire. L'effet suit le fond de la carène du bateau lors du remplissage. À noter également que dans la zone supérieure gauche, entre le bajoyer et bateau, l'intensité des vecteurs de vitesse est faible, voire nulle.

Cette configuration permet de tirer une nouvelle conclusion. La création et la confirmation du phénomène giratoire lors d'un remplissage en mode dégradé en présence du bateau. Également l'évolution du phénomène avec le fond de la barge, il suit son élévation verticale.

La Figure 5-19 illustre l'évolution du phénomène giratoire au cours du temps.

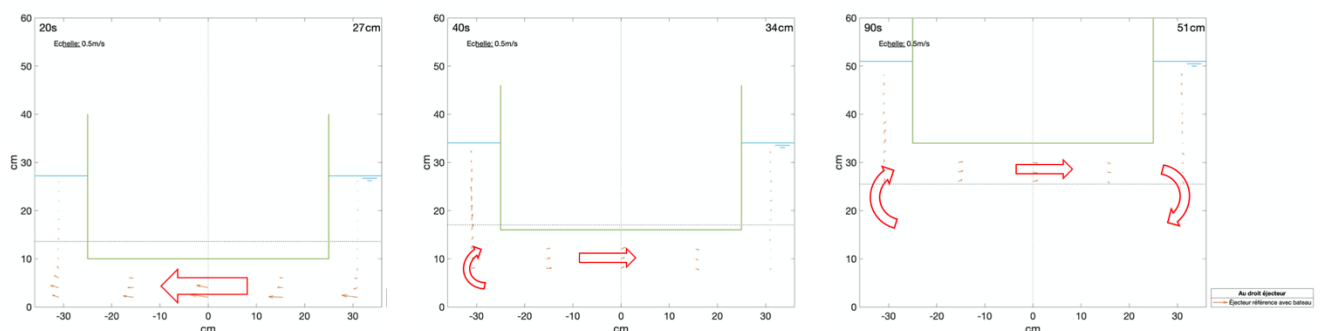


Figure 5-19 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau – Évolution

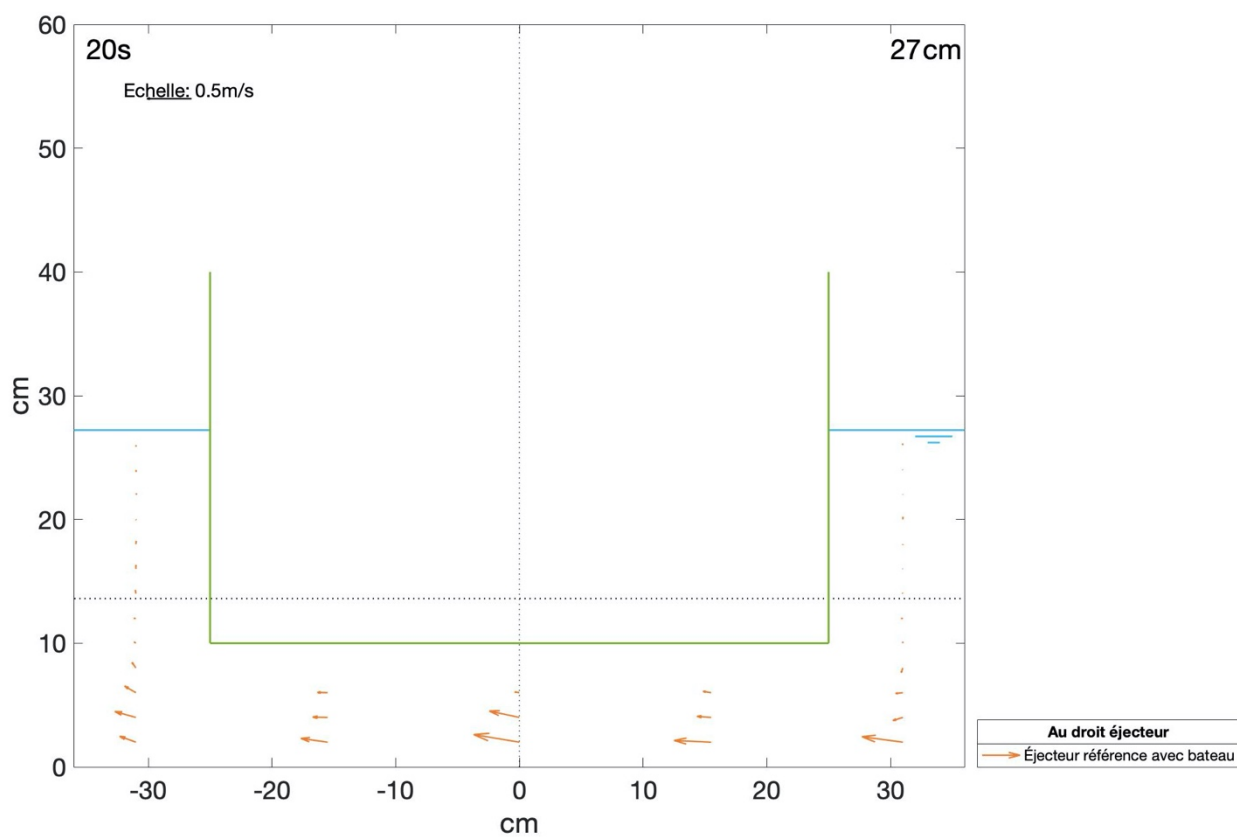


Figure 5-20 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 20 s après l'ouverture

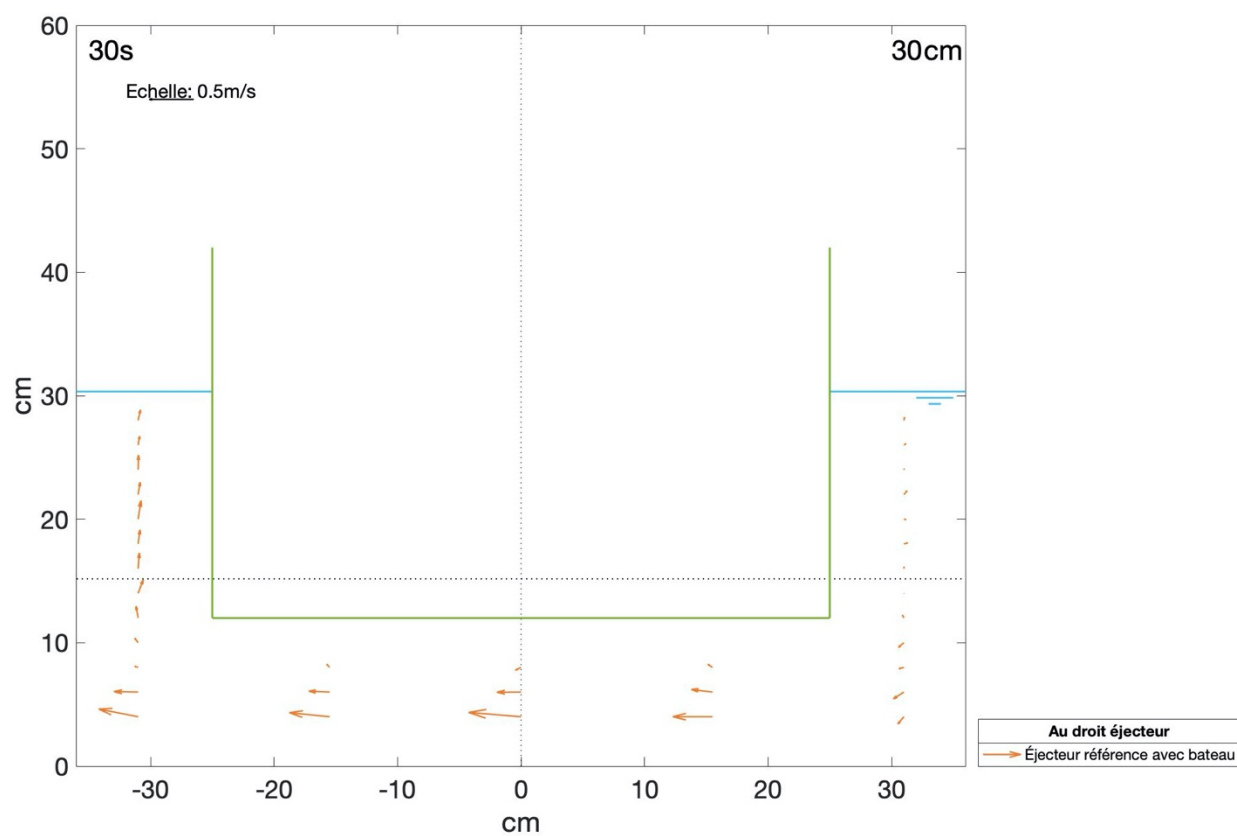


Figure 5-21 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 30 s après l'ouverture

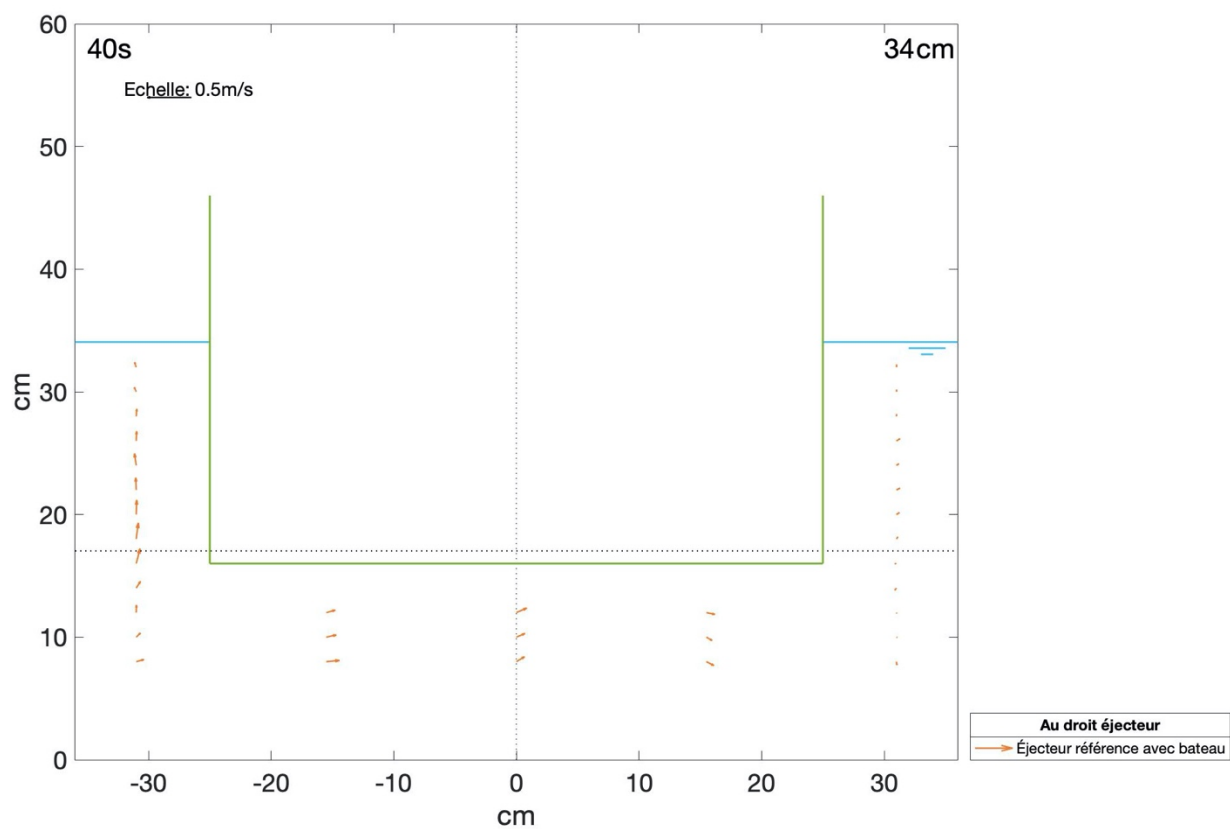


Figure 5-22 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 40 s après l'ouverture

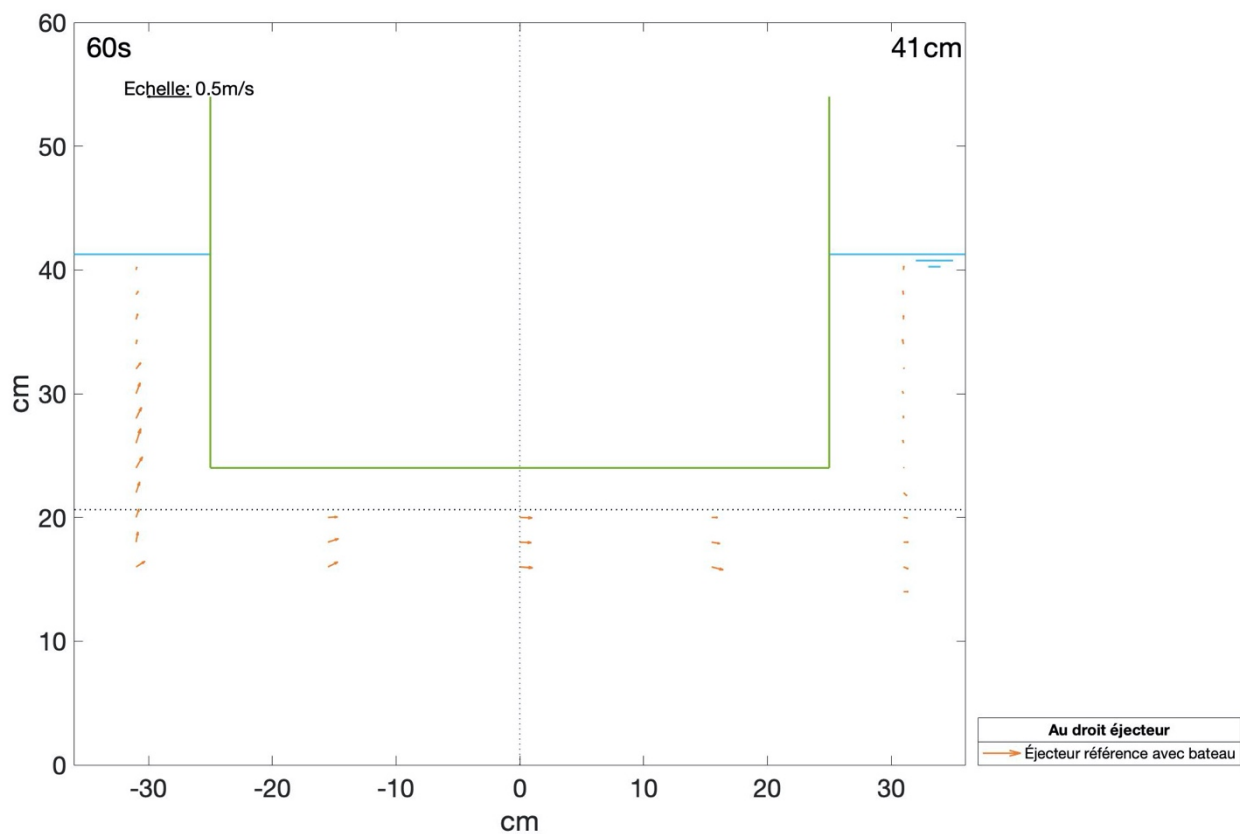


Figure 5-23 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 60 s après l'ouverture

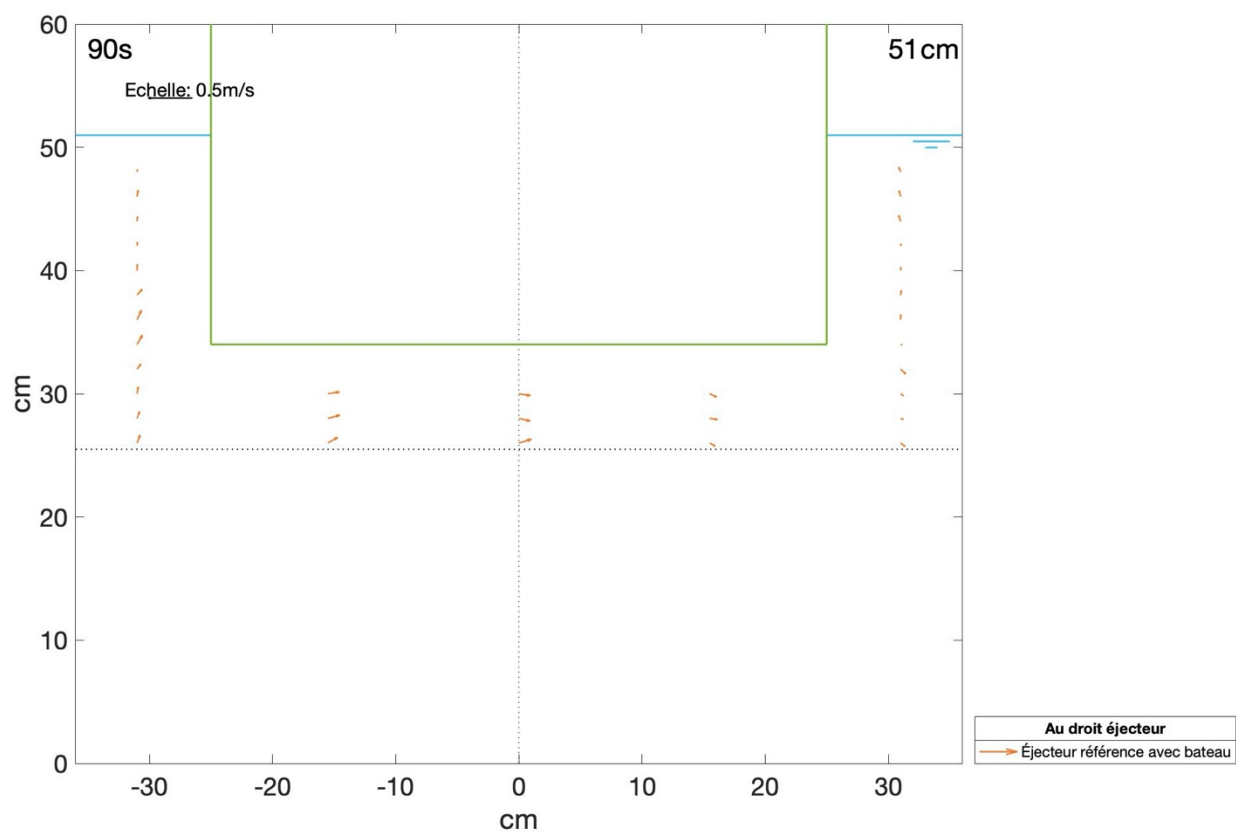


Figure 5-24 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 90 s après ouverture

2^{ème} configuration :

Sortie : Comparaison entre éjecteur de référence avec et sans bateau

Positionnement de la section transversale : Au droit de l'éjecteur

Cette configuration permet de comparer le comportement de l'eau entre le sas avec et sans bateau.

On observe, à la Figure 5-25, le champ de vitesse à 20 s après l'ouverture de la vanne. On remarque que l'intensité des vecteurs est semblable pour le fond du sas et que le jet d'eau se propage de la même manière dans les deux cas.

Sur la Figure 5-26, on observe que champ de vitesse à 30 s après l'ouverture. On relève les mêmes constations qu'à 20 s sauf pour la zone supérieure gauche, entre le bajoyer et le bateau, dans laquelle le jet remonte jusqu'à la surface avec une intensité plus marquée. Le phénomène giratoire s'est amorcé pour le cas sans bateau.

La Figure 5-27, la Figure 5-28 et la Figure 5-29 montrent le champ de vitesse à 40 s, 60 s et 90 s après l'ouverture. 10 s après le cas sans bateau, l'effet giratoire s'amorce maintenant pour le cas avec bateau. Le comportement de l'eau est semblable dans le développement et l'intensité de l'effet giratoire entre les 2 cas sauf à deux niveaux :

- La hauteur de l'effet giratoire, l'effet se produit jusqu'à la surface libre pour le cas sans bateau et jusqu'en dessous du bateau pour le cas avec bateau.
- Le cas avec bateau conserve une intensité plus marquée jusqu'à la surface libre dans la colonne de vecteur de vitesse à gauche du bateau.

Comme expliqué dans la précédente configuration, le dispositif de mesure suit le bateau lors du remplissage. Étant donné que les vecteurs de vitesse sont semblables en début de remplissage, on suppose qu'ils conservent leur similarité durant le remplissage, ce qui permet donc d'avoir une représentation complète du champ de vitesse pour le cas avec bateau.

Cette comparaison permet de tirer une conclusion. Dans les 2 cas, le phénomène giratoire se développe dans le sas jusqu'à la surface libre pour le cas sans bateau et avec le fond du bateau pour le cas avec bateau. On suppose que pour un bateau de largeur réduite amarré du côté fonctionnel, l'effet giratoire va "plaquer" le bateau contre le bajoyer. L'effet va se produire entre le bajoyer opposé et le bateau.

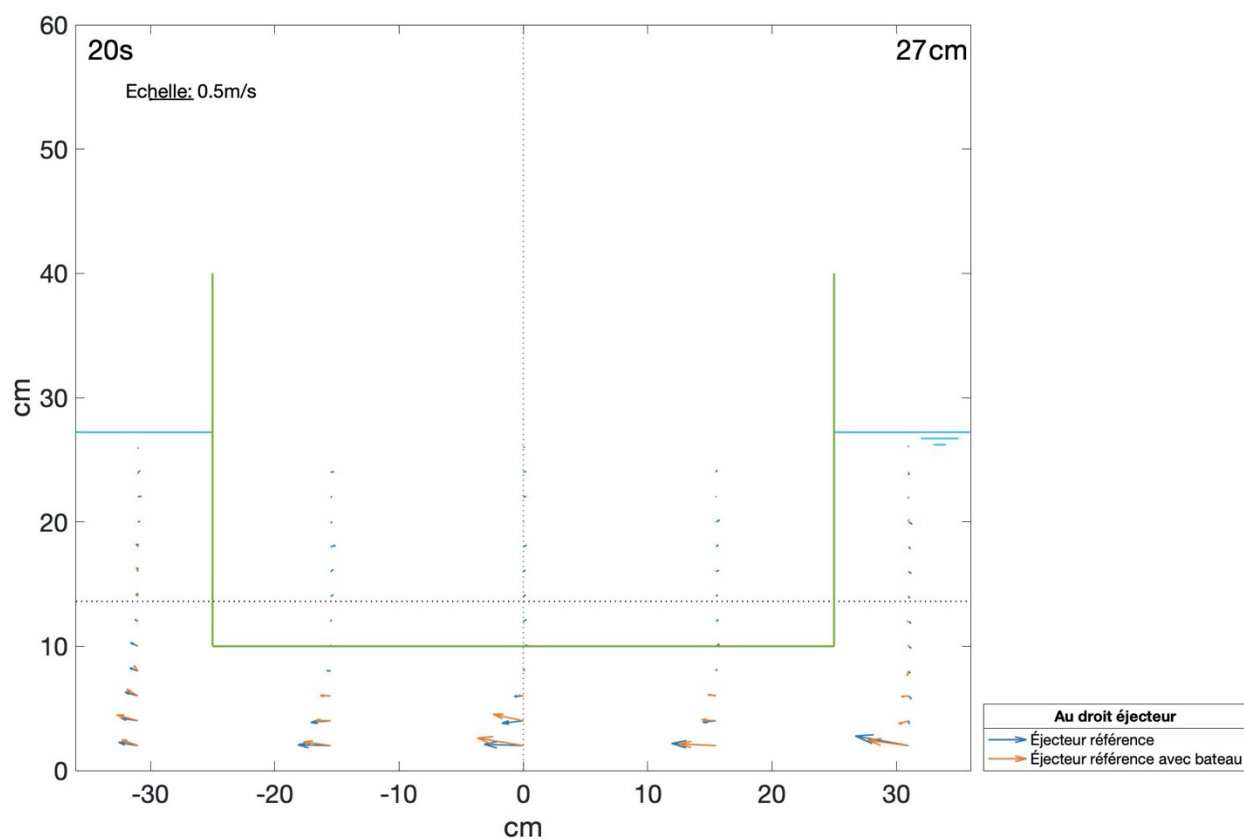


Figure 5-25 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 20 s après l'ouverture

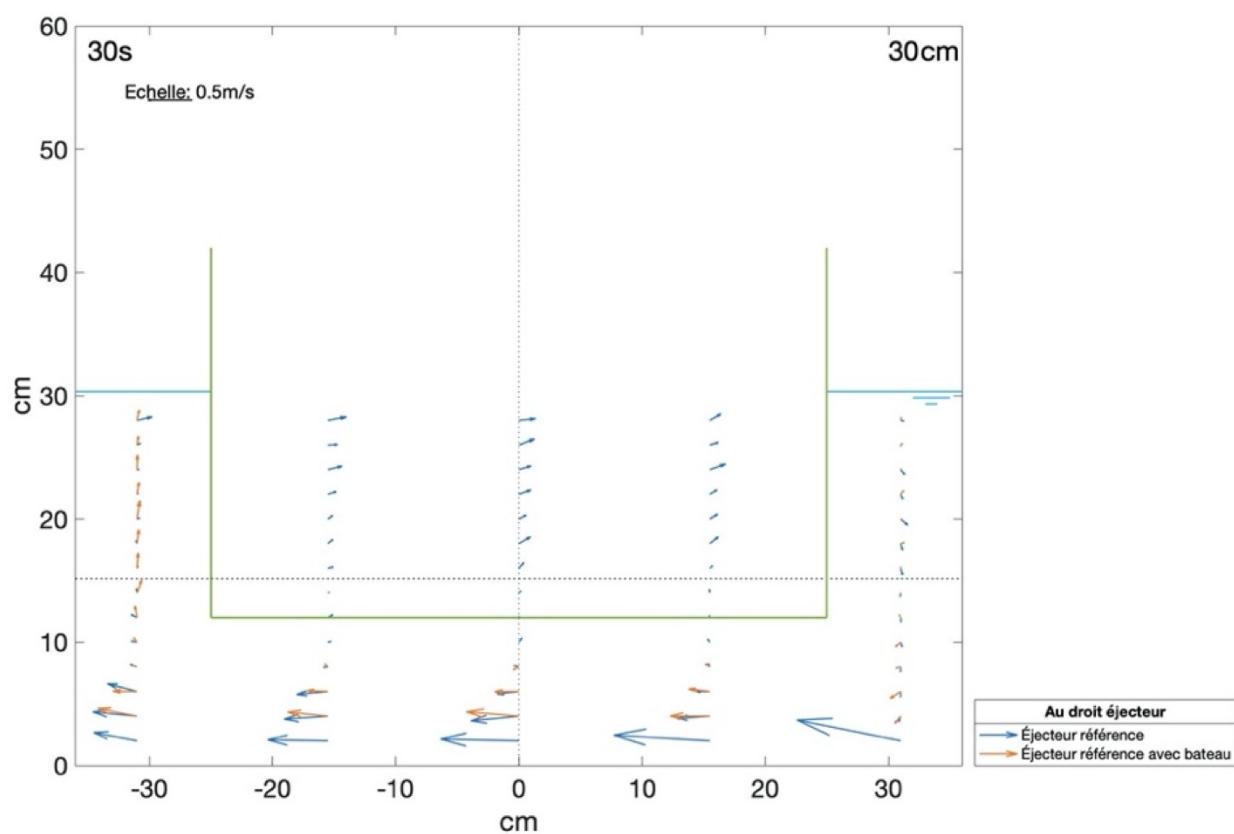


Figure 5-26 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 30 s après l'ouverture

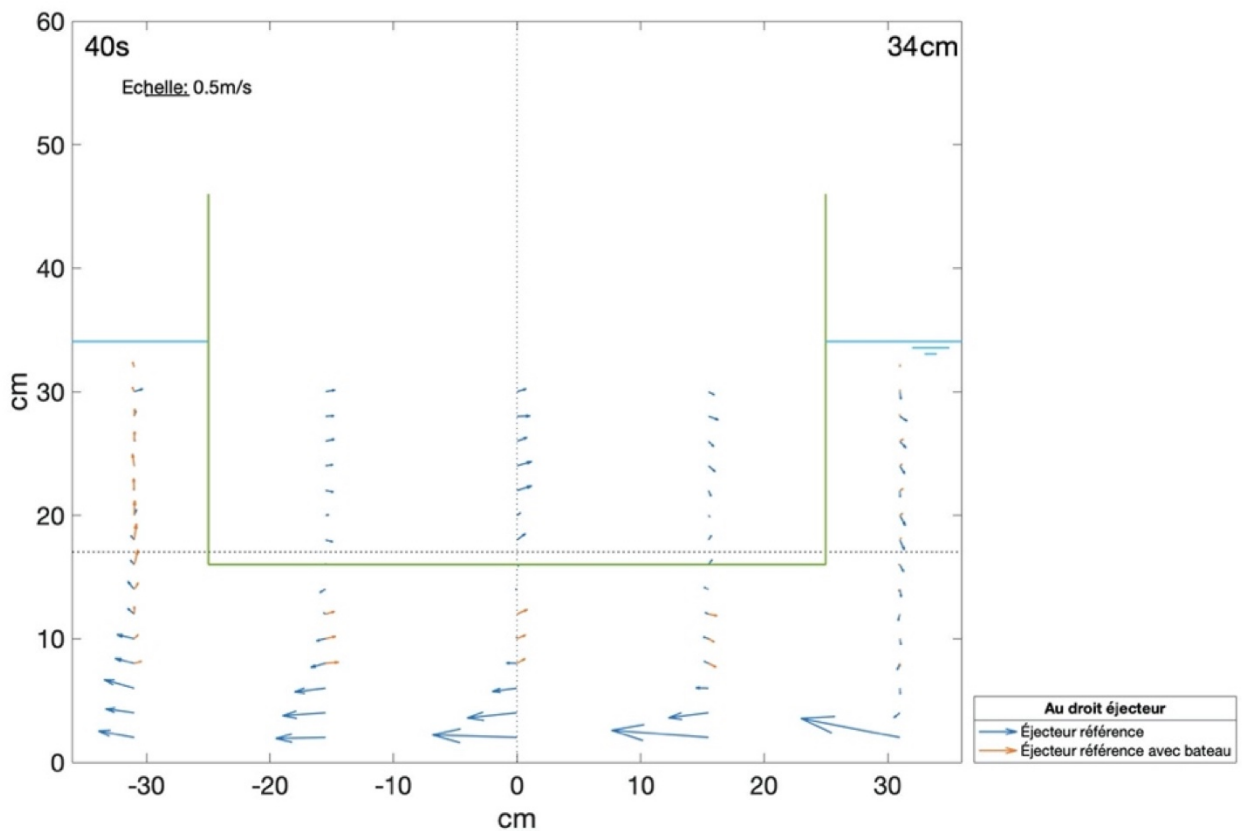


Figure 5-27 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 40 s après l'ouverture

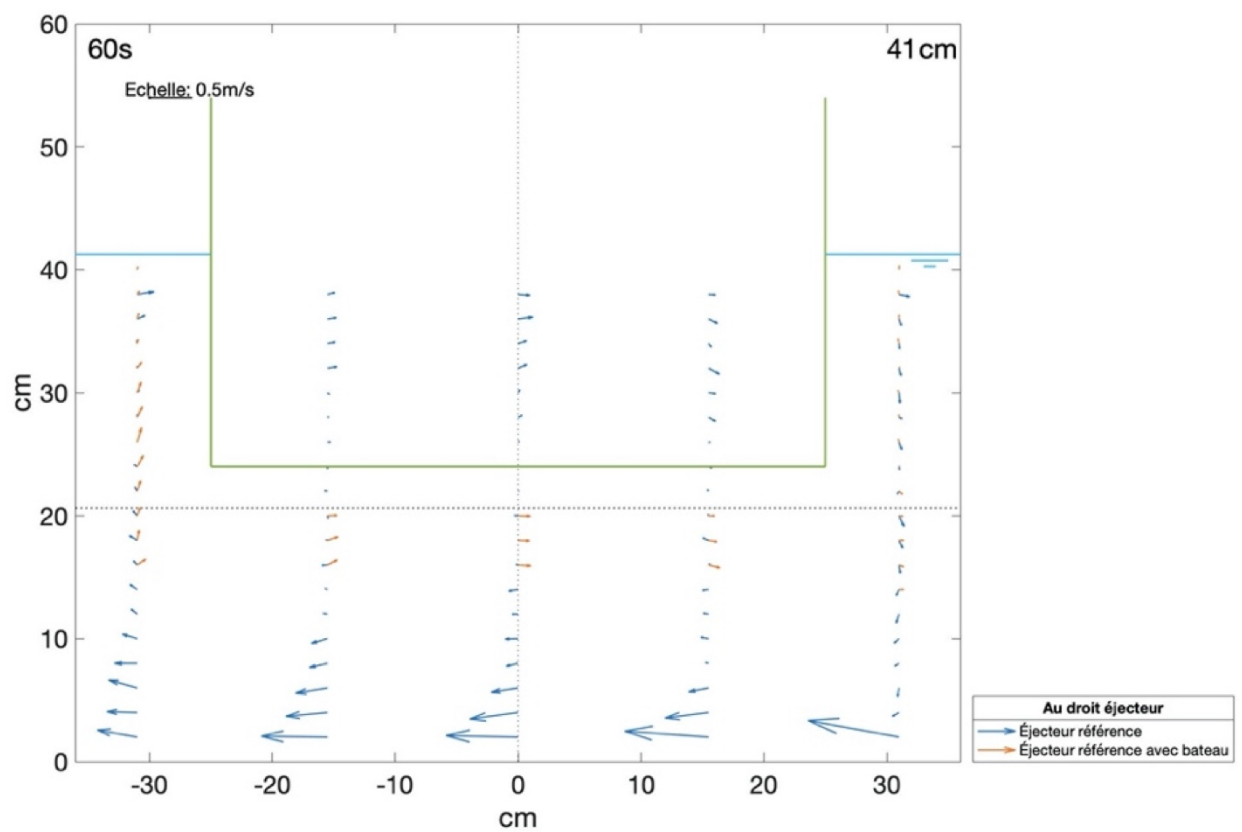


Figure 5-28 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 60 s après l'ouverture

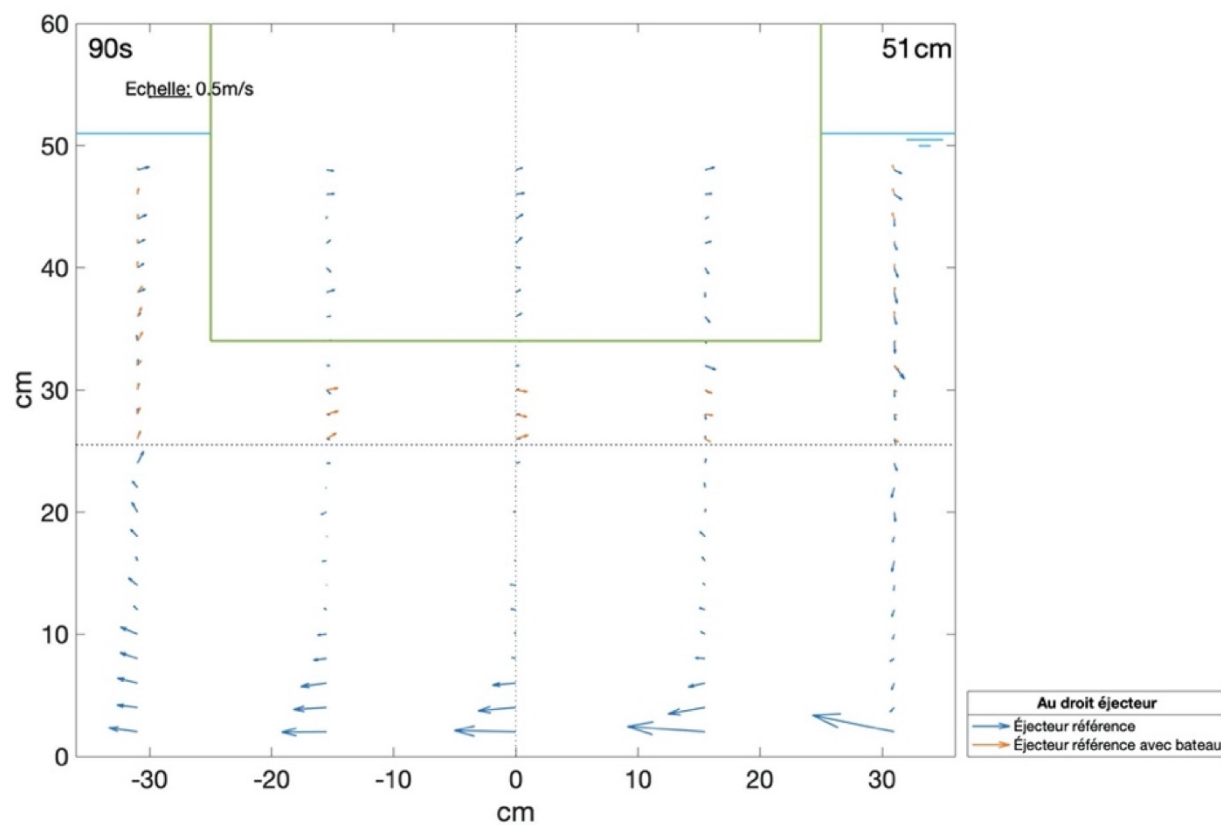


Figure 5-29 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 90 s après l'ouverture

3^{ème} configuration :

Sortie : Comparaison entre éjecteur de référence et éjecteur réduit avec bateau
Positionnement de la section transversale : Au droit de l'éjecteur

Cette configuration permet de comparer l'intensité du champ de vitesse pour les deux tailles d'éjecteurs différentes. Comme introduit à la section 5.1.5, le facteur d'homothétie permet d'effectuer cette comparaison pour un remplissage à niveau égal.

Sur la Figure 5-30 et la Figure 5-31, on observe le champ de vitesse respectivement à 20 s et 30 s après l'ouverture de la vanne. On remarque que l'intensité des vecteurs pour l'éjecteur réduit est plus importante que pour ceux de l'éjecteur de référence. On observe également que le comportement de l'eau est totalement identique dans le développement et la création du phénomène giratoire. Le jet d'eau se propage le long du radier et remonte le long du bajoyer opposé.

Sur la Figure 5-32, on observe le champ de vitesse à 40 s après l'ouverture. L'intensité est toujours plus importante pour l'éjecteur réduit. On observe la création de l'effet giratoire avec la rotation du champ de vitesse sur le bajoyer opposé.

On observe également à la Figure 5-33 et à la Figure 5-34, le champ de vitesse respectivement à 60 s et 90 s après l'ouverture. Entre les deux éjecteurs, le comportement de l'eau reste identique et l'effet suit le fond du bateau. L'intensité est toujours plus importante pour l'éjecteur réduit.

Cette comparaison permet tirer une conclusion. Comme pour la comparaison des éjecteurs dans un sas sans bateau, la taille des éjecteurs n'influence pas le comportement global de l'eau mais seulement l'intensité et la durée du phénomène giratoire.

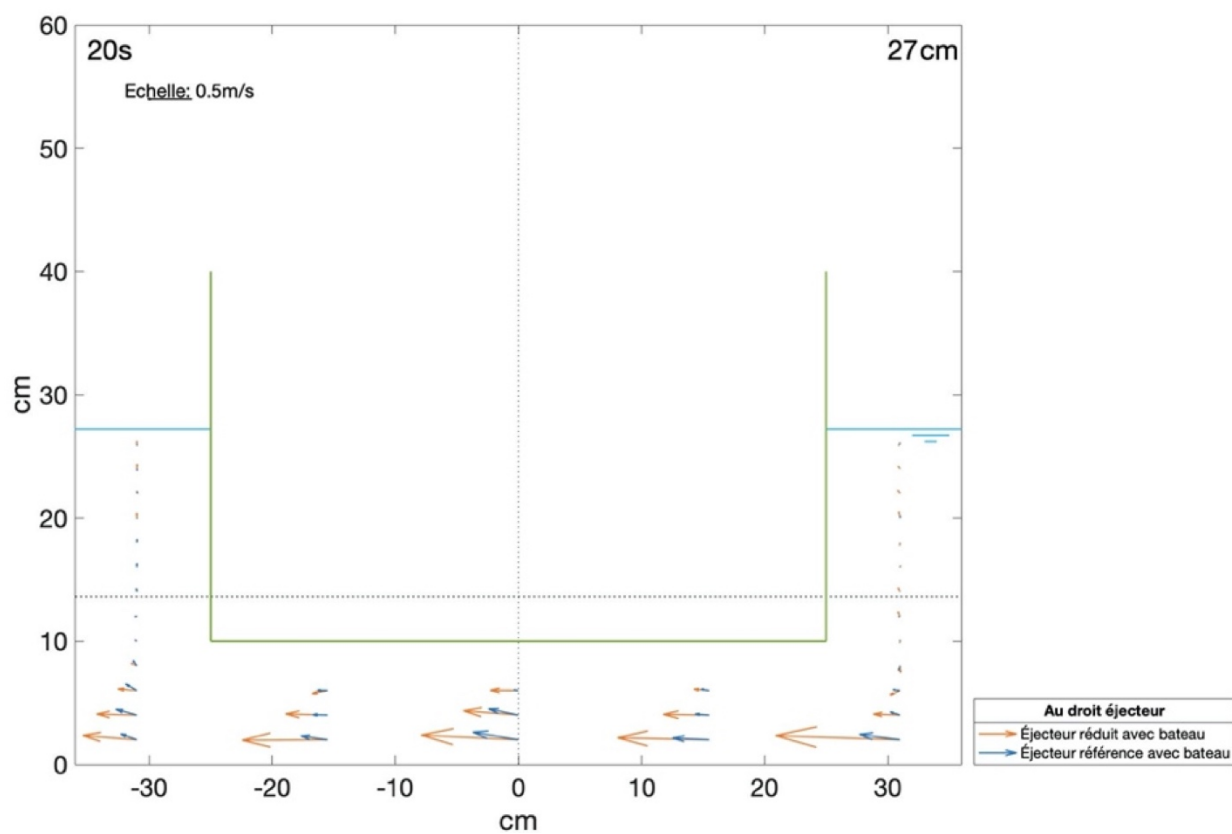


Figure 5-30 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau - 20 s après l'ouverture

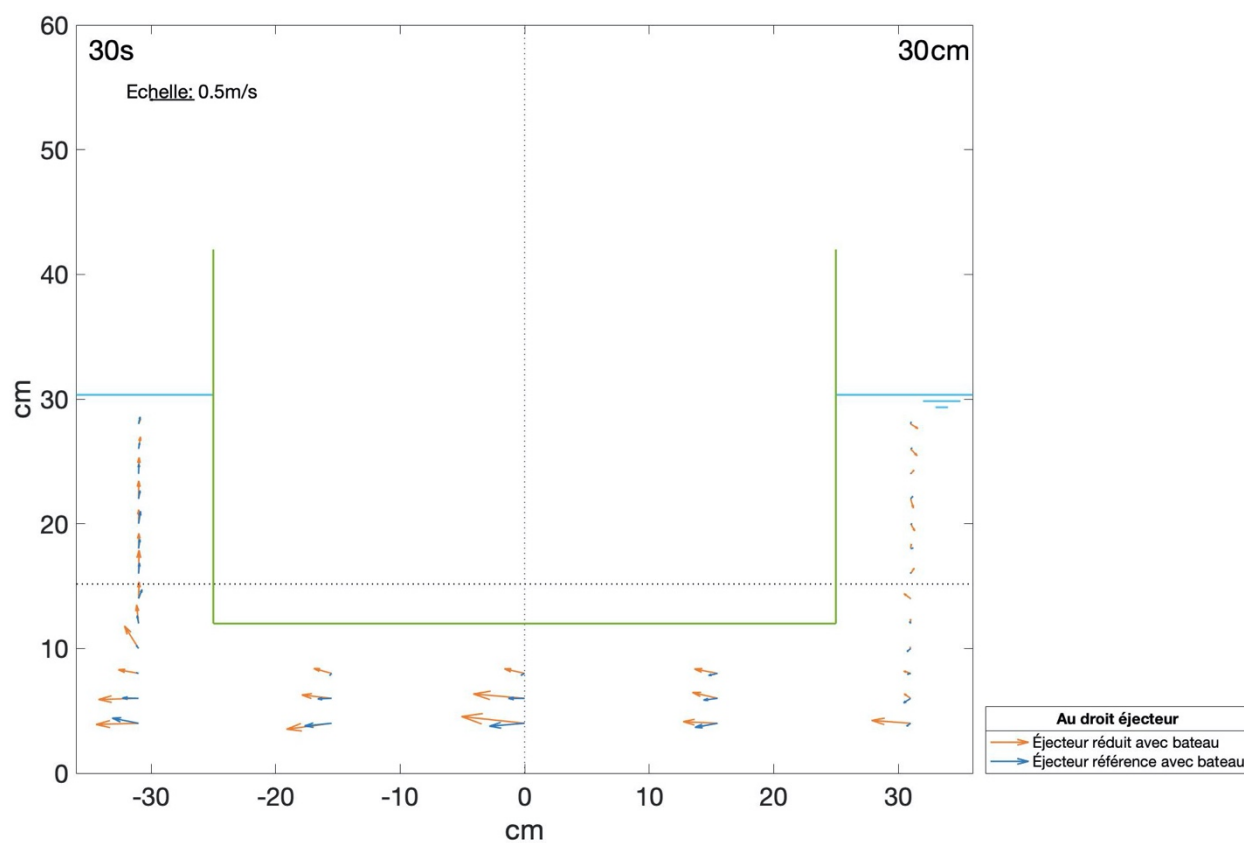


Figure 5-31 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau – 30 s après l'ouverture

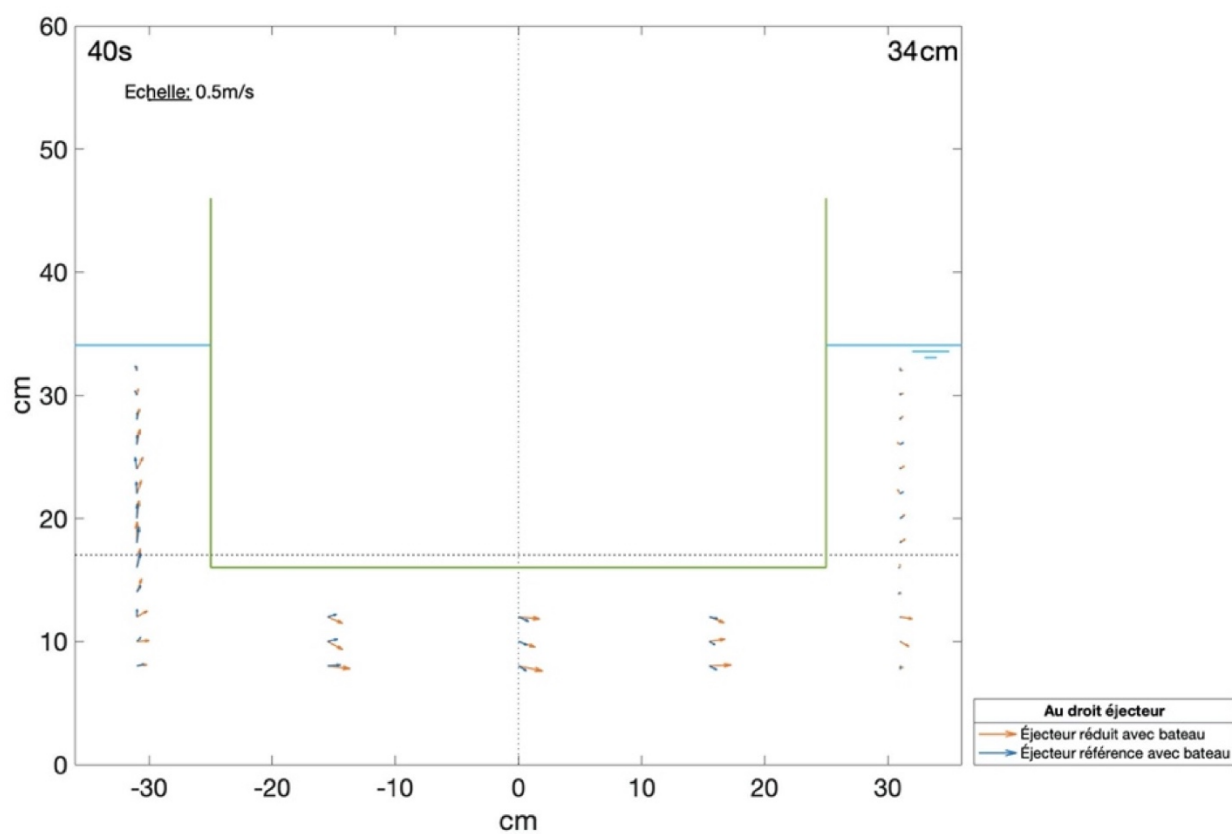


Figure 5-32 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau - 40 s après l'ouverture

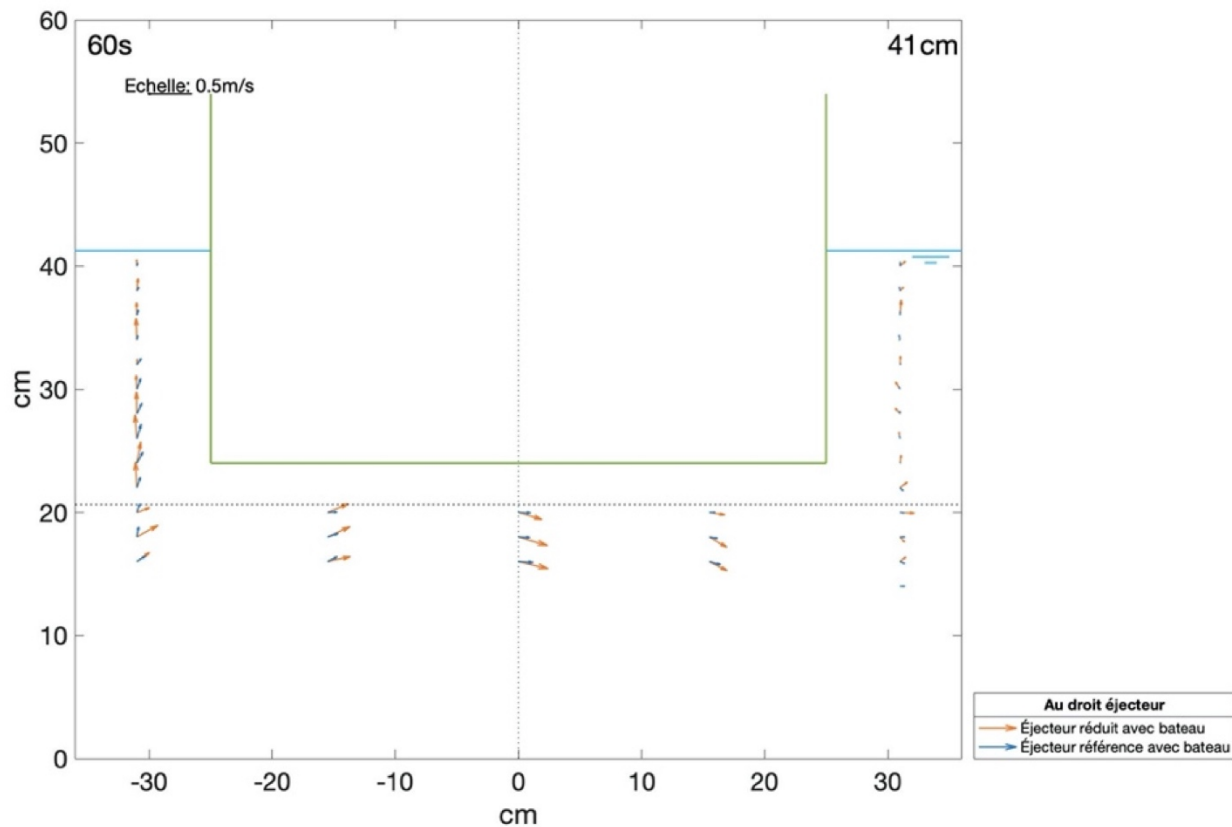


Figure 5-33 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau - 60 s après l'ouverture

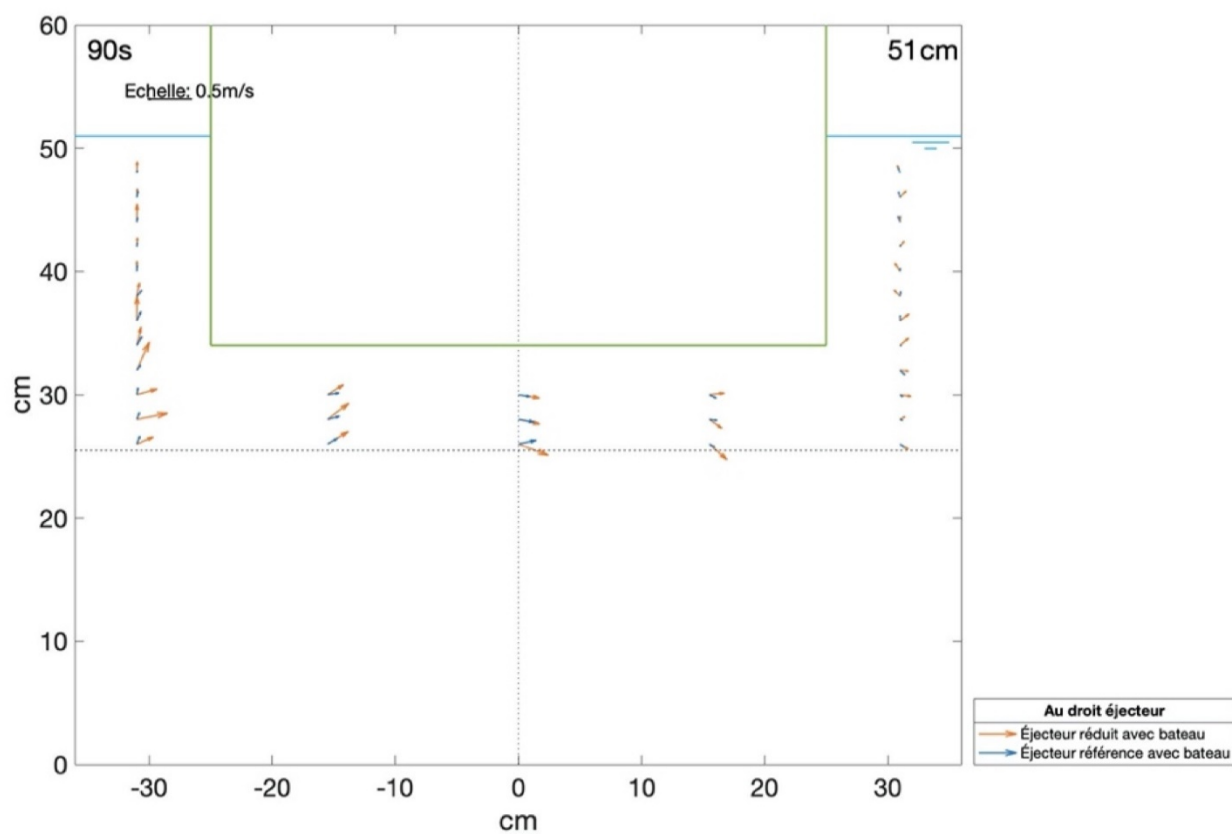


Figure 5-34 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau - 90 s après l'ouverture

5.2.2 Intégration des vitesses

Afin de quantifier l'effet d'entraînement de la masse d'eau en rotation dans le sas lors d'un remplissage en mode dégradé, El Oumari et Lenaerts ont introduit une démarche : intégrer les champs de vitesse pour obtenir le débit passant au travers d'une section donnée. La campagne de mesure réalisée lors de ce travail a permis de passer d'une hauteur de prise de mesure de 24 cm (réalisé par El Oumari et Lenaerts) à 50 cm et ainsi compléter l'analyse principalement sur le débit Q_3 .

Les débits calculés sont (Figure 5-35) :

$$\begin{aligned} Q_1 &= \int_0^Z v_x(z) \cdot L \cdot dz & [m^3/s] \\ Q_2 &= \int_0^{B/2} v_y(b) \cdot L \cdot db & [m^3/s] \\ Q_3 &= \int_Z^H v_x(z) \cdot L \cdot dz & [m^3/s] \\ Q_4 &= \int_0^{B/2} v_y(b) \cdot L \cdot db & [m^3/s] \end{aligned}$$

Où

$v_x(z)$: la vitesse transversale de l'eau

$v_y(z)$: la vitesse verticale de l'eau

L : la largeur d'intégration = la distance entre éjecteurs ($L = 36 \text{ cm}$)

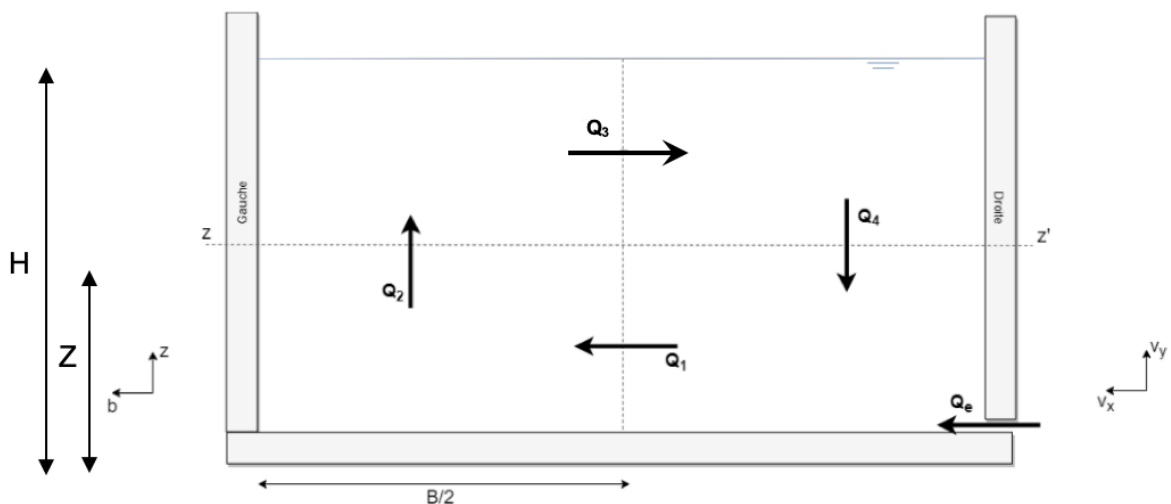


Figure 5-35 : Débits Q_1 à Q_4 calculés au travers des sections correspondantes (El Oumari et Lenaerts, 2019)

Contrairement à El Oumari et Lenaerts, aucune mesure n'a été réalisée entre les éjecteurs. L'intégration et l'analyse vont se consacrer uniquement sur les mesures prises au droit des éjecteurs.

La démarche, pour déterminer les débits, se compose de trois points :

1) Déterminer les largeurs au droit de l'éjecteur L_d

El Oumari et Lenaerts ont posé l'hypothèse d'un angle de diffusion de 10° (Figure 5-36). Leur hypothèse se base sur l'article de W. Hager sur les écoulements divergents à surface libre.

$$L_d = 2 \cdot \frac{B}{2} \cdot \tan(10^\circ)$$

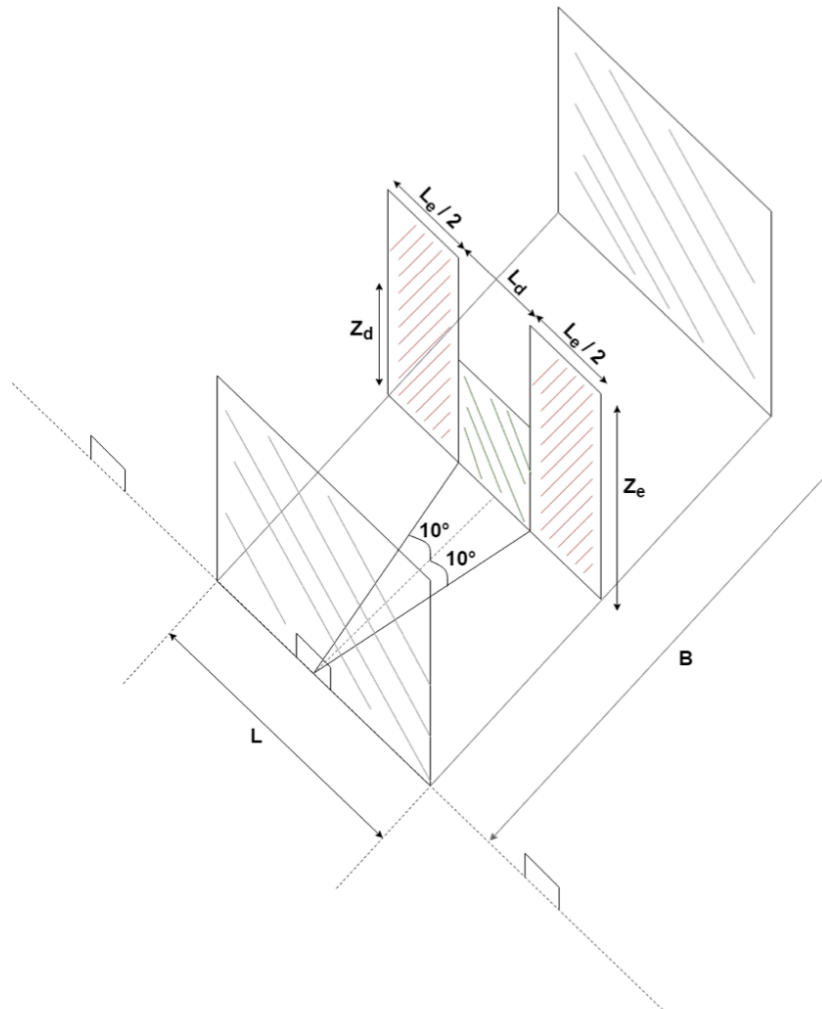


Figure 5-36 : Section d'intégration relative au débit Q1 (El Oumari et Lenaerts, 2019)

2) Déterminer les centres de gire au droit de l'éjecteur Z_d .

Comme décrit par El Oumari et Lenaerts, on observe également que les centres de gire sont situés approximativement à $Z_d = 0,25 \cdot h$ sur Figure 5-37 (données issues de ce travail). On remarque que ces hauteurs sont indépendantes de la taille des éjecteurs.

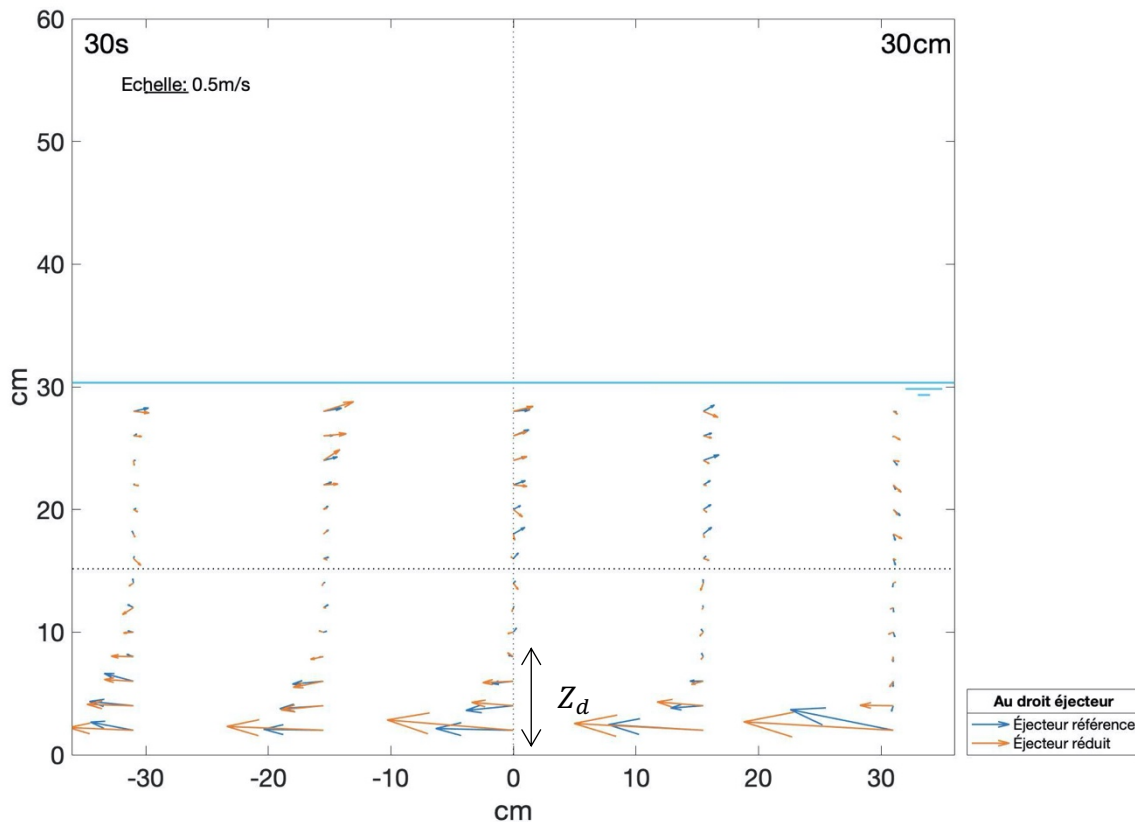


Figure 5-37 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 30s après ouverture

La Figure 5-38 et la Figure 5-39 illustrent le profil de vitesses transversales v_x en fonction de la hauteur z pour différents temps de remplissage (traits continus) pour un axe vertical situé à mi-distance des deux bajoyers. Les points losanges représentent l'hypothèse $Z_d = 0,25 \cdot h$, le quart d'hauteur d'eau et les points ronds, la hauteur d'eau h pour différents temps de remplissage. Ces figures confirment l'hypothèse, les centres de gire au droit des éjecteurs sont situés approximativement à $Z_d = 0,25 \cdot h$. Les vitesses prises en compte pour le cas de l'éjecteur réduit sont les vitesses adaptées (multipliées par le facteur d'homothétie $f = 1,5$) pour correspondre à un hydrogramme de remplissage similaire à celui du cas pour l'éjecteur de référence.

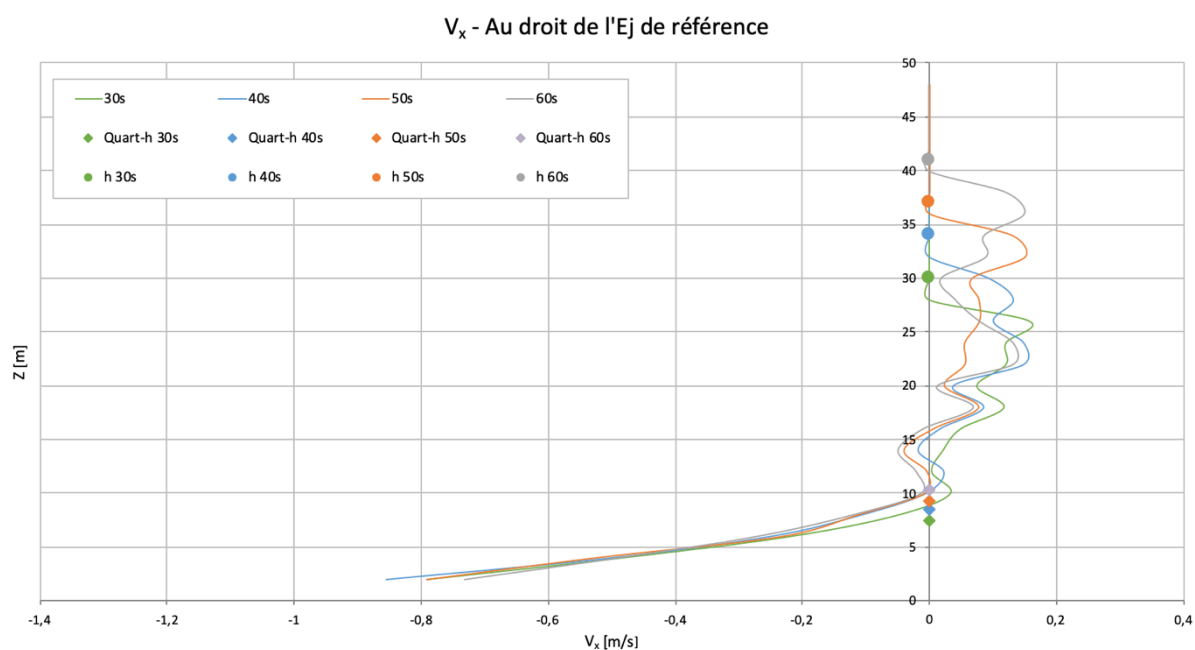


Figure 5-38 : Profil de vitesses transversales - Au droit de l'éjecteur de référence

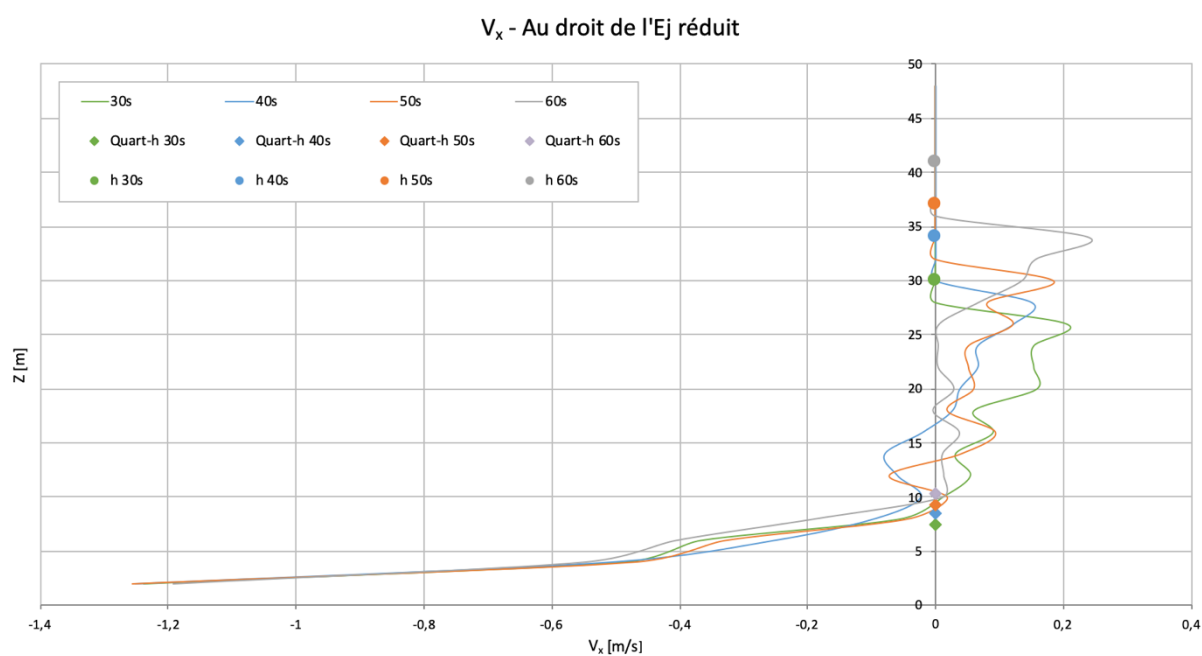


Figure 5-39 : Profil de vitesses transversales - Au droit de l'éjecteur réduit

3) Réaliser les intégrations :

$$Q_1 = \int_0^{Z_d} v_{d,x}(z) \cdot L_d \cdot dz \quad [m^3/s]$$

$$Q_2 = \int_0^{B/2} v_{d,y}(b) \cdot L_d \cdot db \quad [m^3/s]$$

$$Q_3 = \int_{Z_d}^H v_{d,x}(z) \cdot L_d \cdot dz \quad [m^3/s]$$

$$Q_4 = \int_0^{B/2} v_{d,y}(b) \cdot L_d \cdot db \quad [m^3/s]$$

On observe, sur la Figure 5-40 et Figure 5-41, les débits Q_1 , Q_2 , Q_3 et Q_4 obtenus par intégration des vitesses. On remarque que l'intensité des débits correspond avec les représentations des champs de vitesse. L'évolution du débit montre que sur la section 1, le débit augmente fortement. Il diminue dans la section 2 et diminue encore légèrement dans la section 3 et 4 mais reste stable dans ces 3 dernières sections. Les résultats obtenus correspondent aux résultats de El Oumari et Leanearts et confirment l'effet d'entraînement de la masse d'eau. Les vitesses prises en compte pour le cas de l'éjecteur réduit sont les vitesses adaptées (multipliées par le facteur d'homothétie $f = 1,5$) pour correspondre à un hydrogramme de remplissage similaire à celui du cas pour l'éjecteur de référence. La taille des éjecteurs n'influence pas le comportement global de l'eau mais seulement l'intensité des débits.

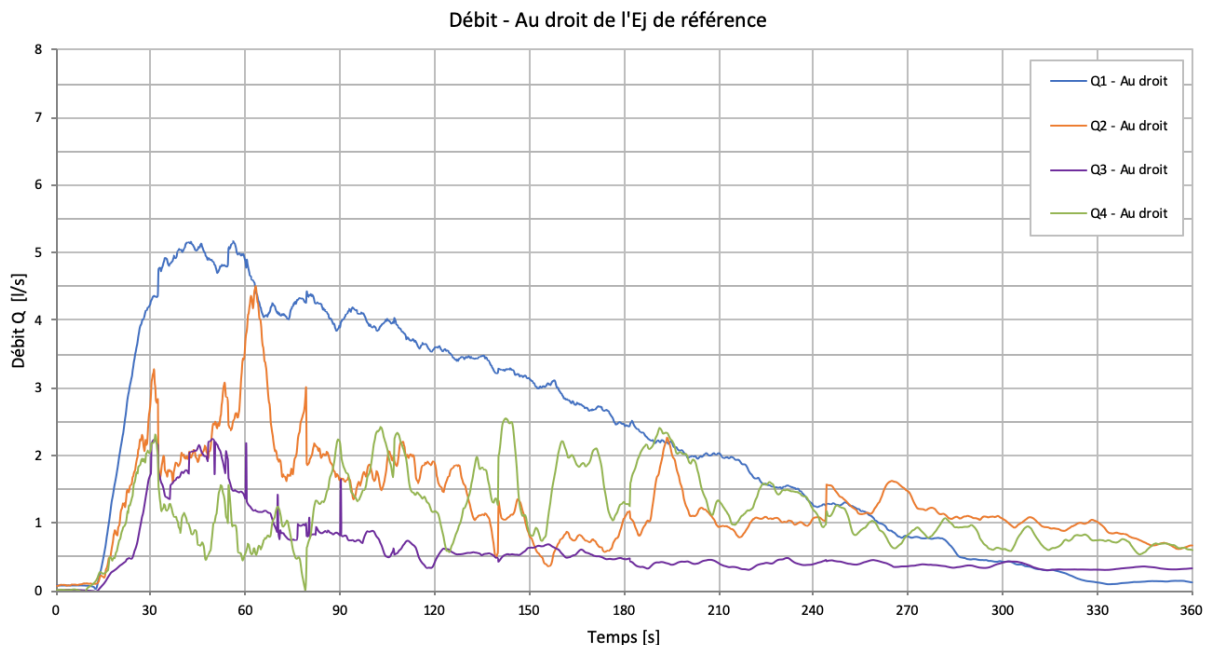


Figure 5-40 : Débit calculé par intégration des vitesses - Au droit de l'éjecteur de référence

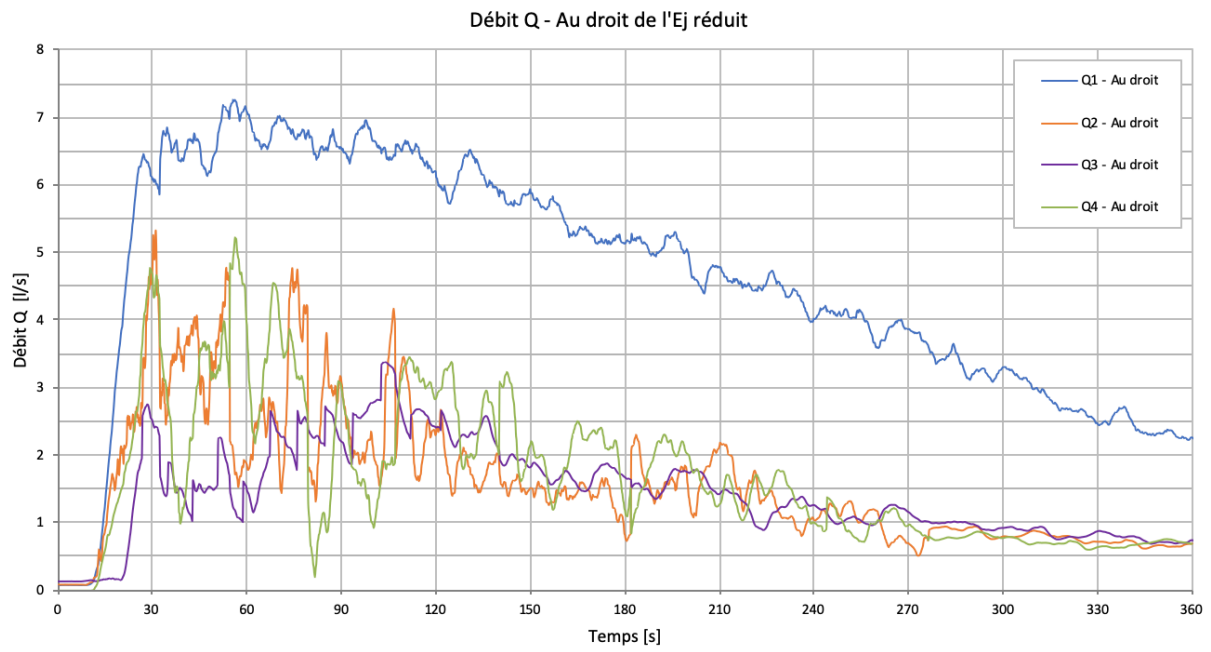


Figure 5-41 : Débit calculé par intégration des vitesses - Au droit de l'éjecteur réduit

5.2.3 Pente de roulis

Comme introduit à la section 4, grâce aux capteurs à corde reliés au bateau, nous déterminons les pentes de roulis. Pour rappel, la pente de roulis est calculée avec $S_v = \frac{\Delta r}{l_c} \cdot 1000 \text{ [‰]}$; où $\Delta r \text{ [m]}$ est la différence de niveau de la barge $\Delta r \text{ [m]}$, obtenue avec les mesures de la distance verticale par les capteurs à corde et $l_c \text{ [m]}$ la distance horizontale entre les deux capteurs. Lors de leur TFE, El Ouamari et Lenaerts avaient réalisé une analyse de la pente de roulis mais ils avaient émis des doutes sur la validité de leurs données. Il a été décidé de réaliser de nouvelles mesures afin de confirmer et d'approfondir l'évolution des pentes de roulis. L'étude porte sur les pentes de roulis du bateau pour les deux éjecteurs disponibles : l'éjecteur de référence (8cm x 1cm) et l'éjecteur réduit (4cm x 1cm). Elle présente également la pente d'eau transversale dans le sas en présence du bateau afin de permettre une comparaison avec les pentes de roulis. La loi utilisée est toujours la loi d'ouverture de vanne linéaire en 30s.

Éjecteur de référence

On observe, sur la Figure 5-42, les pentes de roulis amont et aval lors d'un remplissage en mode dégradé avec les éjecteurs de référence. On remarque que le roulis aval commence légèrement après le roulis amont. En effet, dans un système d'alimentation par aqueducs larrons il y a un décalage entre le premier et le dernier éjecteur. Les résultats pour les deux roulis sont semblables. Cependant, le bateau étant rigide, le décalage entre le premier et le dernier éjecteur ne devrait pas avoir d'influence sur le roulis. Le roulis devrait commencer au même moment. Cette différence peut s'expliquer par des problèmes de non linéarité des capteurs.

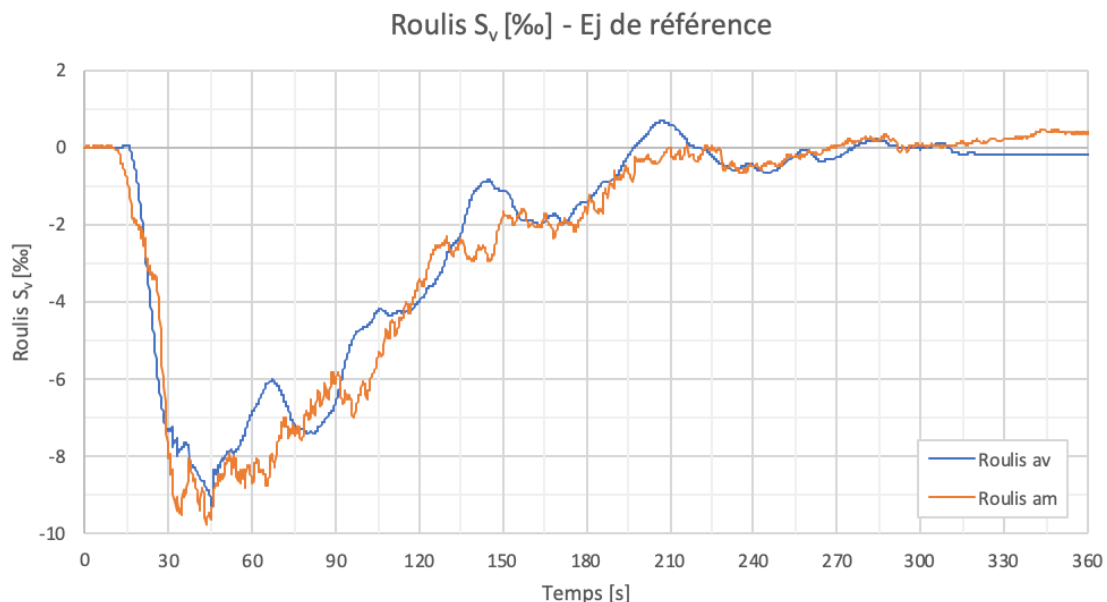


Figure 5-42 : Pente de roulis amont et aval - Éjecteur de référence

Pour la suite de l'analyse, nous analysons la moyenne des pentes de roulis amont et aval visible sur la Figure 5-43. On observe principalement trois choses :

- La valeur de roulis maximum, en valeur absolue, est de 9,5 ‰. Elle est atteinte environ 45 s après l'ouverture, soit 15 s après l'ouverture totale de la vanne. On suppose que ce délai est dû au délai entre la mise en mouvement de l'eau (l'inertie de l'eau) et son impact sur le bateau.

- Il faut environ 15 s avant le début du roulis du bateau dû à l'inertie de l'eau lors d'un remplissage. L'augmentation est forte lors des 30 premières secondes, soit jusqu'à l'ouverture complète de la vanne. Ensuite, le roulis diminue progressivement jusqu'à retrouver son équilibre vers 210 s, soit avant la fin du sasement vers 330 s.
- Le roulis est négatif (le niveau droit est supérieur au niveau gauche). Un comparatif détaillé et illustré entre la pente de roulis et la pente d'eau est présenté dans la suite de cette section.

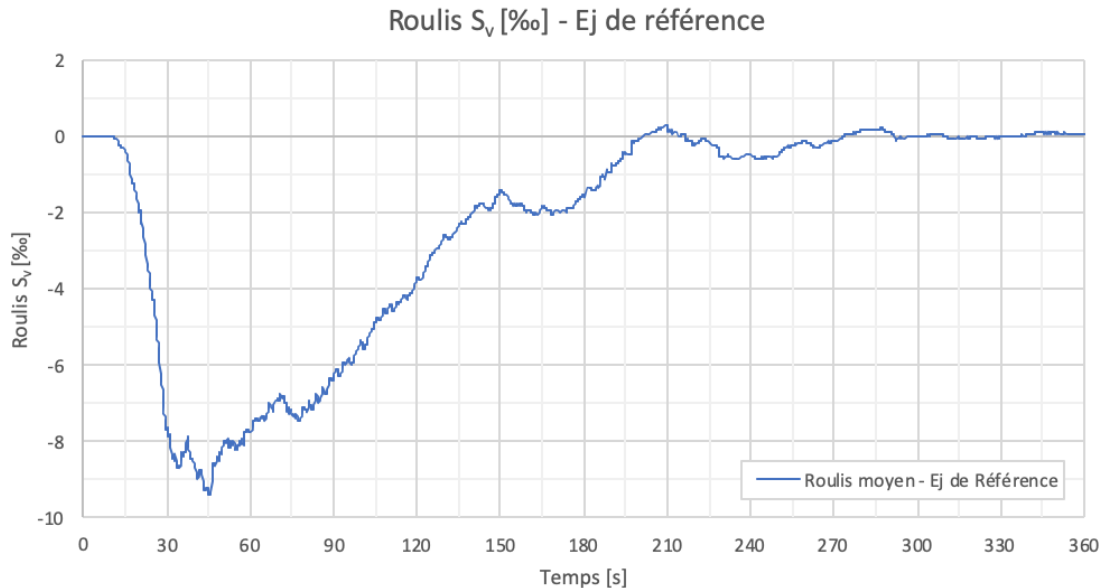


Figure 5-43 : Pente de roulis moyen - Éjecteur de référence

Mise en situation avec la pente d'eau

Avant de pouvoir comparer les pentes de roulis avec les pentes d'eau, il faut déterminer les pentes d'eau. On calcule la pente d'eau avec $S_w = \frac{\Delta h}{l_s} \cdot 1000$ [‰] ; où Δh [m] est la différence des niveaux d'eau mesurés à partir des capteurs de pression différentielle dans le cas Bajoyer et l_s [m] la largeur du sas.

On observe sur Figure 5-44, les pentes d'eau de trois essais dans une configuration identique. La mesure de pression est prise au milieu de l'écluse en présence de la barge contre les bajoyers. Pour la suite de l'analyse, nous utilisons la moyenne de ces trois pentes d'eau, visibles sur la Figure 5-45. La pente d'eau atteint son maximum après 30s, soit juste après l'ouverture complète de la vanne. On remarque une diminution de la pente après les 30s et changement de pente vers les 60 s. En effet, on observe sur Figure 5-13 que la composante verticale des champs de vitesse dans la partie supérieure du sas diminue après les 30 s et est opposée après 60 s.

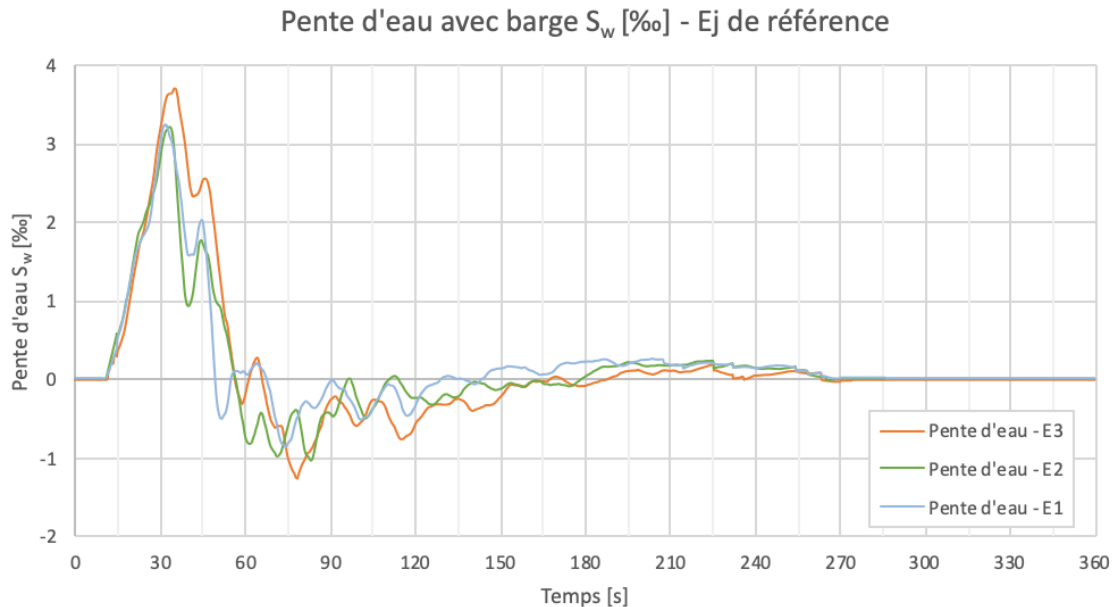


Figure 5-44 : Pente d'eau avec barge – Éjecteur de référence

Sur la Figure 5-45, on observe la comparaison entre la pente d'eau moyenne avec barge et la pente de roulis. On remarque principalement trois choses :

- L'opposition des pentes. En effet, la pente d'eau est positive et la pente de roulis est négative. Cette opposition est contre intuitive à la pensée humaine car l'inclinaison du bateau ne suit pas la pente d'eau lors du remplissage. On suppose que cette inclinaison opposée est due en partie au jeu de pression qui s'exerce sur la carène du bateau, ce thème sera abordé dans la prochaine section.
- L'analyse des valeurs maximum, en valeur absolue, donne pour la pente d'eau 3,5 ‰ et pour la pente de roulis 9,5 ‰. La pente de roulis est nettement supérieure à la pente d'eau.
- La pente d'eau change de signe vers les 60 s mais le roulis conserve le même sens durant tout le sassement.

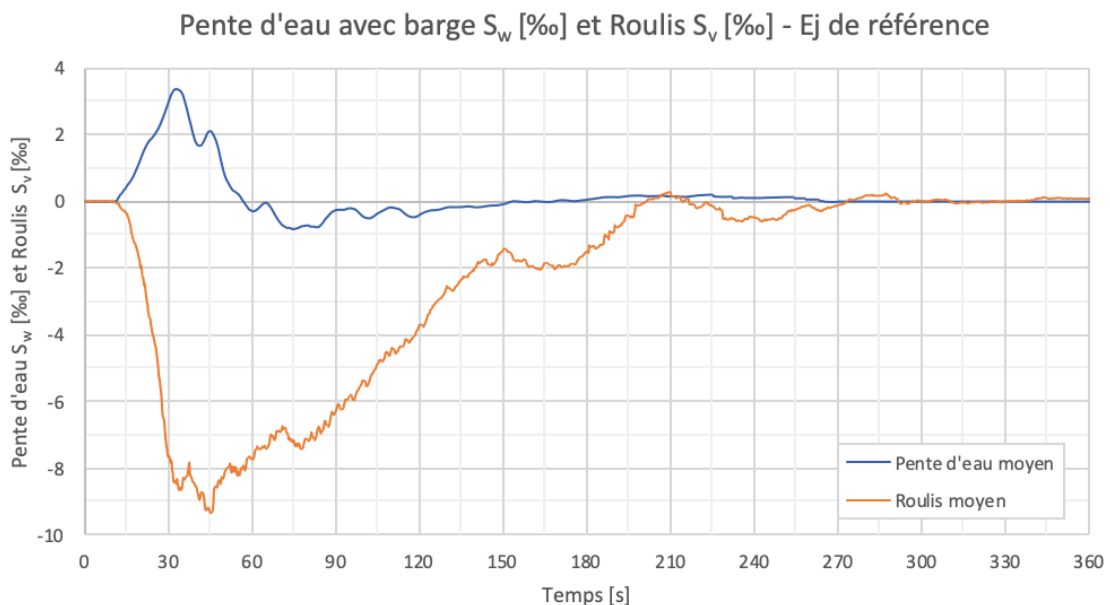


Figure 5-45 : Comparaison - Pente d'eau et Pente de roulis - Éjecteur de référence

La Figure 5-47 permet de corriger la représentation intuitive transversale du comportement de l'eau et du bateau lors d'un remplissage en mode dégradé émise par le SPW (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013), visible sur la Figure 5-46. On observe que la pente de roulis du bateau est bien opposée à la pente d'eau transversale.

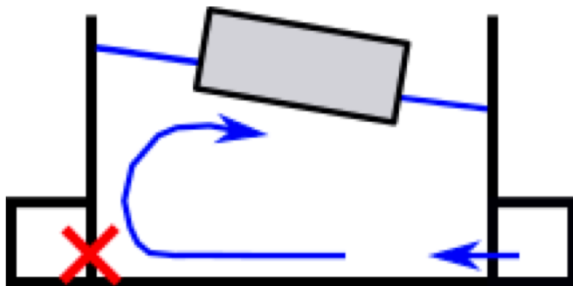


Figure 5-46 : Coupe remplissage dégradé - Ancienne représentation (Savary, Bousmar., Swartenbroekx, 2013)

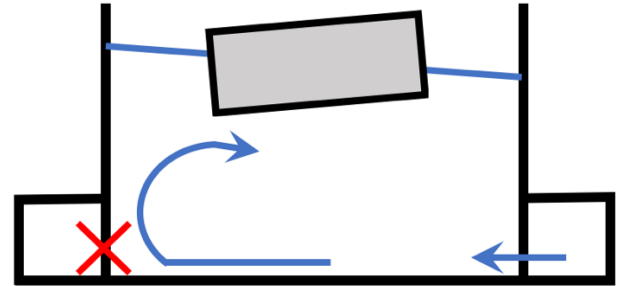


Figure 5-47 : Coupe remplissage dégradé - Nouvelle représentation (avant 60s)

La nouvelle campagne de mesure permet de confirmer et d'approfondir les observations relevées par El Ouamari et Lenaerts.

Comparaison entre force transversale, pente d'eau avec barge et roulis

Lors de leur campagne de mesure, EL Ouamari et Lenaerts ont mesuré les forces d'amarrage agissant sur le bateau via des jauges de déformation. La force d'amarrage transversale, représenté ci-dessous, a été adimensionnalisée avec

$F_T = \frac{f}{P} \cdot 1000 \text{ [‰]}$ où $f \text{ [N]}$ est la force mesurée par les jauges de déformation et $P \text{ [N]}$ correspond au poids de la barge.

Comme évoqué dans la section état de l'art, la force d'amarrage est la combinaison d'une composante hydrostatique (liée à la pente d'eau dans le sas) : $F_{hs} = P \cdot S_w$ où S_w est la pente d'eau et d'une composante hydrodynamique (liée à la vitesse de l'eau dans le sas). Pour permettre la comparaison, la composante hydrostatique peut être adimensionnalisée, comme étant égale à la pente d'eau S_w : $\frac{F_{hs}}{P} \cdot 1000 = S_w \text{ [‰]}$ (El Ouamari et Lenaerts, 2019).

La Figure 5-48 permet d'observer la proportion de ces composantes dans l'effort d'amarrage transversal. L'analyse des valeurs maximum donne pour la force d'amarrage transversale 7 ‰, pour la pente d'eau 3 ‰ et pour le roulis 9,5 ‰. On remarque que la force hydrostatique, via la pente d'eau, ne suffit pas à évaluer la totalité de l'effort d'amarrage transversal. L'apport de la force hydrostatique est non négligeable. Elle résulte du phénomène giratoire présenté précédemment. On observe également que la valeur maximum du roulis est plus élevée que la force d'amarrage transversale.

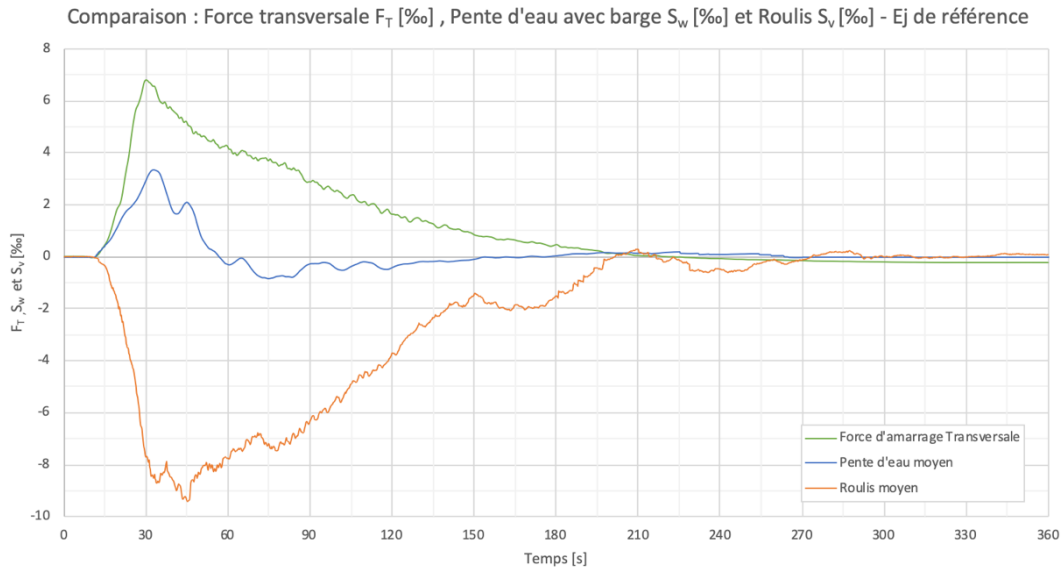


Figure 5-48 : Comparaison entre force d'amarrage transversale, pente d'eau avec barge et roulis - Éjecteur de référence

Comparaison du roulis entre l'éjecteur de référence et l'éjecteur réduit

La Figure 5-49 permet de comparer la pente de roulis pour les deux tailles d'éjecteurs différentes. Les roulis pris en compte pour le cas de l'éjecteur réduit sont les roulis adaptés (multipliés par le facteur d'homothétie $f = 1,5$) pour correspondre à un hydrogramme de remplissage similaire à celui du cas pour l'éjecteur de référence. On observe que les courbes pour les deux types d'éjecteurs sont semblables. Nous avons une forte augmentation de la pente de roulis jusqu'à l'ouverture complète de la vanne, suivie d'une diminution progressive de la pente de roulis. Dans le cas de l'éjecteur réduit, le pic est atteint plus brutalement et plus tôt que pour l'éjecteur de référence comme expliqué dans la section 5.2.1.2, l'effet circulatoire s'amorce plus tôt et se poursuit plus longtemps. Le pic retombe légèrement après l'ouverture complète avant de diminuer progressivement comme pour l'éjecteur de référence. La valeur de roulis maximum, en valeur absolue, est de 18,5 ‰ pour l'éjecteur réduit et de 9,5 ‰ pour l'éjecteur de référence. Comme introduit précédemment lors de l'analyse des champs de vitesse, la taille des éjecteurs n'influence pas le comportement global de l'eau mais seulement l'inclinaison de la pente de roulis.

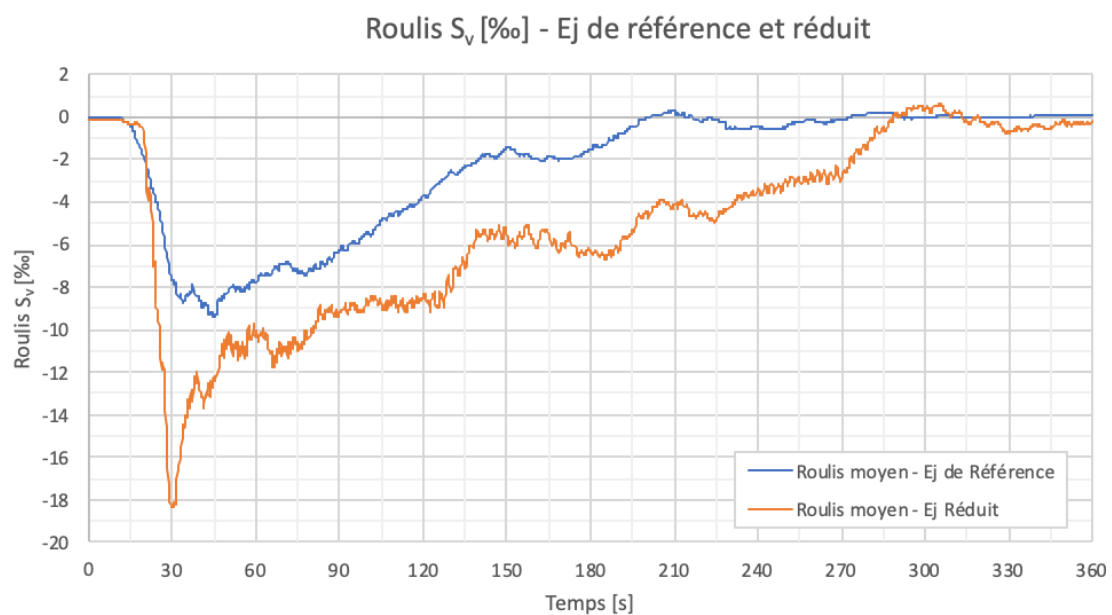


Figure 5-49 : Comparaison - Pente de roulis entre éjecteur de référence et réduit

5.2.4 Pressions

Les mesures de pression différentielle, introduites dans la section 4, sont déterminées à partir des capteurs de pression différentielle. L'étude considère les deux éjecteurs disponibles : l'éjecteur de référence (8cm x 1cm) et l'éjecteur réduit (4cm x 1cm). Elle considère deux cas : le cas carène et le cas carène-référence. La loi utilisée est toujours la loi d'ouverture de vanne linéaire de 30 s.

Les pressions sont mesurées et exprimées en millimètre de colonne d'eau [mmH₂O]. A noter que 1 [mmH₂O] correspond à 9,8 [Pa].

Cas Bajoyer

Il sert à déterminer la pente d'eau dans le sas. Il a été présenté dans la section précédente afin de permettre une comparaison entre la pente d'eau et la pente de roulis.

Cas Carène

Il a pour objectif d'illustrer et de quantifier la différence de pression appliquée entre les carènes tribord et bâbord. Pour rappel, la mesure de pression est réalisée de chaque côté de la carène sur un même plan horizontal (Figure 5-50). La mesure est réalisée pour quatre positions verticales le long de la carène toujours au droit de l'éjecteur.



Figure 5-50 : Coupe Maillage illustrée - Prises de pression avec bateau - Cas Carène

On observe, sur la Figure 5-51, les pressions différentielles appliquées sur la carène. Les couleurs des positions de mesures de pression verticales et la nomination P°diff X de la Figure 5-50 (X pour la position verticale de 1 à 4) correspondent avec les courbes de la Figure 5-51. On observe plusieurs choses :

- Les courbes de pressions pour les quatre positions ont un comportement semblable. La pression (orange) la plus élevée correspond à la position au niveau du fond du bateau. Les pressions diminuent en remontant le long de carène pour arriver à la position 1 (jaune) qui est la plus proche de la surface libre où la pression la plus faible.
- Le pic des courbes est atteint entre 30 s et 45 s, soit après l'ouverture complète de la vanne. Les différences de pression augmentent rapidement en début de sassement, lorsque la hauteur/la masse d'eau est faible jusqu'à atteindre son pic après l'ouverture complète de la vanne. Ensuite, les pressions diminuent progressivement. Ce comportement des

différences de pression concorde avec le comportement du phénomène giratoire.

- Les courbes de pression différentielle sont positives (la pression gauche est supérieure à la pression droite). Cette différence de pression est illustrée sur Figure 5-52. Elle permet d'imaginer les pressions agissant sur la carène, ce n'est en aucun cas une représentation rigoureuse de l'intensité des pressions.

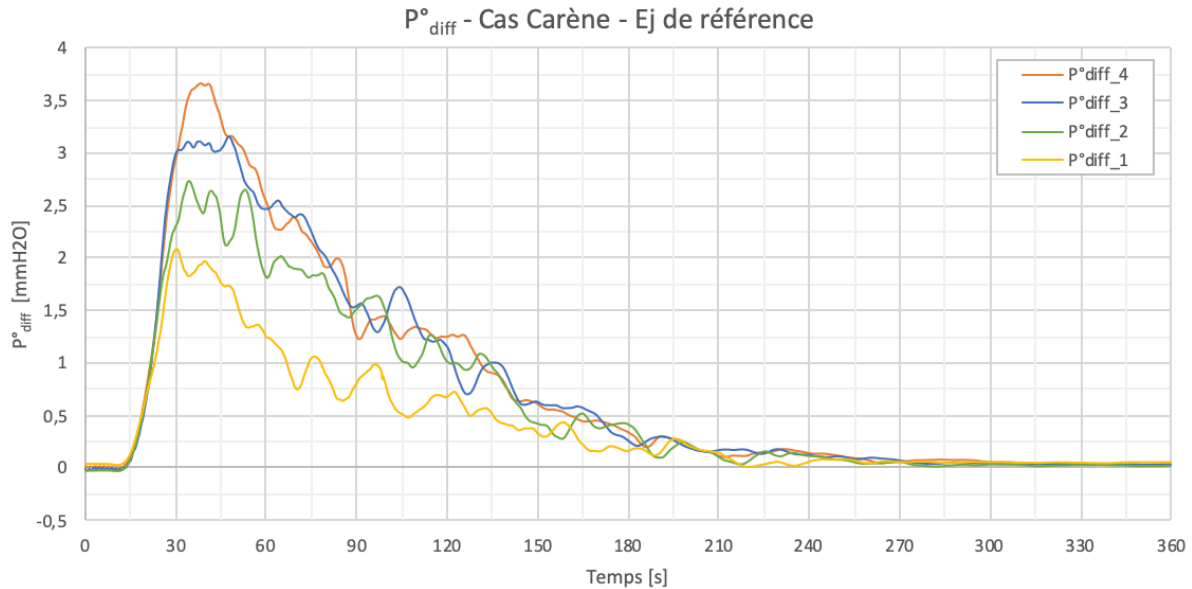


Figure 5-51 : Pression différentielle - Cas carène - Éjecteur de référence

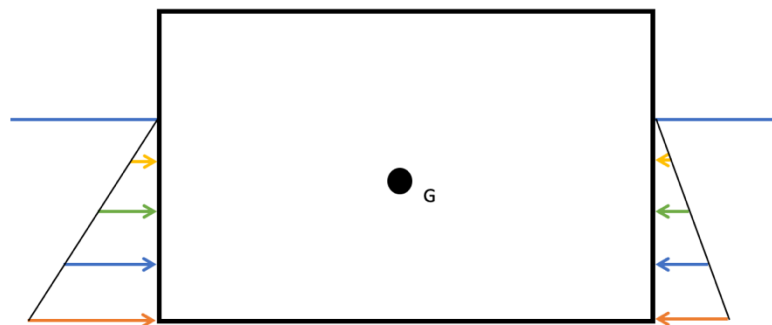


Figure 5-52 : Illustration des pressions appliqué sur la carène - Cas carène

La Figure 5-53 permet d'observer les pressions appliquées sur la carène pour l'éjecteur réduit. Les pressions prises en compte pour le cas de l'éjecteur réduit sont les pressions adaptées (multipliées par le facteur d'homothétie $f = 1,5$) pour correspondre à un hydrogramme de remplissage similaire à celui du cas pour l'éjecteur de référence. La représentation des couleurs et les positions de mesures sont identiques à celles pour l'éjecteur de référence. On relève les mêmes observations que pour l'éjecteur de référence, décrite précédemment. On peut identifier deux particularités :

- Les valeurs maximum sont plus élevées par rapport à celles de l'éjecteur de référence.
- Le pic est atteint plus tôt, vers 30 s. En effet, le phénomène giratoire s'amorce plus tôt dans le cas de l'éjecteur réduit.

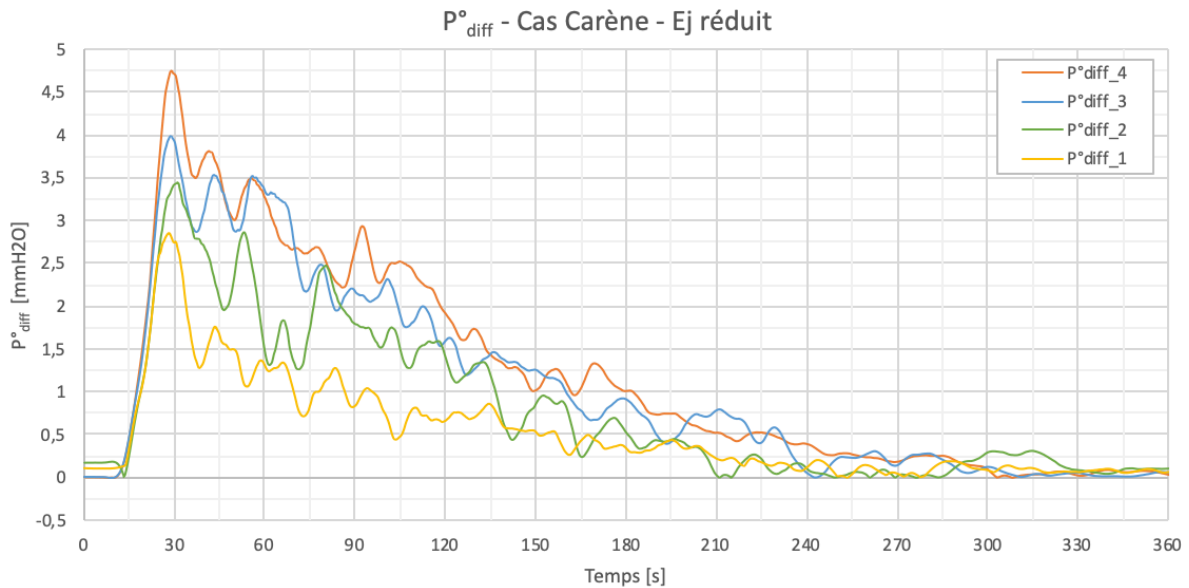


Figure 5-53 : Pression différentielle - Cas carène - Éjecteur réduit

Afin de quantifier l'impact des pressions sur la barge lors d'un remplissage en mode dégradé, une intégration des pressions a été réalisée afin d'obtenir la force résultante des pressions agissant sur la barge :

$$F_p = \int p(z) \cdot L \cdot dz \quad [N]$$

Où

L : la longueur du bateau ($L = 7,2 \text{ [m]}$)

$p(z)$: la pression appliquée sur la carène, issue des mesures et converti en N/m^2

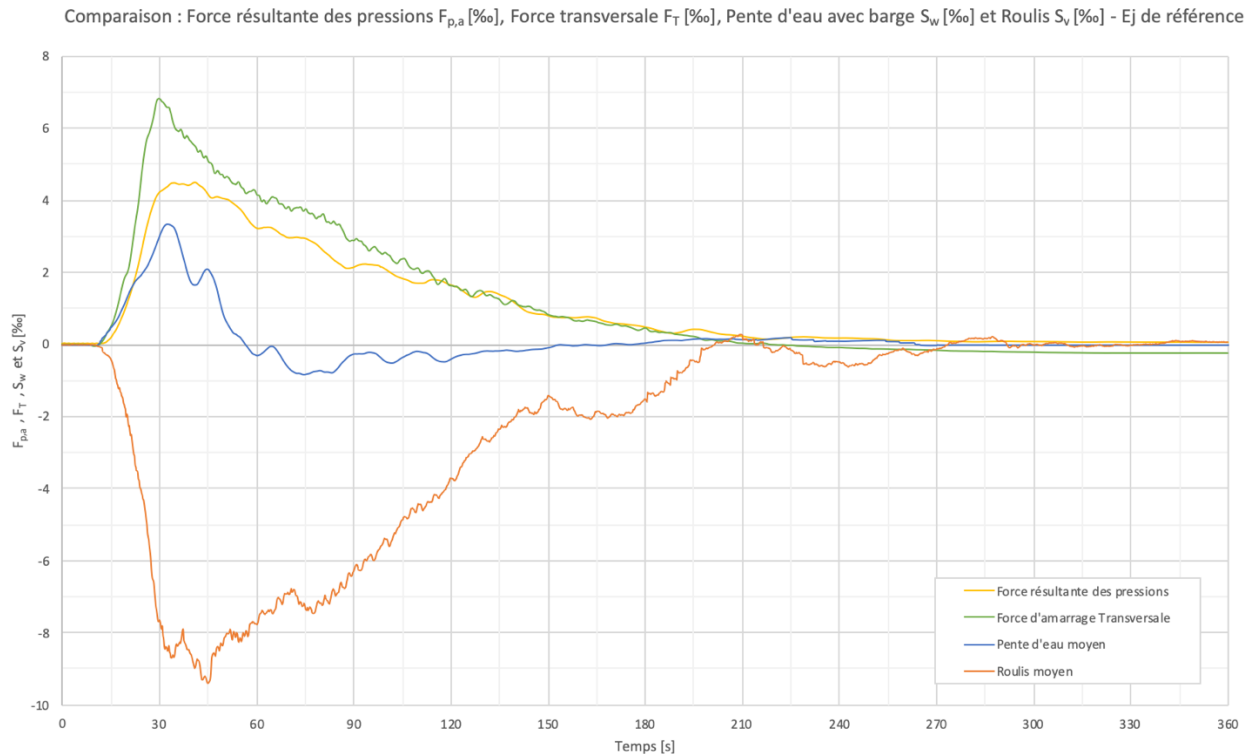
Pour rappel, les mesures de pression sont réalisées en mmH2O et 1 [mmH2O] correspond 9,806 [N/m^2].

La force va être adimensionnalisée afin de permettre la comparaison avec la force d'amarrage transversale F_T [‰], la pente d'eau avec barge S_w [‰] et le roulis S_v [‰] :

$$F_{p,a} = \frac{F_p}{P} \cdot 1000 \quad [‰]$$

Où P [N] : le poids de la barge

La Figure 5-54 permet la comparaison entre la force résultante des pressions et la force d'amarrage transversale, la pente d'eau avec barge et le roulis (déjà présenté précédemment). On remarque que le comportement de la force résultante des pressions est semblable avec les autres résultats. Elle atteint une valeur maximum de 4,5 ‰ et prend une proportion intéressante dans la composition de la force d'amarrage.



Cas Carène-Référence

Son objectif est d'illustrer, de quantifier et de détailler les pressions appliquées sur la carène séparément. Pour rappel, la mesure de pression est réalisée entre une position le long de la carène et une position de référence (au centre de la largeur du sas). La mesure est réalisée pour dix positions, quatre le long de la carène et une en dessous pour chaque côté (Figure 5-55)



Figure 5-55 : Coupe Maillage illustrée - Prises de pression avec bateau - Cas Carène-Référence

Sur la Figure 5-56 et la Figure 5-57, on observe les pressions appliquées sur la carène. Les couleurs des courbes de ces deux figures correspondent avec les couleurs des positions de mesure de pression et la nomination $P^\circ\text{diff_YX}$ de la Figure 5-55 avec Y correspondant au côté Gauche ou Droite et X la position verticale de 0 à 4. On observe plusieurs choses pour les pressions à gauche (Figure 5-56), fortement similaires au cas carène :

- Les courbes de pression de 1 à 4, soit le long de la carène, ont un comportement semblable. La pression (orange) la plus élevée correspond à la position au niveau du fond du bateau. Les pressions diminuent en remontant le long de la carène pour arriver à la position 1 (jaune) qui est la plus proche de la surface libre et où la pression est la plus faible. La courbe de pression 0, position en dessous du bateau, a une courbe beaucoup plus aplatie et présente une faible variation de pression.
- Le pic des courbes est atteint juste après 30 s, soit après l'ouverture complète de la vanne. Les pressions augmentent rapidement en début de sassement, lorsque la hauteur/la masse d'eau est faible jusqu'à atteindre son pic après l'ouverture complète de la vanne. Ensuite, les pressions diminuent progressivement. Ce comportement des pression concorde avec le comportement du phénomène giratoire.
- Les courbes de pression différentielle sont positives. En effet, la pression gauche est supérieure à la pression de référence (Figure 5-56).

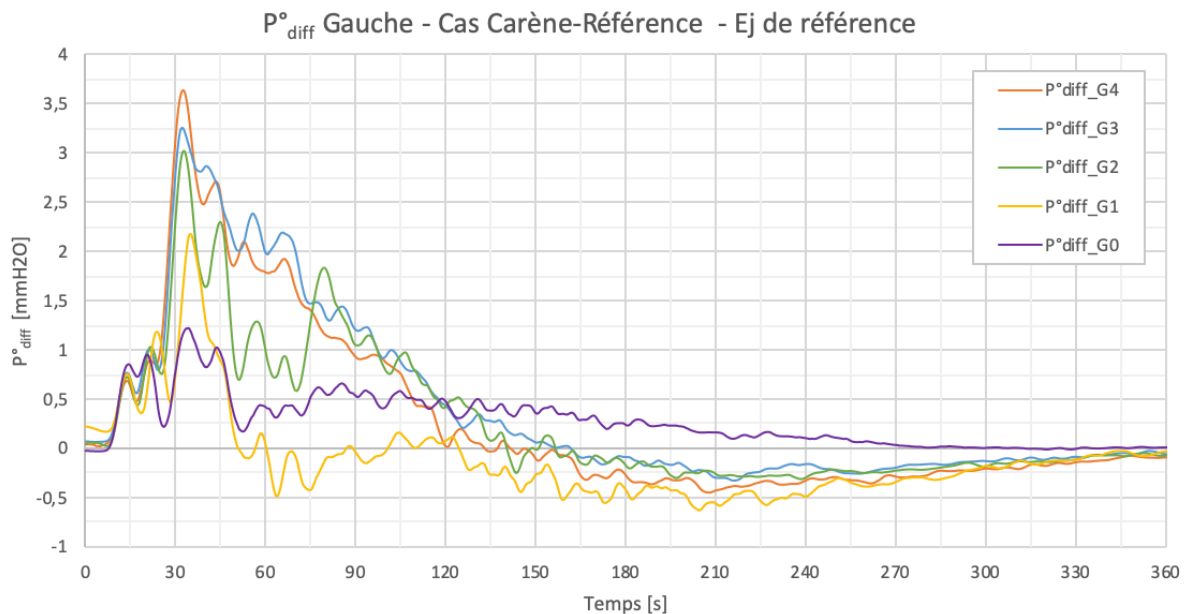


Figure 5-56 : Pression différentielle à gauche - Cas carène-référence - Éjecteur de référence

Pour les pressions à droite (Figure 5-57), on observe que les courbes pour les cinq positions sont identiques. Les pressions présentent une très faible variation et un très faible impact pour la carène du bateau.

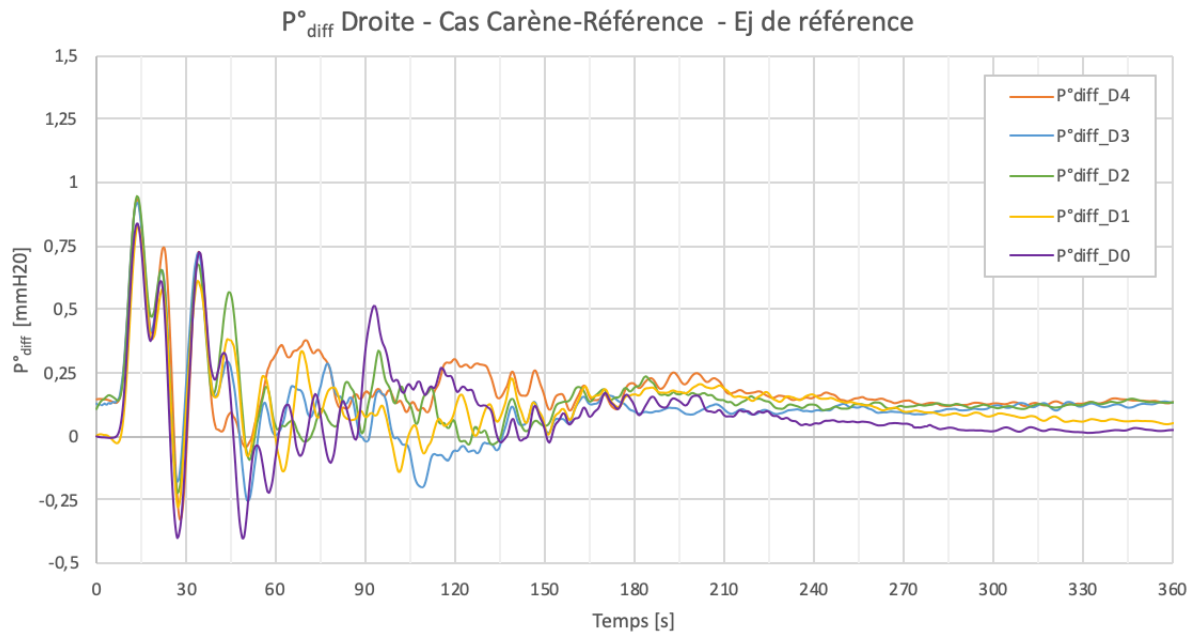


Figure 5-57 : Pression différentielle à droite - Cas carène-référence - Éjecteur de référence

L'intensité des pressions est illustrée sur la Figure 5-58. Elle permet d'imaginer les pressions agissant sur la carène (ce n'est en aucun cas une représentation rigoureuse de l'intensité des pressions).

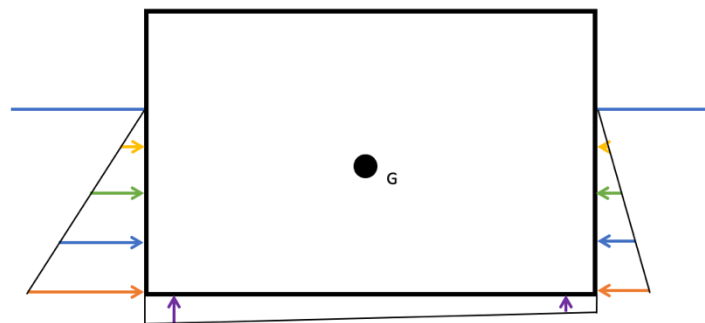


Figure 5-58 : Illustration des pression appliquées sur la carène - Cas carène-référence

On observe les pressions appliquées sur la carène pour l'éjecteur réduit à la Figure 5-59 et la Figure 5-60. La représentation des couleurs et des positions de mesure est identique à celle de l'éjecteur de référence. Comme pour le cas carène, on relève les mêmes observations que pour l'éjecteur de référence, décrit précédemment. On peut identifier deux particularités pour le côté gauche (Figure 5-59) :

- une différence concernant les pics : les valeurs maximum sont supérieures à celles de l'éjecteur de référence.
- Une perturbation beaucoup plus marquée, les courbes présentent plusieurs pics. Le premier pic est atteint plus tôt, avant 30 s. En effet, le phénomène giratoire s'amorce plutôt dans le cas de l'éjecteur réduit. Un second pic à 45 s marque la valeur maximum enregistrée.

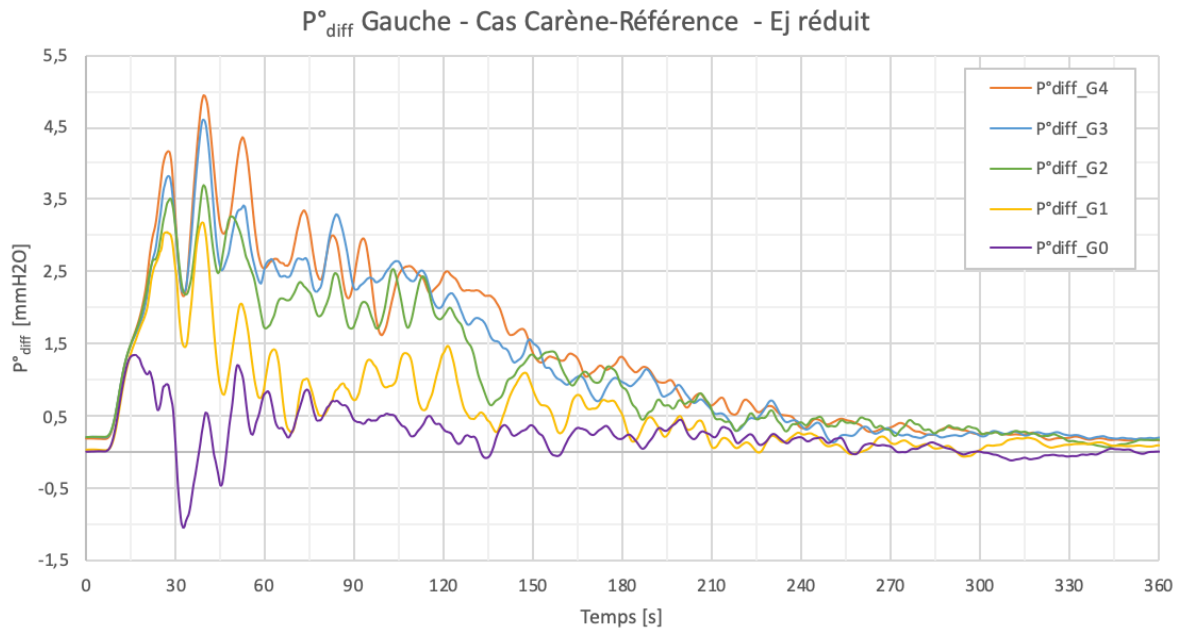


Figure 5-59 : Pression différentielle à gauche - Cas carène-référence - Éjecteur réduit

Pour le côté droit (Figure 5-60), on observe deux différences par rapport à l'éjecteur de référence :

- Les courbes de différence de pression sont négatives.
- Une perturbation beaucoup plus marquée, les courbes présentent une sorte d'oscillation. En comparant les pics entre le côté droit et gauche, on observe un lien entre eux. Juste après 30s, on observe un pic "descendant" pour le côté gauche et un pic "descendant" également pour le côté droit.

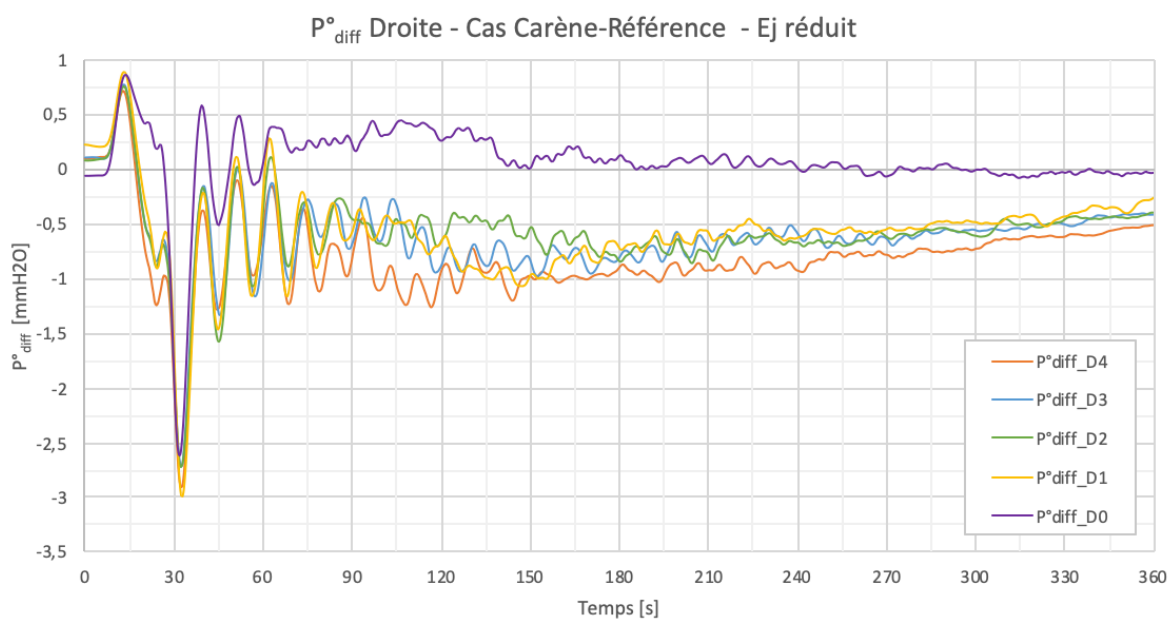


Figure 5-60 : Pression différentielle à droite - Cas carène-référence - Éjecteur réduit

5.3 Résultat in situ

En octobre 2017, une campagne de mesures a été réalisée sur le site de la 4^{ème} écluse de Lanaye par la Direction des Recherches hydrauliques du SPW. Elle avait pour but de tester plusieurs lois d'ouverture de vannes en mode dégradé. Lors de cette campagne, la Direction de la Gestion hydrologique a réalisé des mesures de profils de vitesse lors d'un remplissage dégradé en faisant varier la loi d'ouverture. Dans le cadre de ce travail, les mesures de vitesses brutes sont traitées et une comparaison qualitative avec les mesures de laboratoire est proposée.

Procédure essai

Le dispositif de mesure utilisé est une sonde ADCP, Acoustic Doppler Current Profiler, de type "Rio Grande" fabriqué par Teledyne RDI (Figure 5-61, image de gauche). Elle permet de réaliser rapidement un grand nombre de mesures. La sonde permet de mesurer les trois composantes (en x, y et z) de la vitesse selon un profil vertical par effet de Doppler. Les quatre émetteurs-récepteurs de la sonde émettent des trains d'onde à 1200 kHz. Ces ondes sont réfléchies par les particules naturellement en suspension dans l'écoulement lors du sassement. L'onde réfléchie permet de déterminer la vitesse relative des particules par rapport à la sonde avec un déphasage fréquentiel. On obtient les trois composantes de la vitesse en combinant les quatre signaux avec une boussole et un inclinomètre. Le profil vertical de vitesse est donné par des cellules de 25 cm de hauteur avec des zones "mortes" d'environ 50 cm à la surface et au fond (Direction des Recherches Hydrauliques, 2016).

Pour la campagne de mesures, la sonde est installée sur un trimaran (Figure 5-61, partie de droite) et remorquée depuis un bajoyer. Le trimaran a été placé à une position fixe au centre de l'écluse (Figure 5-62). Les essais ont été réalisés pour différentes lois d'ouverture de vanne et pour une seule position fixe, centrale au sas, face à un éjecteur.

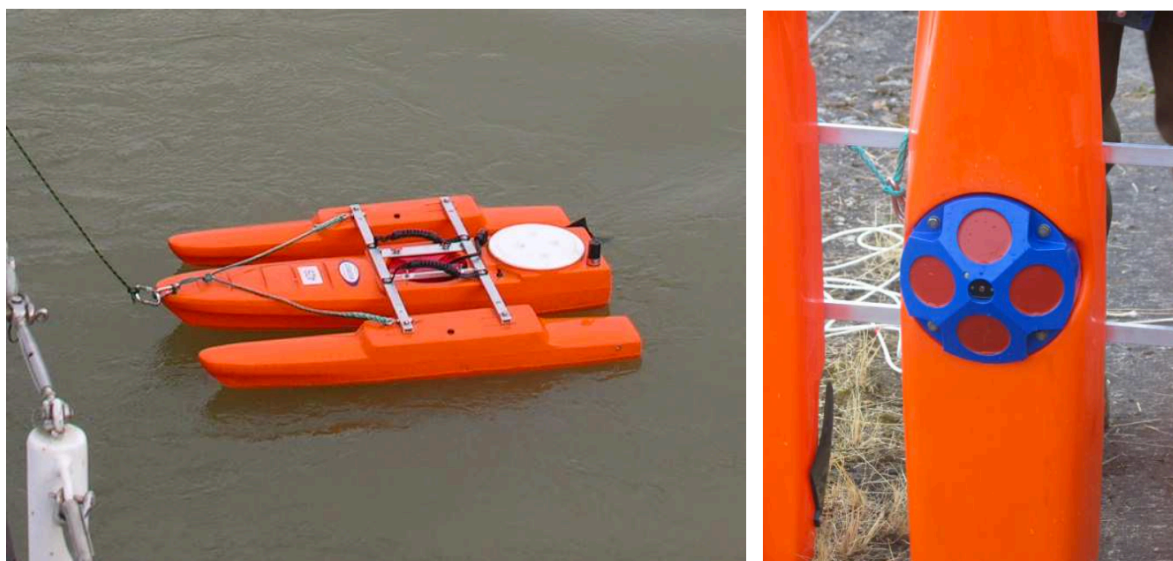


Figure 5-61 : Sonde ADCP (Direction des Recherches Hydrauliques, 2016)



Figure 5-62 : Sonde ADCP dans le sas (Service Public de Wallonie, 2017)

Résultats

Pour déterminer l'essai traité, nous avons choisi l'essai avec une loi linéaire comme utilisée sur le modèle réduit. Pour rappel, nous utilisons sur le modèle réduit une loi d'ouverture de vanne linéaire en 30 secondes. Le choix s'est porté sur l'essai RDA, pour Remplissage Dégradé selon la loi d'ouverture A. Il s'agit d'une loi d'ouverture de vanne linéaire en 10 minutes (Figure 5-63). On observe sur la Figure 5-64, l'hydrogramme et le limnigramme de l'essai RDA. On atteint le débit maximum à 10 min, soit au moment de l'ouverture complète de la vanne. La hauteur d'eau varie de 47 à 61 mètres, soit un delta de 14 mètres, afin de permettre le franchissement de l'écluse lors d'un sassement.

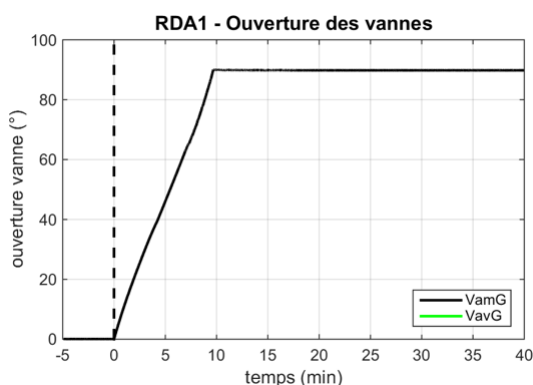


Figure 5-63 : Loi d'ouverture A - Remplissage mode dégradé RDA (Service Public de Wallonie, 2016)

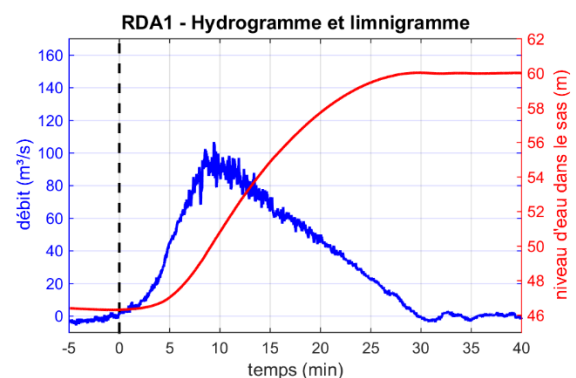


Figure 5-64 : Hydrogramme et limnigramme pour RDA (Service Public de Wallonie, 2016)

Comme lors de l'étude des champs de vitesses pour le modèle réduit (Section 5.2.1), les mesures des vitesses transversales (les composantes de la vitesse en x et y) ont

été représentées pour différents temps de sasement. On observe les champs de vitesse sur la Figure 5-65, la Figure 5-66 et la Figure 5-67 respectivement à 2, 5 et 8 min après l'ouverture de la vanne pour une position centrale fixe. À noter que les données brutes après 9 min sont erronées.

Les figures ci-dessous permettent de confirmer le phénomène giratoire et l'intensité des vitesses entre le modèle réduit et le modèle réel en tenant compte de l'échelle. L'ordre de grandeur est acceptable.

La comparaison doit être prise avec un recul, car les modèles ne sont pas totalement similaires, comme expliqué précédemment leur largeur de sas ne correspond pas. Les lois d'ouverture ne correspondent pas non plus, elles ne respectent pas les lois des similitudes.

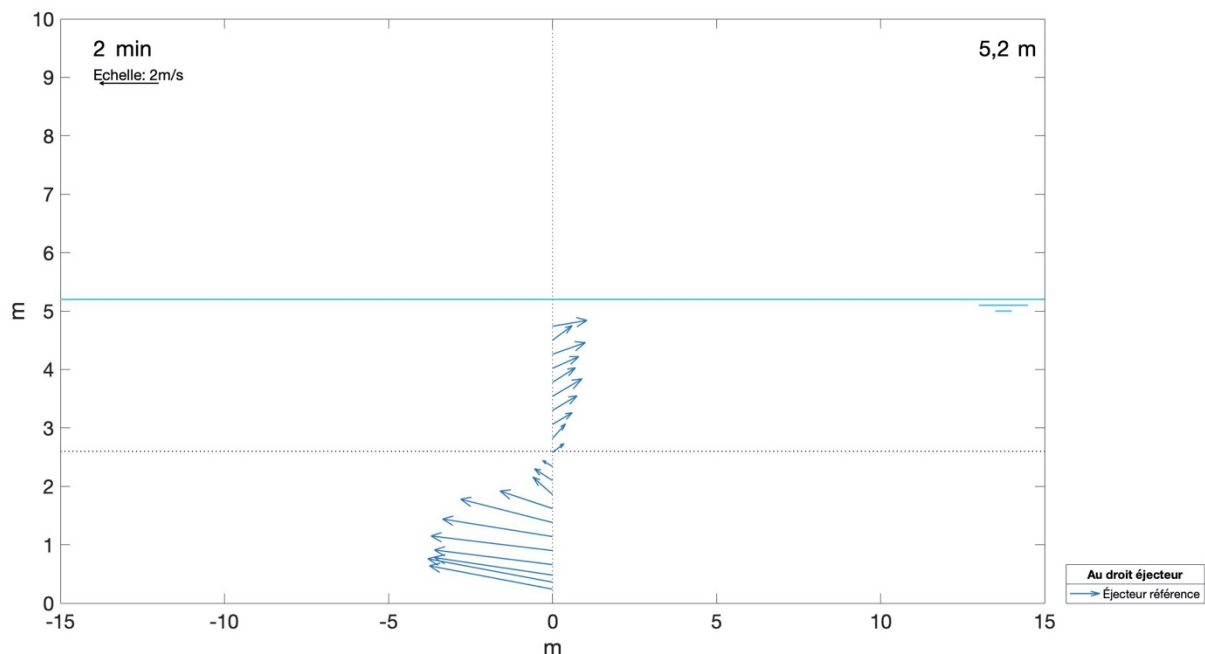


Figure 5-65 : Champ de vitesses - RDA - 2 min après l'ouverture

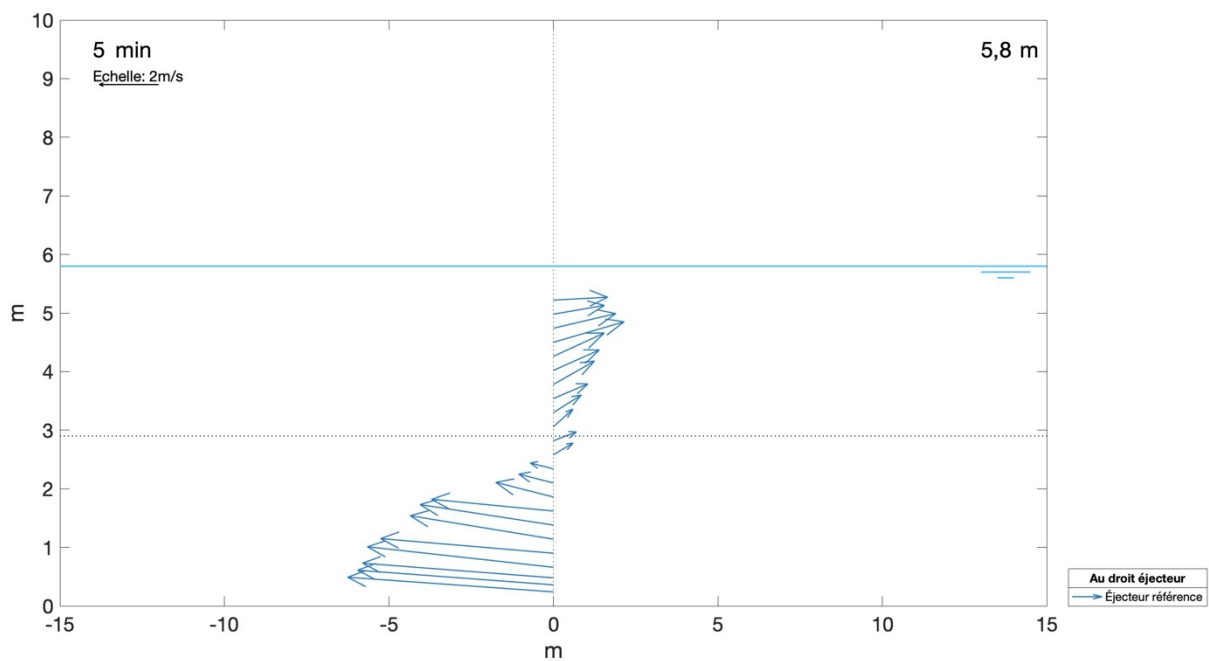


Figure 5-66 : Champ de vitesses - RDA - 5 min après l'ouverture

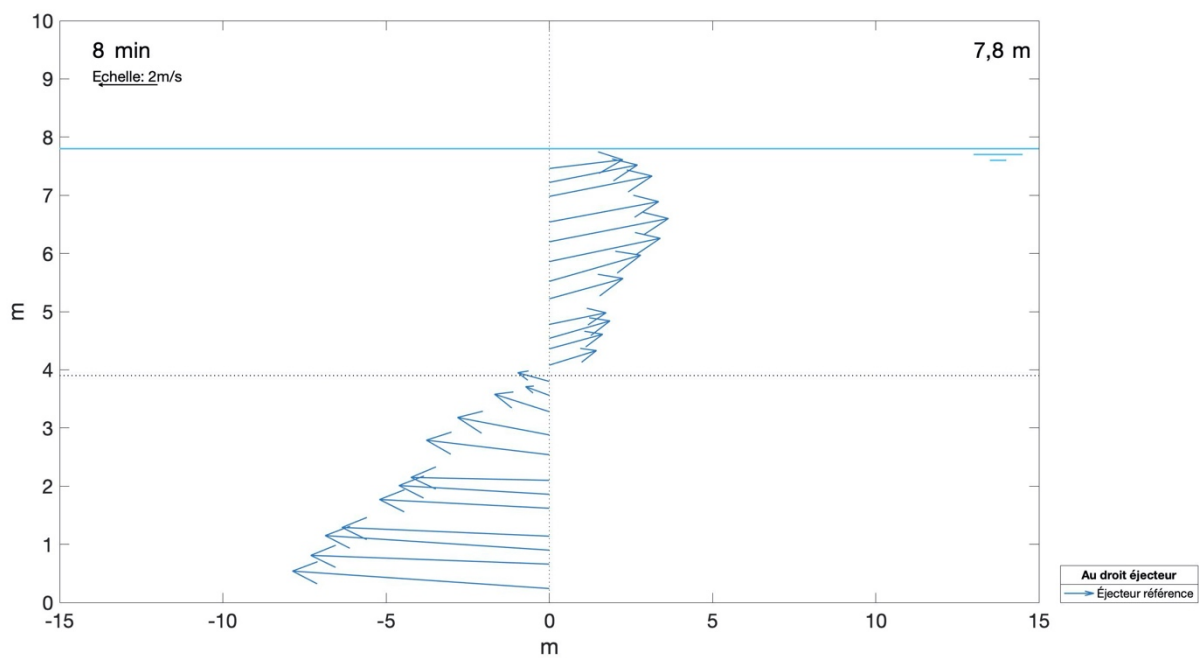


Figure 5-67 : Champ de vitesses - RDA - 10 min après l'ouverture

5.4 Synthèse

Cette section reprend dans les grandes lignes, les éléments majeurs traités dans ce travail. Ensuite, elle les met en relation pour permettre une compréhension globale des actions appliquées sur un bateau lors d'un remplissage dégradé. Pour rappel, l'éjecteur fonctionnel est situé à droite. Nous avons donc :

Champ de vitesse sans et avec bateau

Les champs de vitesse permettent d'observer la création et le développement du phénomène giratoire avec et sans bateau dans le sas. Lors d'un remplissage, le phénomène giratoire se développe avec la surface libre dans le cas d'un sas vide (Figure 5-68) et avec le fond du bateau dans le cas d'un sas avec bateau (Figure 5-69).

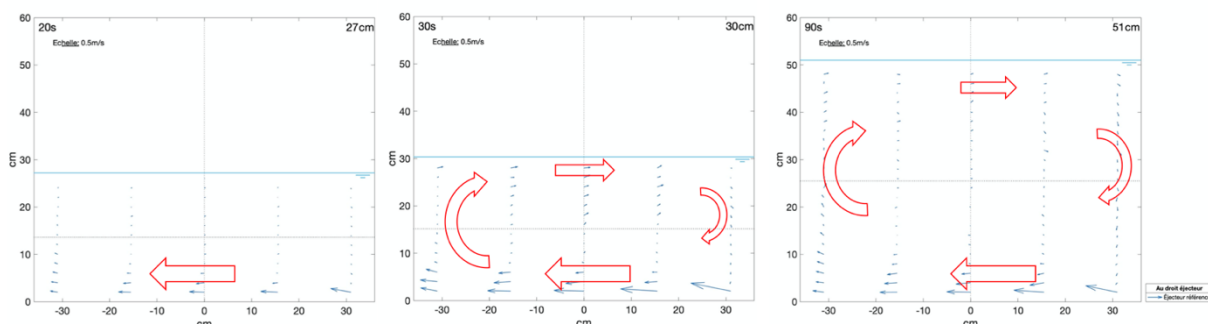


Figure 5-68 : Synthèse – Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence sans bateau – Évolution

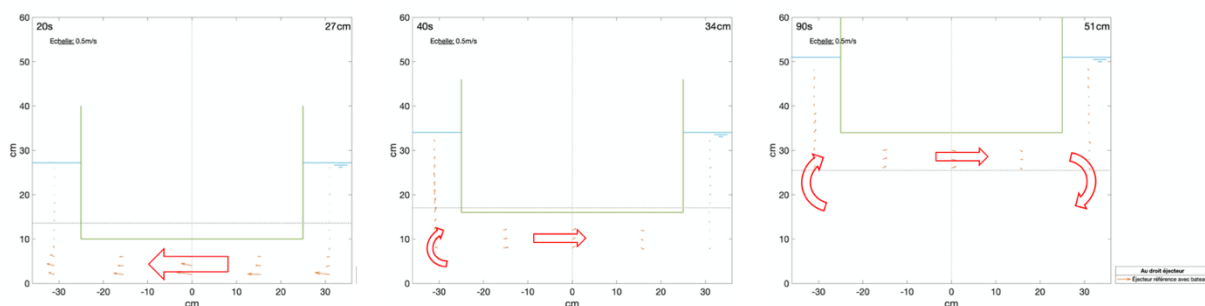


Figure 5-69 : Synthèse – Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau – Évolution

Pente d'eau et roulis

L'analyse de la pente d'eau dans le sas et de la pente de roulis du bateau permettent d'observer que les pentes sont opposées (Figure 5-70) pendant la partie critique du remplissage (inversion de la pente d'eau à la fin. La valeur maximum du roulis, en absolu est de 9,5 ‰ et est presque 3 fois supérieure à la valeur maximum de la pente d'eau qui est de 3,5 ‰. Ces valeurs sont supérieures à la valeur réglementaire de 0,5 ‰. En fait, la valeur réglementaire correspond à la force appliquée sur la bateau. Mais comme les forces hydrostatiques sont supposées être prépondérantes par simplification, on considère cette limite sur la pente d'eau. La Figure 5-71 permet d'illustrer la nouvelle représentation avec l'opposition de pente et le phénomène giratoire.

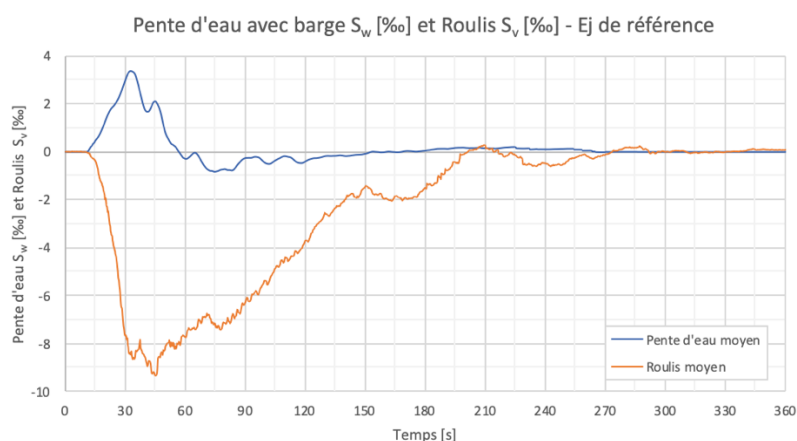


Figure 5-70 : Synthèse – Pente d'eau avec barge et pente de roulis au droit de l'éjecteur de référence

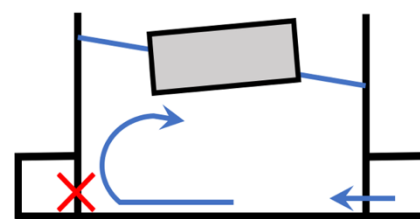


Figure 5-71 : Synthèse - Coupe remplissage dégradé - Nouvelle représentation

Pression

L'analyse des pressions différentielles de chaque côté de la barge a permis d'observer les répartitions des pressions appliquées sur la carène du bateau. Les pressions du côté gauche du bateau sont positives et supérieures aux pressions du côté droit, visibles sur la Figure 5-72 et illustrées sur la Figure 5-73.

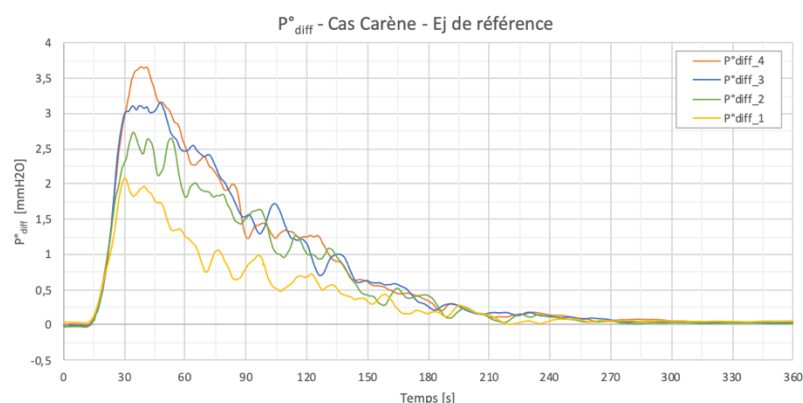


Figure 5-72 : Synthèse - Pressions différentielles - Cas carène - Éjecteur de référence

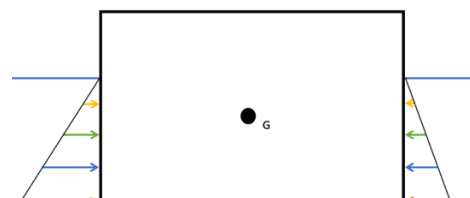


Figure 5-73 : Synthèse - Illustration des pressions appliquées sur la carène - Cas carène

L'analyse des pressions différentielles entre un côté de la barge et une position de référence a permis d'observer en détails et séparément les répartitions des pressions appliquées sur la carène du bateau. Les pressions appliquées sur le côté gauche sont positives (Figure 5-74) et les pressions appliquées en dessous du bateau et à droite sont très faibles (Figure 5-76). La répartition est illustrée sur la Figure 5-75.

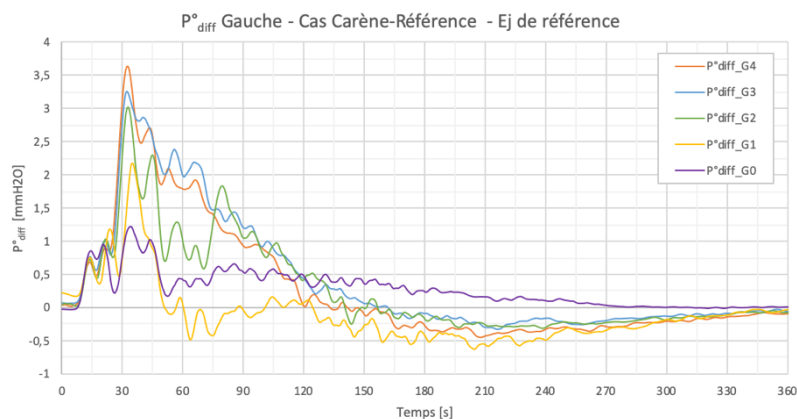


Figure 5-74 : Synthèse - Pressions différentielles à gauche - Cas carène-référence - Éjecteur de référence

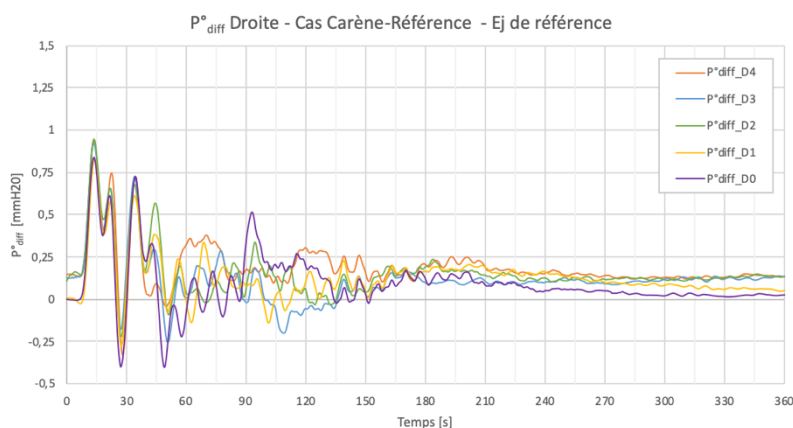


Figure 5-76 : Synthèse - Pressions différentielles à droite - Cas carène-référence - Éjecteur de référence

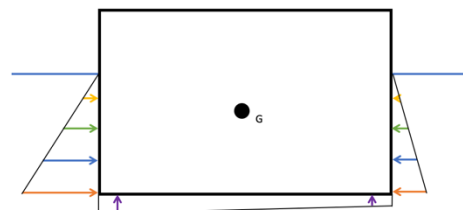


Figure 5-75 : Synthèse - Illustration des pressions appliquées sur la carène - Cas carène-référence

Conclusion

À partir des observations des phénomènes rencontrés qui sont le phénomène giratoire, la pente d'eau, la pente de roulis et la pression, la Figure 5-77 permet d'illustrer le comportement de la barge lors du remplissage. Cette illustration a pour rôle de permettre la compréhension de l'ensemble des différents phénomènes mais en aucun cas de quantifier les intervenants. On observe la position à l'équilibre ($T = 0$ s) sur la figure de gauche et le sassement juste après l'ouverture complète de la vanne ($T = \pm 30$ s) sur la figure de droite.

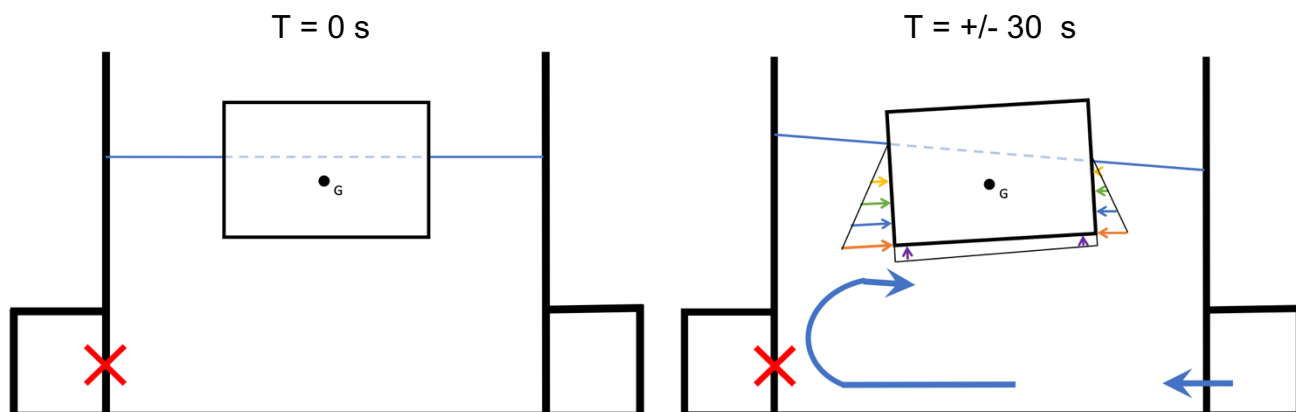


Figure 5-77 : Synthèse - Illustration des phénomènes lors d'un sassement

6 Conclusions et Perspectives

Ce travail a permis d'améliorer la compréhension des phénomènes observés sur le site de la 4^{ème} écluse de Lanaye pour un remplissage en mode dégradé d'une écluse aqueducs-larrons et d'approfondir les observations réalisées durant les précédents TFE cités dans ce travail. Pour permettre une meilleure visualisation, les objectifs ont été rappelés en gras et suivis de leurs conclusions respectives. Ce travail a permis de

- **Décrire et schématiser l'écoulement transversal dans le sas lors du remplissage**

L'étude des champs de vitesse mesurés sur le modèle réduit a permis de décrire et de schématiser le comportement de l'eau lors d'un remplissage en mode dégradé sans la présence du bateau dans le sas. Les mesures ont été réalisées sur une hauteur de 50 cm afin de suivre le comportement de l'eau lors du remplissage au-dessus des 27 cm du matelas d'eau et de permettre une description complète du phénomène giratoire.

L'évolution de l'effet giratoire avec la surface libre a pu ainsi être démontré. L'effet se décrit par un jet d'eau sortant de l'éjecteur fonctionnel. Il se produit sur toute la longueur du radier et remonte le long du bajoyer opposé. Il continue son développement au niveau de la surface libre en revenant vers le bajoyer de l'éjecteur fonctionnel et redescend le long de ce dernier créant l'effet giratoire. L'intégration des vitesses a permis d'identifier la hauteur du centre de gire $Z_d = 0,25 \cdot h$ et de calculer les débits. L'évolution des débits entre les quatre sections permet de confirmer l'effet giratoire.

Cette étude a permis aussi de vérifier l'analyse de M. Lenaerts et El Ouamari sur l'effet giratoire pour une hauteur de mesure de 25 cm et d'approfondir le développement de l'effet lors du remplissage jusqu'à une hauteur de 50 cm, afin de démontrer l'évolution du phénomène giratoire avec l'élévation de la surface libre et également de confirmer l'évolution des débits avec le phénomène giratoire.

Par ailleurs, l'analyse des mesures réalisées sur le modèle réel nous a permis de confirmer la création, le développement et la comparaison de l'intensité du phénomène giratoire entre le modèle réduit et le modèle réel. Il faut prendre en considération que les essais sur le modèle réduit ont été réalisés pour une largeur de 18 m contre 25 m pour l'écluse réelle et que le temps d'ouverture de vanne ne correspond pas, mais est toutefois comparable.

- **Décrire et schématiser l'écoulement transversal dans le sas en présence du bateau lors du remplissage.**

L'analyse des champs de vitesse mesurés sur le modèle réduit en présence du bateau en position centrale a permis de décrire et de schématiser le comportement de l'eau lors d'un remplissage en mode dégradé. Le dispositif de mesure a été installé autour du bateau et suit le bateau lors du sassement. L'évolution de l'effet giratoire ne suit plus la surface libre, comme lors du remplissage du sas sans le bateau, mais par contre évolue avec le fond du

bateau. En effet, le jet d'eau se sépare en deux lorsqu'il remonte le long du bajoyer opposé, une partie continue le long du bajoyer et une autre se poursuit en dessous du bateau et continue son développement pour aboutir à la création du phénomène giratoire.

L'intensité des champs de vitesse est identique entre le remplissage sans et avec le bateau pour des positions et comportement de vitesse comparable. Il faut prendre en considération que les essais sur le modèle réduit ont été réalisés pour une barge de gabarit Vb et pour une largeur de 18 m contre 25 m pour le modèle réel.

- **Comprendre, décrire et schématiser le roulis du bateau lors du remplissage. Comparer le sens de roulis avec les pentes d'eau.**

L'analyse du roulis mesuré à partir des capteurs à corde et de la pente d'eau en présence du bateau grâce aux mesures de pression différentielle le long du bajoyer a permis de décrire, schématiser et comparer le roulis et la pente d'eau. Nous avons une opposition des pentes : la pente d'eau est positive, le niveau gauche coté du bajoyer non fonctionnel est supérieur au côté droit du bajoyer de l'éjecteur fonctionnel tandis que la pente de roulis est négative. On suppose que cette inclinaison opposée est due en partie au jeu de pression qui s'exerce sur la carène du bateau et le phénomène giratoire. L'analyse des valeurs maximum, en absolu, donne pour la pente d'eau 3,5 ‰ et pour la pente de roulis 9,5 ‰. Le pente de roulis est presque 3 fois supérieure à la pente d'eau. Les maximum sont observés juste après l'ouverture complète de la vanne.

- **Décrire et schématiser les pressions agissant sur la carène lors d'un sassement.**

Pour décrire et schématiser les pressions agissant sur la carène, deux nouvelles méthodes de prises de mesures ont été développées. Une première mesurant la différence de pression entre les carènes tribord et bâbord à diverses positions le long de celles-ci, appelée cas carène. Une seconde mesurant la différence de pression entre une position de référence et diverses positions le long de la carène, nommée cas carène-référence.

Dans le cas carène, le comportement des pressions est semblable pour les quatre positions le long de la carène. L'intensité des pressions évolue avec leur profondeur, la pression la plus faible correspond à la position la plus proche de la surface libre. Les pressions augmentent en descendant le long de carène pour arriver à la position au niveau du fond du bateau où est mesurée la pression la plus élevée. Le maximum est atteint après l'ouverture complète de la vanne. Les courbes de pression différentielle sont positives, la pression sur le côté gauche du bajoyer non fonctionnel est supérieure à la pression du côté droit du bajoyer de l'éjecteur fonctionnel. Ce comportement des pressions concorde avec le comportement du phénomène giratoire, la pente d'eau et le roulis du bateau.

Le cas carène-référence permet d'analyser les pressions individuellement. Les pressions à gauche du bateau sont positives et semblables au cas carène,

l'intensité des pressions augmente avec la profondeur. Les pressions à droite et en dessous du bateau sont identiques et très faibles. Le maximum est toujours atteint après l'ouverture complète de la vanne. Les résultats coïncident avec le comportement des pressions du cas carène.

- **Approfondir et comparer l'influence de la taille des éjecteurs sur le comportement de l'écoulement transversal avec et sans bateau, ainsi que le roulis et le tangage du bateau et l'impact des pressions sur la carène.**

Toutes les mesures réalisées lors de la campagne de mesure ont également été réalisées pour un remplissage en mode dégradé avec l'éjecteur réduit afin de pouvoir comparer, décrire et schématiser l'influence de la taille des éjecteurs sur l'écoulement transversal.

Pour les champs de vitesse avec et sans bateau, la taille des éjecteurs n'influence pas le comportement global de l'eau, mais seulement l'intensité et la durée du phénomène giratoire. Pour les éjecteurs réduits, le phénomène s'amorce plutôt et s'atténue plus lentement.

Pour la pente d'eau et le roulis, la taille des éjecteurs n'influence pas le comportement global de l'eau mais seulement l'intensité. Le roulis maximum passe de 9,5 ‰ pour l'éjecteur de référence à 18,5 ‰ pour l'éjecteur réduit.

Pour les pressions différentielles, la taille des éjecteurs n'influence pas le comportement global de l'eau mais seulement l'intensité. Dans le cas carène, le comportement des pressions est semblable mais légèrement supérieur pour l'éjecteur réduit. Pour le cas carène-référence, le comportement des pressions à gauche et en dessous du bateau est semblable mais légèrement supérieur pour l'éjecteur réduit. Pour les pressions à droite du bateau, elles deviennent négatives.

Lors de la réalisation de ce travail, certaines interrogations sont apparues. Afin de continuer à améliorer la compréhension et l'étude des phénomènes hydrauliques lors d'un remplissage en mode dégradé d'une écluse à aqueducs-larrons, nous pouvons envisager les perspectives suivantes :

- Développer un modèle conceptuel sur les pressions et les champs de vitesse.
- Comparer les résultats du modèle réduit avec les résultats d'un modèle numérique.
- Réaliser une étude sur les champs de vitesse, les pentes d'eau, le roulis et les pressions pour un bateau de plus petit gabarit et en présence de plusieurs bateaux dans le sas et ce, afin d'étudier l'influence de leur taille et leur nombre sur les phénomènes hydrauliques et en finale, obtenir une analyse plus proche de la réalité de l'incident.
- Réaliser une étude en faisant varier le temps d'ouverture de vanne et en utilisant d'autres lois d'ouverture de vanne.
- Approfondir l'étude des comparaisons entre le modèle réduit et le modèle réel.

7 Bibliographie

Bousmar, D. Hydrocap 3 Automatisation des mesures sur modèle hydraulique. Rapport de stage, MET : Direction des Recherches Hydrauliques, 2008

Bousmar, D. *Cours LGCIV2013 : Hydraulic structures, bridges and roads*. École Polytechnique de Louvain, 2020

Cech, J. *Transport durable : larguez les amarres*. Renouvelles, 21 Mai 2015.

Christiaens, D. *Evaluation of the mooring forces on a vessel in a navigation lock. Draft version*. École Polytechnique de Louvain, 2015

Commission centrale pour la navigation du Rhin, *Rapport annuel : la navigation intérieure européenne observation du marché*. 2017

Conférence Européenne des Ministres des Transport, *Annexe 4.6-1 Classes CEMT*.

Deltares, *P-EMS programmable electromagnetic liquid velocity meter*.

Direction des Recherches Hydrauliques. *Nouvelle écluse d'Ivoz-Ramet, Mesures hydrauliques in situ préalable à la mise en service*. Rapport final. MOD.045. Juin 2016

Direction des Recherches Hydrauliques. *Quatrième écluse de Lanaye, Mesures hydraulique in situ*. Rapport final. MOD.019/ 6. Mars 2016

Direction des Recherches Hydrauliques. *Quatrième écluse de Lanaye, Mesures hydraulique in situ*. Rapport final - Annexes. Mars 2016

Direction des Recherches Hydrauliques. *Vidéo de surveillance de la quatrième écluse de Lanaye*. 13 Juin 2016

El Ouamari, I., Lenaerts, M. *Travail de fin d'étude : Efforts d'amarrage transversaux lors du remplissage en mode dégradé d'une écluse à aqueducs-larrons*. École Polytechnique de Louvain, 2019

Heinz, T. *Travail de fin d'étude : Efforts d'amarrage lors du remplissage d'une écluse : Comparaison entre une alimentation par contournement des têtes et par aqueducs larrons*. École Polytechnique de Louvain, 2013

Margotteaux, R. *Travail de fin d'étude : Efforts d'amarrage dans un sas d'écluse : évaluation expérimentale*. École Polytechnique de Louvain, 2014

Langendries, R. *Inaugurations of the 4th Lanaye lock and liège Trilogiport*. Société Wallonne de Financement Complémentaire des Infrastructures, 13 Novembre 2015

Larousse, *Encyclopédie*. <https://www.larousse.fr/encyclopedia>, Septembre 2020

PIANC. Rapport final de la commission internationale pour l'étude des écluses. PIANC, Bruxelles, Belgique, 1986.

PIANC. *Ship behavior in locks and lock approaches*. Report 155, 2015.

PIANC. Informations générales. <https://www.pianc-aipcn.be> , Septembre 2020

Prevot, M. Communiqué de presse : Inauguration de Trilogiport et de la 4^{ème} écluse de Lanaye. Gouvernement Wallon, 13 Novembre 2015.

Reding, P-A. *Travail de fin d'étude : Efforts d'amarrage dans un sas d'écluse : évaluation expérimentale*. École Polytechnique de Louvain, 2013;

Savary, C., Bousmar, D., Swartenbroekx, C. *Hydraulic measurement as support to lock commissioning: the experience of Ivoz-Ramet and Lanaye locks, Belgium*. Service public de Wallonie mobilité voies hydrauliques. Mai 2013

Service Public de Wallonie, *Voies navigables : Les infos et Intermodalité*. 2017

Société Wallonne de Financement Complémentaire des Infrastructures, *Quatrième écluse de Lanaye, : Études d'incidence sur l'environnement – Résumé non technique*. SOFICO, Septembre 2008

Société Wallonne de Financement Complémentaire des Infrastructures, *Rapport de gestion*. SOFICO, 2013

Technologies Collège Saint-Louis, *Comment fonctionne une écluse ?*. <https://technosl.jimdofree.com/4-ème/s1-comment-fonctionne-une-ecluse/>, Septembre 2020.

Tourret, P. *Le transport fluvial en France une solution logistique d'avenir ?*, Institut Supérieur d'économie maritime Nantes – Saint Nazaire, Septembre 2019

Voies Navigables de France, *Guide pratique : Intégrer un maillon fluvial dans la logistique des appels d'offres de grands chantiers publics*.

Voies Navigables de France, *Le gabarit des ouvrages*. <https://www.sudouest.vnf.fr> , 18 juillet 2018.

Von W. H. Hager, *Flow Conditions in Pipe and Channel Enlargements*, 1990.

Wikipédia, *L'encyclopédie libre*. <https://www.wikipedia.org>, Septembre 2020

YOKOGAWA. *Instrument, EJA110E Differential Pressure Transmitter*. Juin 2019

8 Table des figures

Figure 2-1 : Comparaison économique et écologique des moyens de transport (Cech, 2015).....	8
Figure 2-2 : Comparaison des nuisances sur les moyens de transport (Tourret, 2019).....	9
Figure 2-3 : Carte du Trans-European Transport (Service Public de Wallonie, 2017)	10
Figure 2-4 : Caractéristiques des bateaux de classe CEMT (Conférence Européenne des Ministres des Transport)	11
Figure 2-5 : Illustration - Principaux types de bateaux de classe CEMT (Conférence Européenne des Ministres des Transport)	11
Figure 2-6 : Coupe – Représentation d'une écluse (Technologie Collège Saint-Louis, 2013)	12
Figure 2-7 : Les différents tirants d'un bateau (PIANC, 2020).....	13
Figure 2-8 : Plan d'une écluse type (Christiaens, 2015).....	14
Figure 2-9 : Coupe d'une écluse type (Christiaens, 2015).....	14
Figure 2-10 : Déroulement du passage du bief amont au bief aval (Larousse, 2020).....	15
Figure 2-11 : Plan écluse - Alimentation par ouverture de portes (Christiaens, 2015)	16
Figure 2-12 : Plan écluse - Alimentation par ventelles (Christiaens, 2015)	17
Figure 2-13 : Image écluse - Alimentation par ventelles (Bousmar, 2020).....	17
Figure 2-14 : Plan écluse - Alimentation par contournement des têtes (Christiaens, 2015).....	17
Figure 2-15 : Plan écluse - Alimentation par aqueducs-larons (bajoyers) (Christiaens, 2015)	18
Figure 2-16 : Image écluse - Alimentation par aqueducs-larons (Bousmar, 2020)	18
Figure 2-17 : Plan écluse - Alimentation par équi-répartition du débit (radier)(Christiaens, 2015).....	19
Figure 2-18 : Image écluse - Alimentation par le radier (Bousmar, 2020)	19
Figure 2-19 : Coupe - Remplissage symétrique (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)	20
Figure 2-20 : Plan - Écluse par aqueducs-larons en mode dégradé (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013).....	20
Figure 2-21 : Coupe- Remplissage dégradé (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013).....	20
Figure 2-22 : Configuration d'un bateau amarré dans le sas d'une écluse (Christiaens, 2015)	22
Figure 2-23 : Plan écluse - Directions.....	23
Figure 2-24 : Vue aérienne du complexe éclusier de Lanaye (Langendries, 2015)	24
Figure 2-25 : Carte de la navigation fluviale en Wallonie et localisation de Lanaye (Langendries, 2020)	25
Figure 2-26 : Plan écluse type - système d'alimentation par aqueducs-larons (Christiaens, 2015)	25
Figure 2-27 : Vanne papillon de la 4 ^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013) 25	25
Figure 2-28 : Pente d'eau en mode dégradé de la 4 ^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013).....	26
Figure 2-29 : Loi d'ouverture A de la 4 ^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013)	26
Figure 2-30 : Pente de la surface libre (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013).....	27
Figure 2-31 : Situation initiale avant bassinnet à la 4 ^{ème} écluse de Lanaye (El Ouamari et Lenaerts, 2019)	27
Figure 2-32 : Situation durant la bassinnet à la 4 ^{ème} écluse de Lanaye (El Ouamari et Lenaerts, 2019)	28
Figure 2-33 : Situation critique durant la bassinnet à la 4 ^{ème} écluse de Lanaye (El Ouamari et Lenaerts, 2019).....	29
Figure 2-34 : Pente d'eau en mode dégradé de la 4 ^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013).....	29
Figure 2-35 : Loi d'ouverture A et B de la 4 ^{ème} écluse de Lanaye (Savary, Bousmar, Swartenbroekx, 2013).....	29
Figure 3-1 : Convention de singe (Christiaens, 2015)	32
Figure 3-2 : Force hydrostatique F_{hs} (Christiaens, 2015)	33
Figure 3-3 : Diminution de la quantité de mouvement F_{dim} (Christiaens, 2015)	33
Figure 3-4 : Force de frottement F_f (Christiaens, 2015)	33
Figure 3-5 : Force des jets d'eau F_j (Christiaens, 2015)	34
Figure 3-6 : Force due à la différence de densité F_{dd} (Christiaens, 2015)	34
Figure 3-7 : Les différentes composantes de l'effort d'amarrage (Christiaens, 2015)	34
Figure 3-8 : Convention de singe – Transversale	35
Figure 3-9 : Force hydrostatique F_{hs}	35
Figure 3-10 : Diminution de la quantité de mouvement F_{dim}	36
Figure 3-11 : Force des jets d'eau F_j	36

Figure 3-12 : Force hydrostatique - pente d'eau (Margotteaux, 2014)	37
Figure 3-13 : Les mouvements de rotation d'un bateau (Wikipédia,2020)	38
Figure 3-14 : Étude du roulis - situation à l'équilibre et en déséquilibre (Margotteaux, 2014)	39
Figure 3-15 : Configuration d'amarrage d'un bateau de navigation intérieure (Christiaens, 2015)	39
Figure 4-1 : Hall d'essais de la Direction des Recherches Hydrauliques- Vue intérieur (Bousmar, 2008)	43
Figure 4-2 : Représentation (3D) d'une écluse avec un système d'alimentation par aqueducs et larrons (Margotteaux, 2014)	44
Figure 4-3 : Vue amont du sas	47
Figure 4-4 : Vue aval du sas	47
Figure 4-5 : Modèle réduit - Plan simplifié	47
Figure 4-6 : Modèle réduit - Coupe simplifiée	48
Figure 4-7 : Bateau à sec – vue bâbord	49
Figure 4-8 : Bateau mis à l'eau dans le sas	49
Figure 4-9 : Proue du bateau	49
Figure 4-10 : Poupe du bateau	49
Figure 4-11 : Système d'amarrage – Axes verticaux	50
Figure 4-12 : Système d'amarrage - Portique et contrepoids	50
Figure 4-13 : Système d'amarrage – Plateau (Margotteaux, 2014)	51
Figure 4-14 : Configuration amarre élastique et avec jeu (El Ouamari et Lenaerts, 2019)	51
Figure 4-15 : Configuration amarre rigide et sans jeu (El Ouamari et Lenaerts, 2019)	51
Figure 4-16 : Système d'amarrage amont – Vue du haut	52
Figure 4-17 : Système d'amarrage amont – Vue en perspective	52
Figure 4-18 : Système d'amarrage aval – Vue du haut	52
Figure 4-19 : Système d'amarrage aval – Vue en perspective	52
Figure 4-20 : Aqueduc	53
Figure 4-21 : Servo-vanne	53
Figure 4-22 : Boîtier de contrôle des servo-vannes	53
Figure 4-23 : Éjecteur de référence (EL Ouamari et Lenaerts, 2019)	54
Figure 4-24 : Éjecteur réduit (EL Ouamari et Lenaerts, 2019)	54
Figure 4-25 : Plan modèle réduit - Dispositifs de mesure	55
Figure 4-26 : Relation linéaire entre grandeur physique et signal de mesure (Bousmar, 2008)	56
Figure 4-27 : Conditionneur	56
Figure 4-28 : Carte d'acquisition	56
Figure 4-29 : Logiciel Hydrocap 3 : interface utilisateur (Bousmar, 2008)	56
Figure 4-30 : Capteur de niveau à ultrasons Baumer	57
Figure 4-31 : Capteur Baumer sur son support	57
Figure 4-32 : Description du fonctionnement du capteur de pression différentielle [13]	58
Figure 4-33 : Capteur de pression différentielle YOGOGAWA	58
Figure 4-34 : Tube droit à ouverture sur les cotés	59
Figure 4-35 : Zoom sur les ouvertures (tube droit)	59
Figure 4-36 : Tube coudé à ouverture sur les cotés	59
Figure 4-37 : Zoom sur les ouvertures (tube coudé)	59
Figure 4-38 : Capteur de position à corde ASM WS10SG	59
Figure 4-39 : Capteur de position à corde sur son support	59
Figure 4-40 : Sonde de vitesse électromagnétique PEMS	60
Figure 4-41 : Tête de la sonde PEMS	60
Figure 4-42 : Lois d'ouverture des vannes (Bousmar, 2020)	62
Figure 4-43 : Loi d'ouverture avec $T_0 = 30$ s	62
Figure 4-44 : Maillage - Prises de mesure de vitesse sans bateau - Nomenclature	65
Figure 4-45 : Maillage - Prises de mesure de pression - Nomenclature	66
Figure 4-46 : Plan modèle réduit - Prises de vitesse sans bateau	67
Figure 4-47 : Coupe Maillage - Prises de vitesses sans le bateau	67
Figure 4-48 : Modèle réduit avec sonde de vitesse	68
Figure 4-49 : Modèle réduit avec sonde de vitesse - Zoom	68
Figure 4-50 : Plan modèle réduit - Prises de vitesses avec bateau	69
Figure 4-51 : Coupe Maillage - Prises de vitesse avec bateau	69
Figure 4-52 : modèle réduit avec sonde de vitesse et bateau	70
Figure 4-53 : Sonde de vitesse sur bateau - Mesure en-dessous	70
Figure 4-54 : Sonde de vitesse sur bateau - Mesure latérale	70

Figure 4-55 : Plan modèle réduit - Prises de pression avec bateau	71
Figure 4-56 : Coupe Maillage - Prises de pression avec bateau - Cas Carène ($P_{diff} - 1$)	72
Figure 4-57 : Image modèle réduit - Prises de pression avec bateau – Cas Carène ($P_{diff} - 1$).....	72
Figure 4-58 : Coupe Maillage - Prises de pression avec bateau - Cas Bajoyer ($P_{diff} - 2$).....	73
Figure 4-59 : Image modèle réduit - Prises de pression avec bateau - Cas Bajoyer ($P_{diff} - 2$)	73
Figure 4-60 : Coupe Maillage - Prises de pression avec bateau - Cas Carène-Référence ($P_{diff} - 3$)	74
Figure 4-61 : Image modèle réduit - Prises de pression contre la carène du bateau - Cas Carène-Référence ($P_{diff} - 3$).....	74
Figure 4-62 : Image modèle réduit - Prises de pression à la position de référence - Cas Carène-Référence ($P_{diff} - 3$)	74
Figure 4-63 : Plan modèle réduit - Prises de roulis du bateau.....	76
Figure 4-64 : Prises de roulis.....	76
Figure 5-1 : Coupe transversale - Remplissage en mode dégradé (El Ouamari et Lenaerts, 2019)....	77
Figure 5-2 : Convention de signes (El Ouamari et Lenaerts, 2019)	78
Figure 5-3 : Répétabilité des essais - Comparaison des vitesses (données lissées).....	79
Figure 5-4 : Remplissage – Hydrogramme et limnigramme (El Ouamari et Lenaerts, 2019).....	80
Figure 5-5 : Remplissage – Hydrogrammes et limnigrammes – Comparaison entre éjecteurs de référence et réduit (El Ouamari et Lenaerts, 2019)	80
Figure 5-6 : Remplissage - Hydrogramme adapté aux éjecteurs réduits (El Ouamari et Lenaerts, 2019)	81
Figure 5-7 : Facteur de l'homothétie des champs de vitesses (El Ouamari et Lenaerts, 2019)	81
Figure 5-8 : Coupe transversale maillage - Prises de vitesse sans bateau	82
Figure 5-9 : Coupe transversale maillage - Prises de vitesse avec bateau	82
Figure 5-10 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence – Évolution	83
Figure 5-11 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence - 20s après ouverture	84
Figure 5-12 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence - 30s après ouverture	84
Figure 5-13 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence - 60s après ouverture	85
Figure 5-14 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence - 90s après ouverture	85
Figure 5-15 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 20s après ouverture	87
Figure 5-16 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 30s après ouverture	87
Figure 5-17 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 60s après ouverture	88
Figure 5-18 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 90s après ouverture	88
Figure 5-19 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau – Évolution.....	89
Figure 5-20 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 20 s après l'ouverture	90
Figure 5-21 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 30 s après l'ouverture	90
Figure 5-22 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 40 s après l'ouverture	91
Figure 5-23 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 60 s après l'ouverture	91
Figure 5-24 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau - 90 s après l'ouverture	92
Figure 5-25 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 20 s après l'ouverture	94
Figure 5-26 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 30 s après l'ouverture	94
Figure 5-27 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 40 s après l'ouverture	95
Figure 5-28 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 60 s après l'ouverture	95
Figure 5-29 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec et sans bateau - 90 s après l'ouverture	96
Figure 5-30 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau - 20 s après l'ouverture	98
Figure 5-31 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau – 30 s après l'ouverture	98
Figure 5-32 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau - 40 s après l'ouverture	99

Figure 5-33 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau - 60 s après l'ouverture	99
Figure 5-34 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit avec bateau - 90 s après l'ouverture	100
Figure 5-35 : Débits Q1 à Q4 calculés au travers des sections correspondantes (El Oumari et Lenaerts, 2019).....	101
Figure 5-36 : Section d'intégration relative au débit Q1 (El Oumari et Lenaerts, 2019)	102
Figure 5-37 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence et réduit - 30s après ouverture ..	103
Figure 5-38 : Profil de vitesses transversales - Au droit de l'éjecteur de référence.....	104
Figure 5-39 : Profil de vitesses transversales - Au droit de l'éjecteur réduit.....	104
Figure 5-40 : Débit calculé par intégration des vitesses - Au droit de l'éjecteur de référence	105
Figure 5-41 : Débit calculé par intégration des vitesses - Au droit de l'éjecteur réduit	106
Figure 5-42 : Pente de roulis amont et aval - Éjecteur de référence	107
Figure 5-43 : Pente de roulis moyen - Éjecteur de référence	108
Figure 5-44 : Pente d'eau avec barge – Éjecteur de référence	109
Figure 5-45 : Comparaison - Pente d'eau et Pente de roulis - Éjecteur de référence	109
Figure 5-46 : Coupe remplissage dégradé - Ancienne représentation (Savary, Bousmar., Swartenbroekx, 2013).....	110
Figure 5-47 : Coupe remplissage dégradé - Nouvelle représentation (avant 60s)	110
Figure 5-48 : Comparaison entre force d'amarrage transversale, pente d'eau avec barge et roulis - Éjecteur de référence	111
Figure 5-49 : Comparaison - Pente de roulis entre éjecteur de référence et réduit.....	112
Figure 5-50 : Coupe Maillage illustrée - Prises de pression avec bateau - Cas Carène	113
Figure 5-51 : Pression différentielle - Cas carène - Éjecteur de référence	114
Figure 5-52 : Illustration des pressions appliqué sur la carène - Cas carène.....	114
Figure 5-53 : Pression différentielle - Cas carène - Éjecteur réduit.....	115
Figure 5-54 : Comparaison entre force résultant des pressions, force d'amarrage transversale, pente d'eau avec barge et roulis - Éjecteur de référence	116
Figure 5-55 : Coupe Maillage illustrée - Prises de pression avec bateau - Cas Carène-Référence ..	116
Figure 5-56 : Pression différentielle à gauche - Cas carène-référence - Éjecteur de référence.....	117
Figure 5-57 : Pression différentielle à droite - Cas carène-référence - Éjecteur de référence	118
Figure 5-58 : Illustration des pression appliquées sur la carène - Cas carène-référence	118
Figure 5-59 : Pression différentielle à gauche - Cas carène-référence - Éjecteur réduit.....	119
Figure 5-60 : Pression différentielle à droite - Cas carène-référence - Éjecteur réduit.....	119
Figure 5-61 : Sonde ADCP (Direction des Recherches Hydrauliques, 2016)	120
Figure 5-62 : Sonde ADCP dans le sas (Service Public de Wallonie, 2017).....	121
Figure 5-63 : Loi d'ouverture A - Remplissage mode dégradé RDA (Service Public de Wallonie, 2016)	121
Figure 5-64 : Hydrogramme et limnigramme pour RDA (Service Public de Wallonie, 2016)	121
Figure 5-65 : Champ de vitesses - RDA - 2 min après l'ouverture	122
Figure 5-66 : Champ de vitesses - RDA - 5 min après l'ouverture	123
Figure 5-67 : Champ de vitesses - RDA - 10 min après l'ouverture	123
Figure 5-68 : Synthèse – Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence sans bateau – Évolution	124
Figure 5-69 : Synthèse – Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de référence avec bateau – Évolution	124
Figure 5-70 : Synthèse – Pente d'eau avec barge et pente de roulis au droit de l'éjecteur de référence	125
Figure 5-71 : Synthèse - Coupe remplissage dégradé - Nouvelle représentation.....	125
Figure 5-72 : Synthèse - Pressions différentielles - Cas carène - Éjecteur de référence	125
Figure 5-73 : Synthèse - Illustration des pressions appliqués sur la carène - Cas carène.....	125
Figure 5-74 : Synthèse - Pressions différentielles à gauche - Cas carène-référence - Éjecteur de référence.....	126
Figure 5-75 : Synthèse - Illustration des pressions appliqués sur la carène - Cas carène-référence	126
Figure 5-76 : Synthèse - Pressions différentielles à droite - Cas carène-référence - Éjecteur de référence.....	126
Figure 5-77 : Synthèse - Illustration des phénomènes lors d'un sassement	126
Figure 10-1 : Plan modèle réduit – Plan générale	138
Figure 10-2 : Plan Modèle réduit – Coupe	139
Figure 10-3 : Sonde de référence	141

Figure 10-4 : Sonde coude - mesure en x	141
Figure 10-5 : Sonde coude - mesure en y	141
Figure 10-6 : Sonde droite – mesure en x	142
Figure 10-7 : Sonde droite - mesure en y	142
Figure 10-8 : Dispositif 1 - Sonde coudée	156
Figure 10-9 : Dispositif 2 - Sonde droite	156
Figure 10-10 : Comparaison - Influence des dispositif sur la mesure des vitesses	156
Figure 10-11 : Test de dispositif de la mesure de pression différentielle – p1 (El Ouamari et Lenaerts, 2019).....	157
Figure 10-12 :Test de dispositif de la mesure de pression différentielle – p2 (El Ouamari et Lenaerts, 2019).....	158
Figure 10-13 :Test de dispositif de la mesure de pression différentielle – p3 (El Ouamari et Lenaerts, 2019).....	159
Figure 10-14 : Test de dispositif de la mesure de pression différentielle – p4 (El Ouamari et Lenaerts, 2019).....	160
Figure 10-15 : Test de dispositif de la mesure de pression différentielle – p5 (El Ouamari et Lenaerts, 2019).....	161
Figure 10-16 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit - 30 s après l'ouverture.....	162
Figure 10-17 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit - 60 s après l'ouverture.....	162
Figure 10-18 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit - 90 s après l'ouverture.....	163
Figure 10-19 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 20 s après l'ouverture ..	163
Figure 10-20 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 30 s après l'ouverture ..	164
Figure 10-21 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 40 s après l'ouverture ..	164
Figure 10-22 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 60 s après l'ouverture ..	164
Figure 10-23 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 90 s après l'ouverture ..	165
Figure 10-24 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec et sans bateau - 20 s après l'ouverture	165
Figure 10-25 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec et sans bateau - 30 s après l'ouverture	166
Figure 10-26 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de réduit avec et sans bateau - 40 s après l'ouverture	166
Figure 10-27 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec et sans bateau - 60 s après l'ouverture	166
Figure 10-28 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec et sans bateau - 90 s après l'ouverture	167

9 Liste des tableaux

Tableau 3-1 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - projets récents SPW (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015).....	41
Tableau 3-2 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - Pays-Bas (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015).....	41
Tableau 3-3 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - Allemagne (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015).....	41
Tableau 3-4 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - Chine (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015).....	41
Tableau 3-5 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux - projets récents SPW (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015).....	42
Tableau 3-6 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage transversaux - Allemagne (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015).....	42
Tableau 3-7 : Critère de sécurité : efforts d'amarrage transversaux – Chine (El Ouamari et Lenaerts, 2019 ; PIANC, 2015).....	42
Tableau 4-1 : Relation de similitude - Valeur échelle réduit	46
Tableau 4-2 : Dimensions principales du modèle réduit.....	48
Tableau 4-3 : Protocole de mesure	63
Tableau 5-1 : Remplissage – Comparaison entre le mode dégradé et le mode normal (El Ouamari et Lenaerts, 2019).....	80

10 Annexes

10.1 Plan modèle réduit

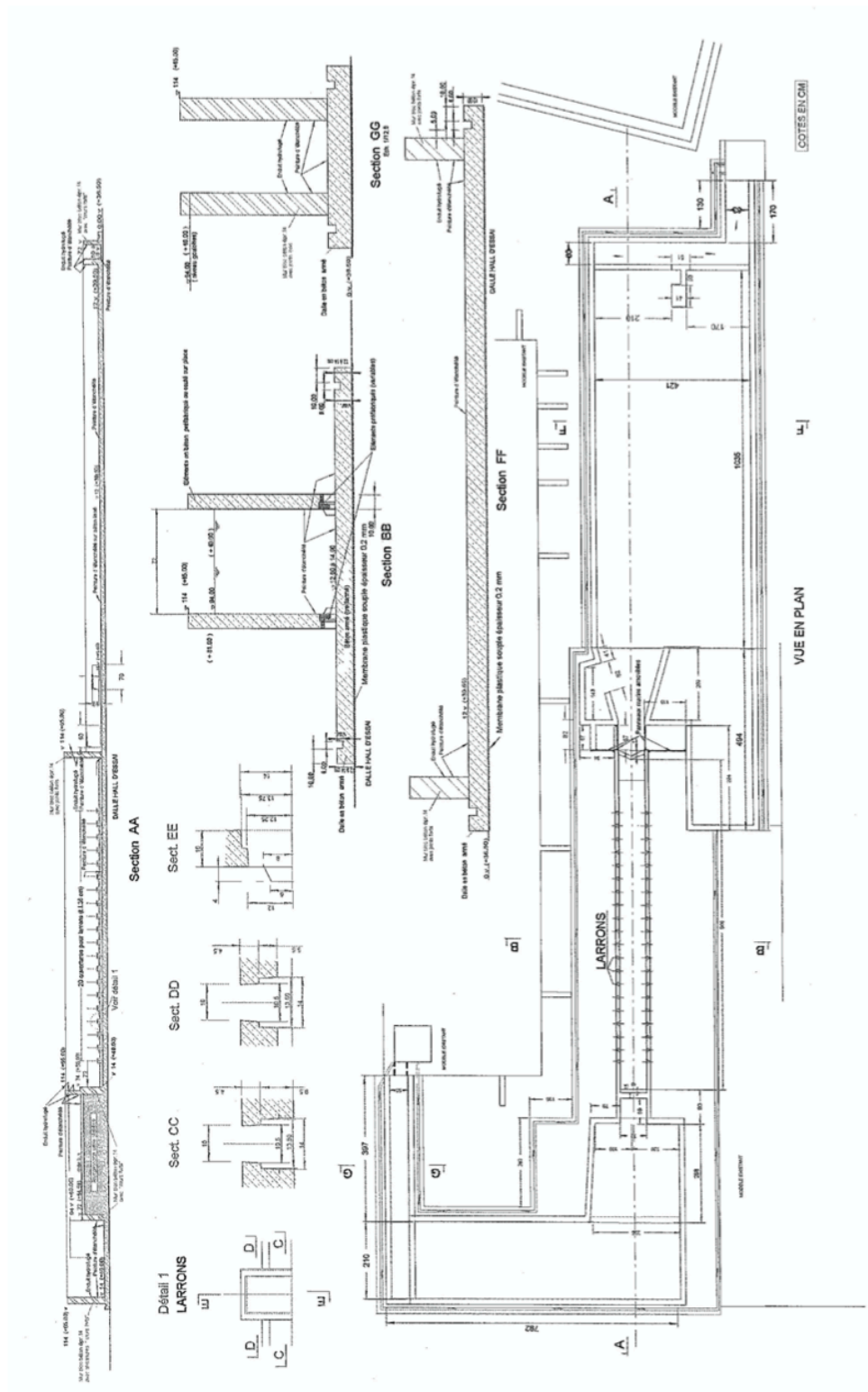


Figure 10-1 : Plan modèle réduit – Plan générale

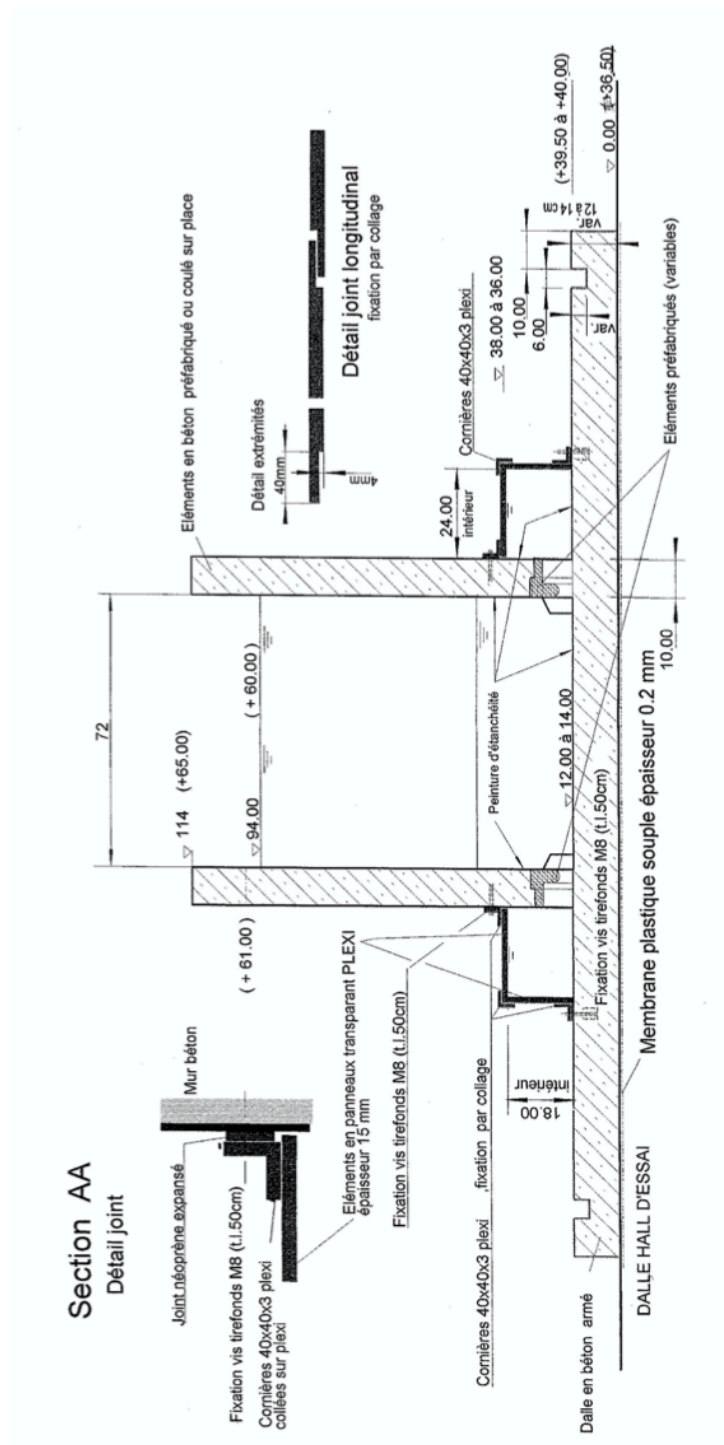


Figure 10-2 : Plan Modèle réduit – Coupe

10.2 Test sonde de vitesse électromagnétique

10.2.1 Introduction

Le test des sondes de vitesse a pour but de vérifier la précision des mesures données par les sondes testées et de les comparer par rapport à une sonde de référence afin de confirmer que les sondes sont utilisables.

Voici la liste des sondes testées :

Sonde coude : E537, E538, E539, E540 et E541

Sonde droite : E530, E531, E532, E533, E534 et E535

Et la sonde de référence E646

Remarque :

La sonde coude E536 n'a pas pu être testée car impossible à calibrer avec le conditionneur.

Note :

La sonde coude peut aussi être appelée sonde coudée.

10.2.2 Méthode

Pour chaque essai de mesure, la même procédure a été suivie.

Voici la procédure-:

1. Mise en place de la sonde sur le support du canal vitré.
2. Mise au zéro électronique de la sonde (avec seau d'eau).
3. Lancer le "Start measuring" sur le conditionneur.
4. Lancer le programme Hydrocap sur l'ordinateur.
5. Mettre en place le canal vitré selon les paramètres prédéfinis
 $Q = 50 \text{ [l/s]}$, Distance chariot = 7 [m] , hauteur d'eau = 490 [mm] .
6. Lancer l'enregistrement sur Hydrocap.
7. Répéter l'enregistrement après avoir modifié la hauteur de la sonde.

Un essai correspond à 3 enregistrements de mesure pour une sonde. L'essai a été réalisé pour des hauteurs de sonde de 20,30 et 40 cm. Chaque essai a été réalisé 3 fois. Soit au total 9 mesures de vitesse par sonde.

Pour la comparaison avec les sondes testées, nous devons seulement avoir des mesures pertinentes dans le sens de l'axe d'écoulement du canal vitré. Nous mesurons selon x pour la sonde de référence.

Pour les sondes droites et coudes, nous allons adapter le dispositif afin de vérifier l'exactitude des mesures en x et y.

Voici les 5 dispositifs utilisés pour mesurer les vitesses :

- Dispositif de la sonde de référence E646



Figure 10-3 : Sonde de référence

La pose de la sonde correspond au dispositif standard du canal vitré.

- Dispositif de la sonde coude

mesure en X



Figure 10-4 : Sonde coude - mesure en x

mesure en Y



Figure 10-5 : Sonde coude - mesure en y

Pour la mise en place en x , il a fallu déplacer le socle qui repose sur le rail de la planche vers la gauche afin d'avoir la rondelle de capteur noir au centre du canal vitré (voir la Figure 10-4).

Pour la mise en place en y, il a fallu réaliser un montage afin d'avoir la sonde horizontale et donc les capteurs de la sonde en y dans le sens de l'axe d'écoulement du canal vitré (voir la Figure 10-5).

- Dispositif de la sonde droite

mesure en X



Figure 10-6 : Sonde droite – mesure en x

mesure en Y



Figure 10-7 : Sonde droite - mesure en y

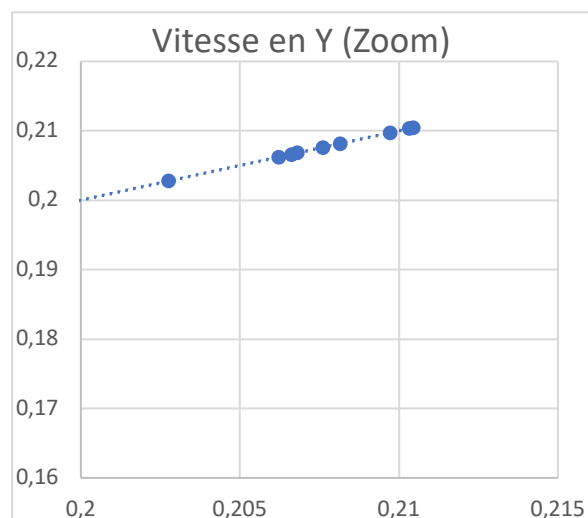
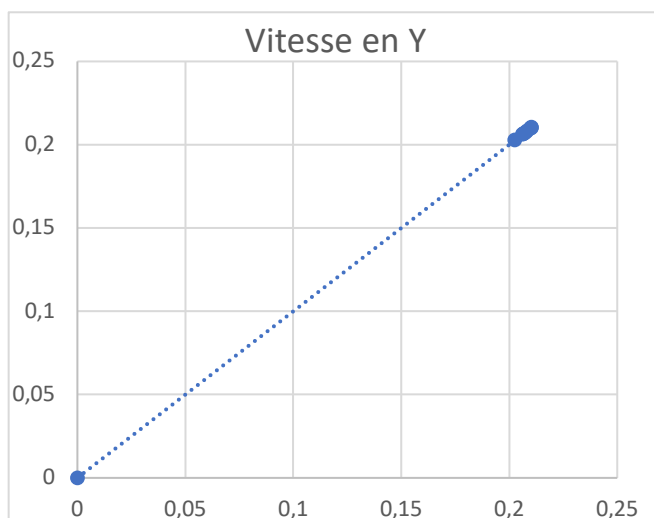
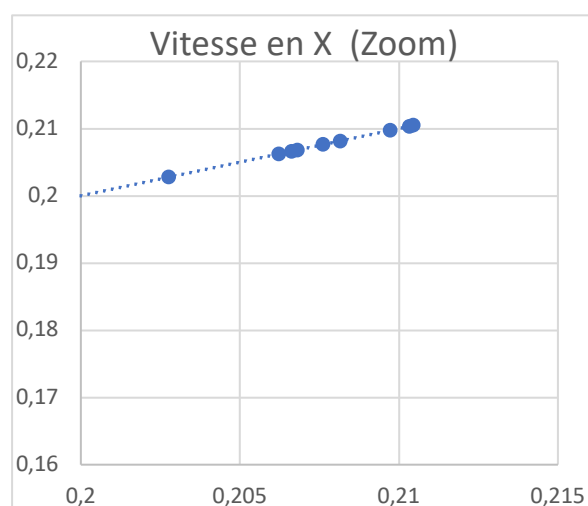
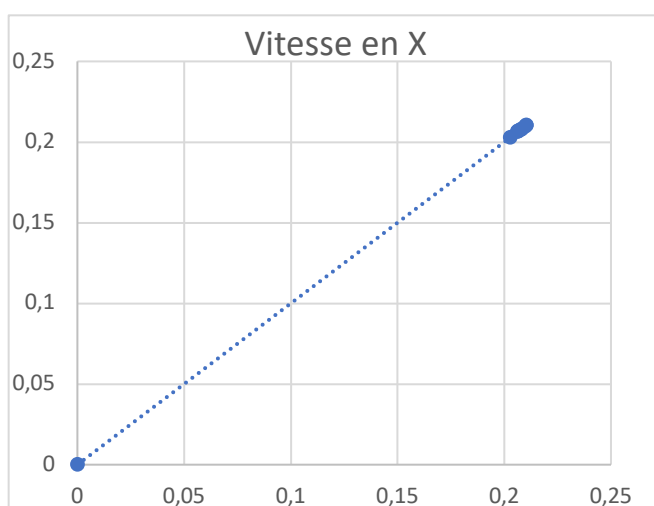
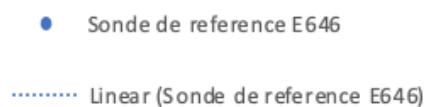
Pour la mise en place en x, nous sommes dans le cas du dispositif standard du canal vitré.

Pour la mise en place en y, il a fallu rajouter un rail entre le rail initial et la plaque permettant de tenir la sonde afin de laisser de la place pour le boîtier de la sonde.

10.2.3 Résultats

10.2.3.1 Sonde de référence E646

Sonde de reference E646		
h_sonde [cm]	v_ref	
	v_x [m/s]	ecart
0	0	
20	0,208142	0,011711
30	0,209728	0,010439
40	0,207614	0,015841
20	0,206804	0,013024
30	0,202744	0,013774
40	0,206207	0,016807
20	0,21045	0,01371
30	0,210317	0,011565
40	0,206611	0,013729

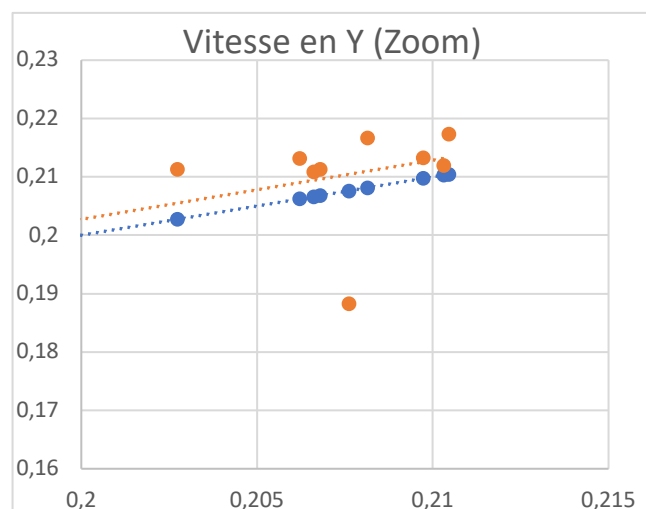
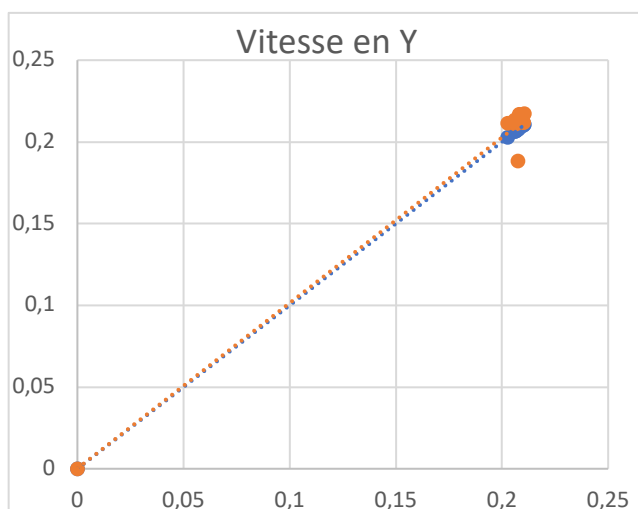
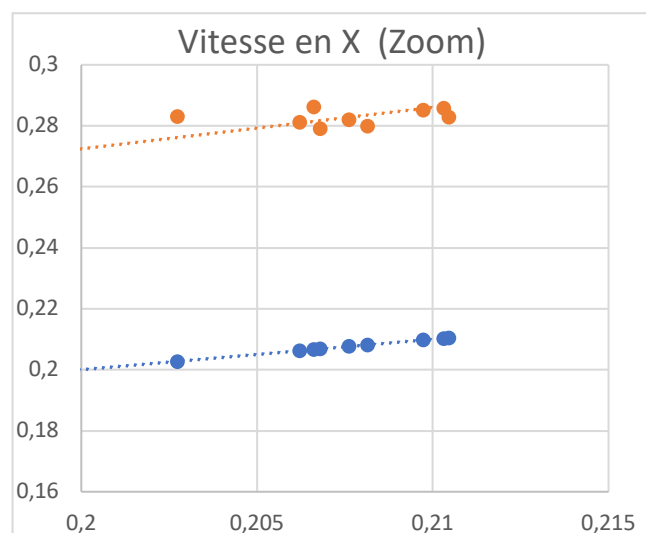
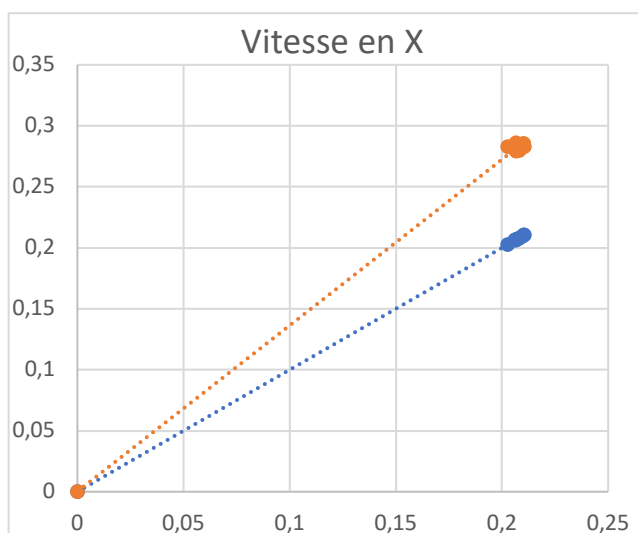


On observe que les valeurs mesurées suivent une évolution linéaire. Ce qui confirme notre choix de l'utiliser comme sonde de référence.

10.2.4 Sonde coude

10.2.4.1 S.C E537

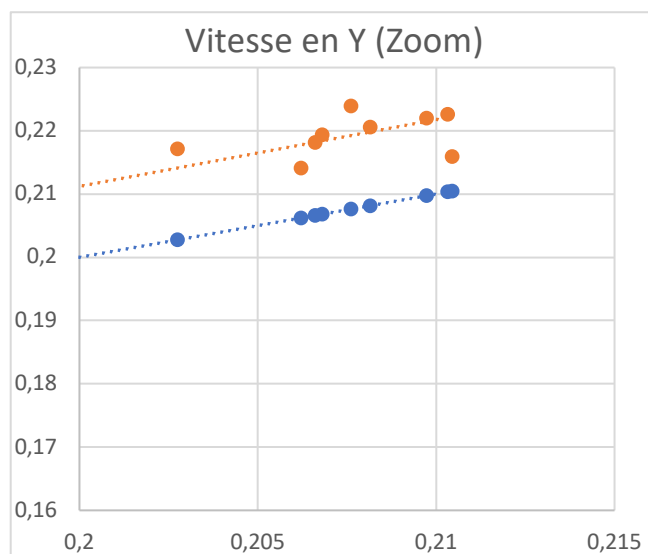
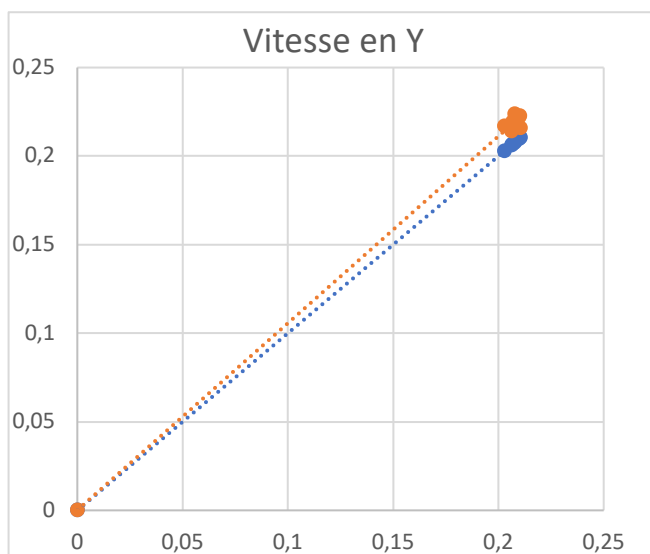
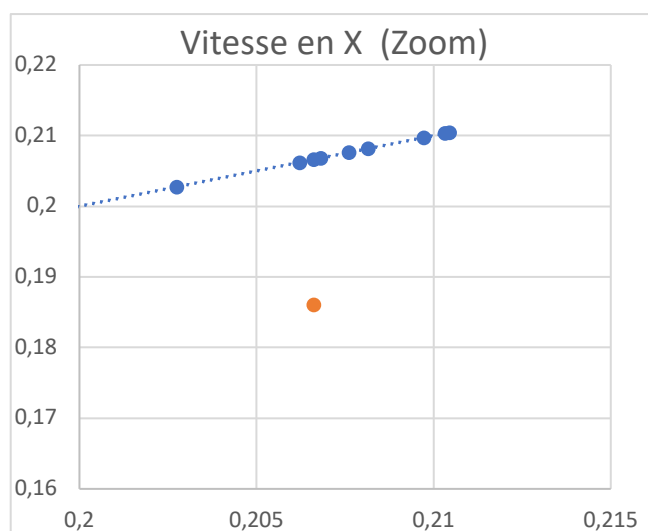
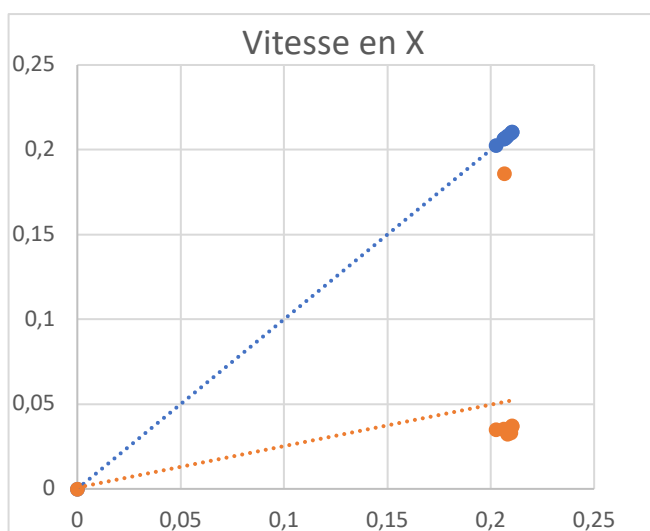
	Sonde de reference E646		Sonde coude E537				Comparaison entre v_ref et v_sonde_testé	
	v_ref		En X		En Y			
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,279956	0,009457	0,216674	0,012151	35%	4%
30	0,209728	0,010439	0,285231	0,013735	0,213279	0,012241	36%	2%
40	0,207614	0,015841	0,282028	0,01754	0,188284	0,005466	36%	9%
20	0,206804	0,013024	0,279034	0,01051	0,211303	0,014955	35%	2%
30	0,202744	0,013774	0,283097	0,014483	0,211333	0,012135	40%	4%
40	0,206207	0,016807	0,281149	0,019623	0,213147	0,011862	36%	3%
20	0,21045	0,01371	0,282939	0,011721	0,217306	0,014217	34%	3%
30	0,210317	0,011565	0,285729	0,012388	0,211941	0,010468	36%	1%
40	0,206611	0,013729	0,286221	0,014643	0,210849	0,014321	39%	2%
						Max	40%	9%
						Moy	36%	3%



- Sonde de reference E646
- Sonde coude E537
- Linear (Sonde de reference E646)
- Linear (Sonde coude E537)

10.2.4.2 S.C E538

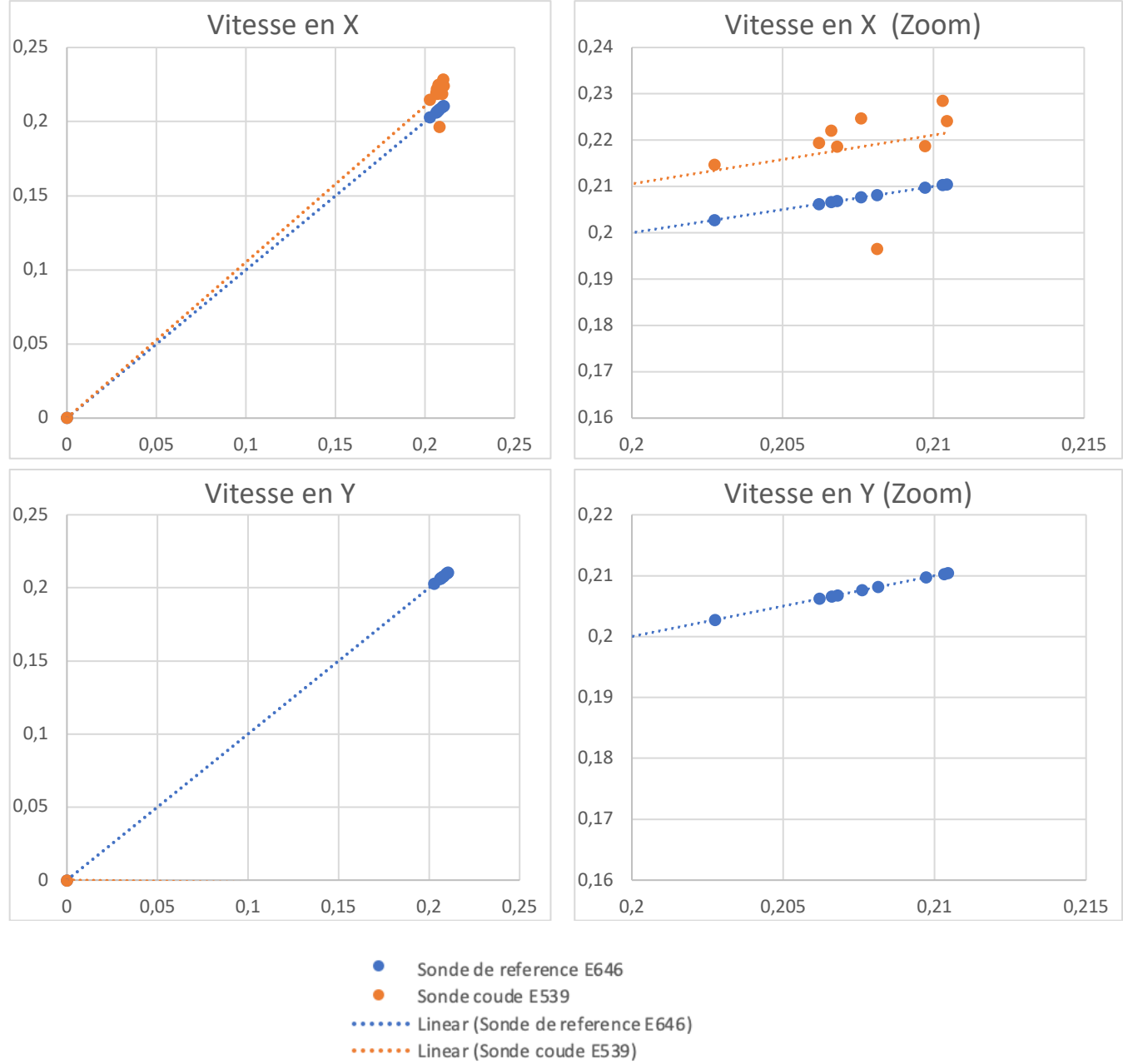
	Sonde de reference E646		Sonde coude E538				Comparaison entre v_ref et v_sonde_testé	
	v_ref		En X		En Y			
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,032332	0,000383	0,220521	0,010884	84%	6%
30	0,209728	0,010439	0,033003	0,000408	0,221926	0,011165	84%	6%
40	0,207614	0,015841	0,033718	0,000371	0,223912	0,012016	84%	8%
20	0,206804	0,013024	0,034816	0,00035	0,219333	0,013545	83%	6%
30	0,202744	0,013774	0,03511	0,000276	0,217064	0,014372	83%	7%
40	0,206207	0,016807	0,035498	0,000308	0,214078	0,014374	83%	4%
20	0,21045	0,01371	0,036774	0,000284	0,215909	0,011449	83%	3%
30	0,210317	0,011565	0,037298	0,00028	0,22259	0,012766	82%	6%
40	0,206611	0,013729	0,186065	0,016708	0,218089	0,014969	10%	6%
						Max	84%	8%
						Moy	75%	6%



- Sonde de reference E646
- Sonde coude E538
- Linear (Sonde de reference E646)
- Linear (Sonde coude E538)

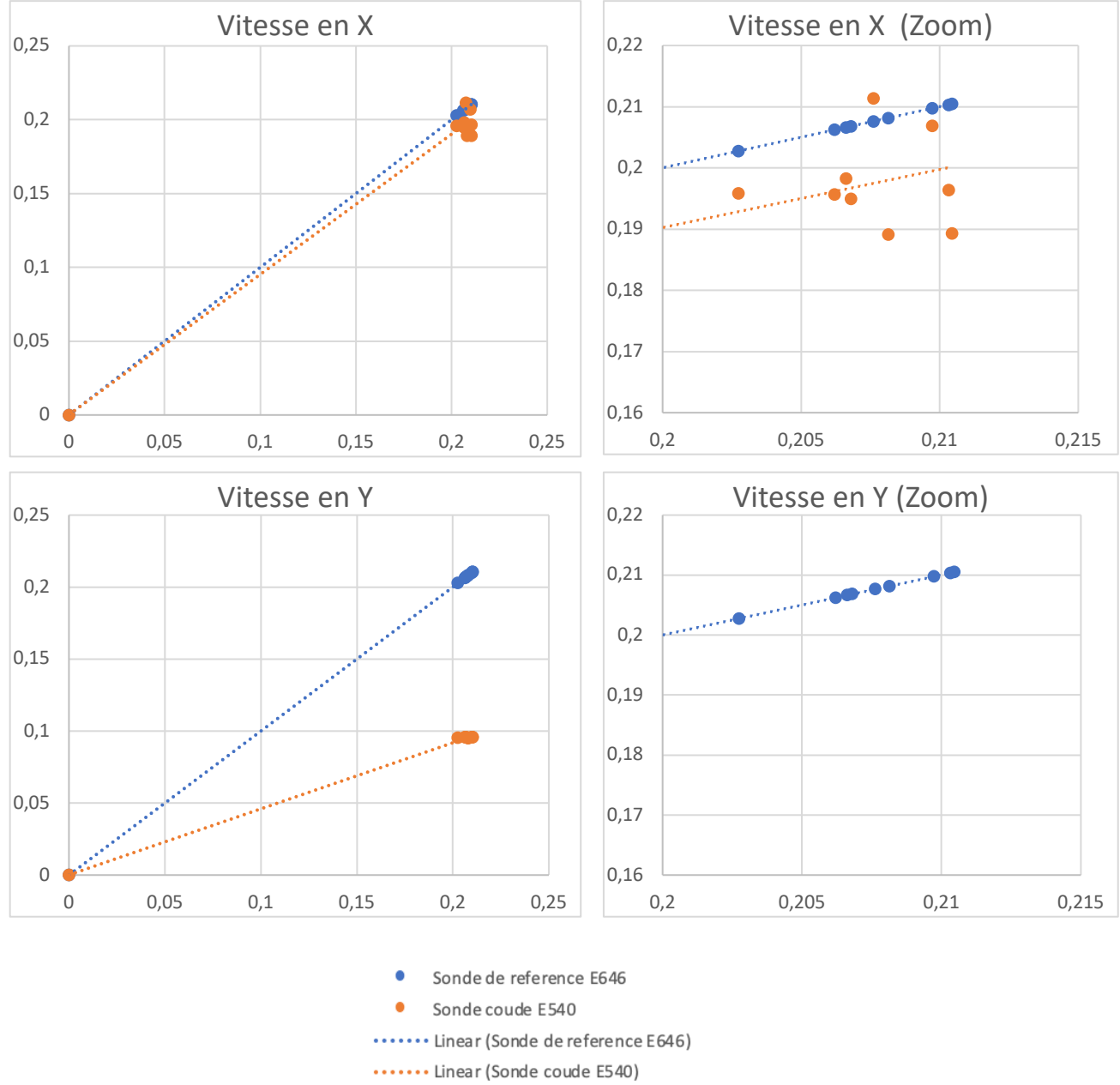
10.2.4.3 S.C E539

	Sonde de reference E646		Sonde coude E539				Comparaison entre v_ref et v_sonde_testé	
	v_ref		En X		En Y			
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,196563	0,011354	-0,004469	0,000092	6%	102%
30	0,209728	0,010439	0,218693	0,011896	-0,004265	0,000093	4%	102%
40	0,207614	0,015841	0,224706	0,012393	-0,004264	0,000102	8%	102%
20	0,206804	0,013024	0,218535	0,012522	-0,004024	0,000163	6%	102%
30	0,202744	0,013774	0,214709	0,014603	-0,003992	0,000175	6%	102%
40	0,206207	0,016807	0,219399	0,016422	-0,003879	0,000167	6%	102%
20	0,21045	0,01371	0,224081	0,011606	-0,003452	0,000216	6%	102%
30	0,210317	0,011565	0,228518	0,011453	-0,001466	0,000815	9%	101%
40	0,206611	0,013729	0,221991	0,01444	-0,000121	0,000424	7%	100%
						Max	9%	102%
						Moy	7%	102%



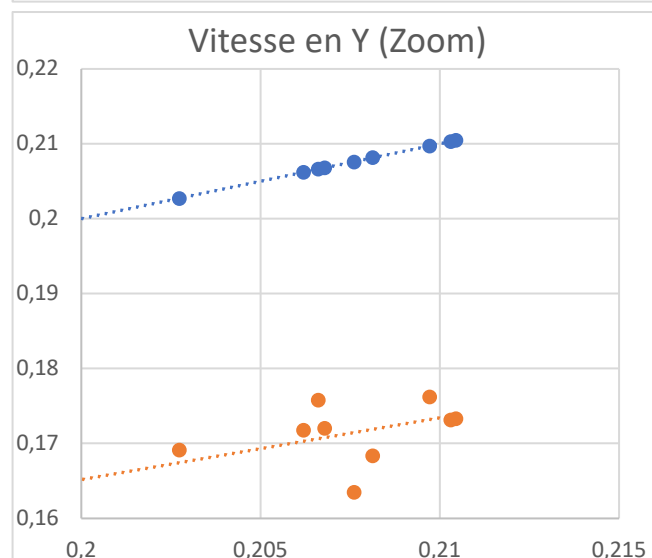
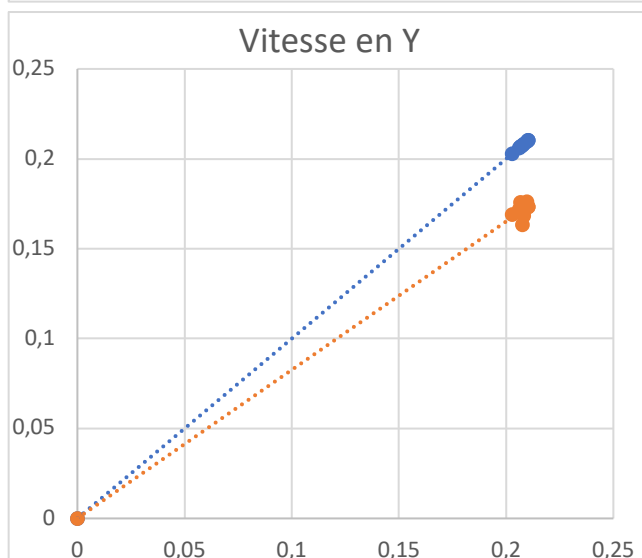
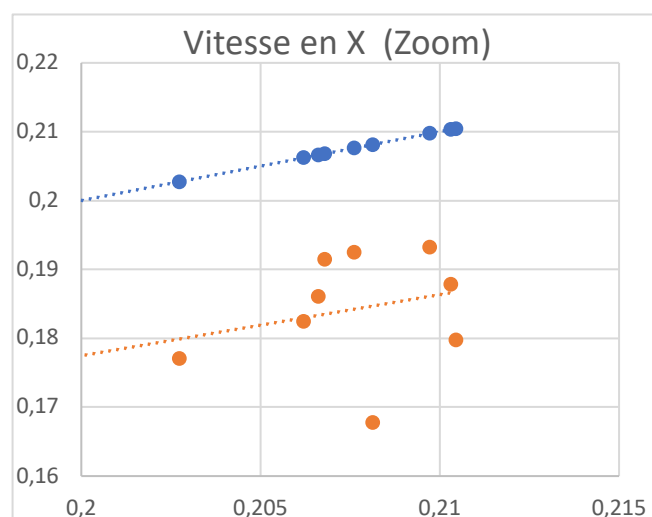
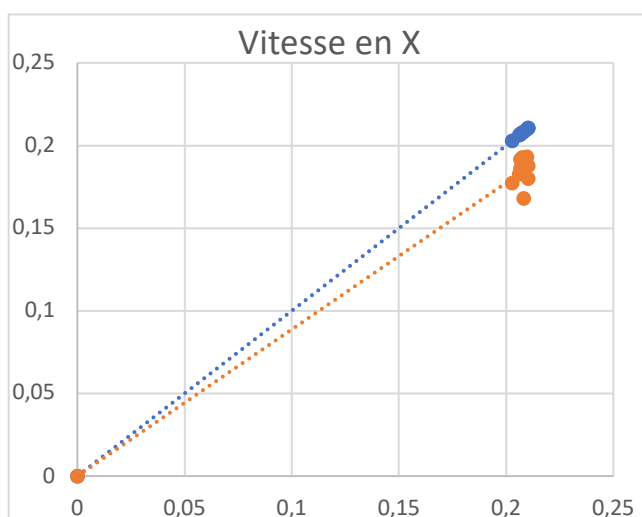
10.2.4.4 S.C E540

	Sonde de reference E646		Sonde coude E540				Comparaison entre v_ref et v_sonde_testé	
	v_ref		En X		En Y			
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,189088	0,010594	0,09484	0,000931	9%	54%
30	0,209728	0,010439	0,206833	0,012955	0,095543	0,000878	1%	54%
40	0,207614	0,015841	0,211307	0,012953	0,095368	0,000818	2%	54%
20	0,206804	0,013024	0,194906	0,014754	0,095463	0,00091	6%	54%
30	0,202744	0,013774	0,195825	0,014314	0,095385	0,00089	3%	53%
40	0,206207	0,016807	0,195611	0,014461	0,095423	0,000875	5%	54%
20	0,21045	0,01371	0,189297	0,013321	0,09542	0,000883	10%	55%
30	0,210317	0,011565	0,196402	0,016098	0,095437	0,000973	7%	55%
40	0,206611	0,013729	0,198257	0,016791	0,095477	0,000971	4%	54%
						Max	10%	55%
						Moy	5%	54%



10.2.4.5 S.C E541

	Sonde de reference E646		Sonde coude E541				Comparaison entre v_ref et v_sonde_testé	
	v_ref		En X		En Y			
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,167813	0,008379	0,168338	0,01524	19%	19%
30	0,209728	0,010439	0,193219	0,011613	0,176237	0,013558	8%	16%
40	0,207614	0,015841	0,192521	0,014453	0,163466	0,019458	7%	21%
20	0,206804	0,013024	0,191491	0,011714	0,172058	0,011584	7%	17%
30	0,202744	0,013774	0,17703	0,01379	0,169111	0,012255	13%	17%
40	0,206207	0,016807	0,182424	0,014785	0,171816	0,016075	12%	17%
20	0,21045	0,01371	0,179726	0,012932	0,173279	0,013819	15%	18%
30	0,210317	0,011565	0,187828	0,012731	0,173185	0,013728	11%	18%
40	0,206611	0,013729	0,186065	0,016708	0,175778	0,018291	10%	15%
						Max	19%	21%
						Moy	11%	17%

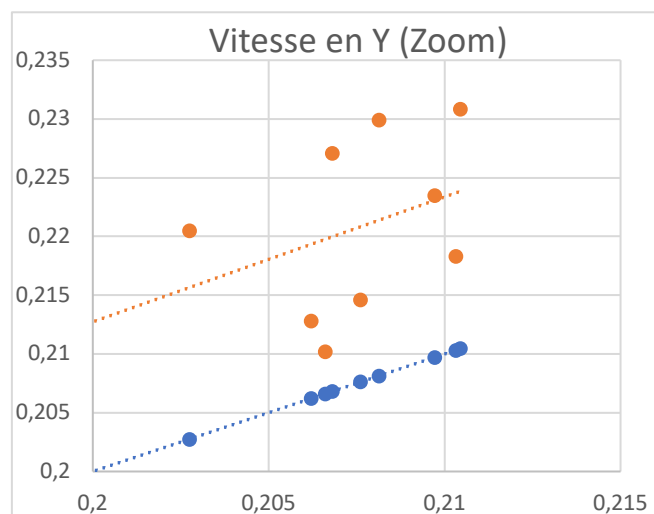
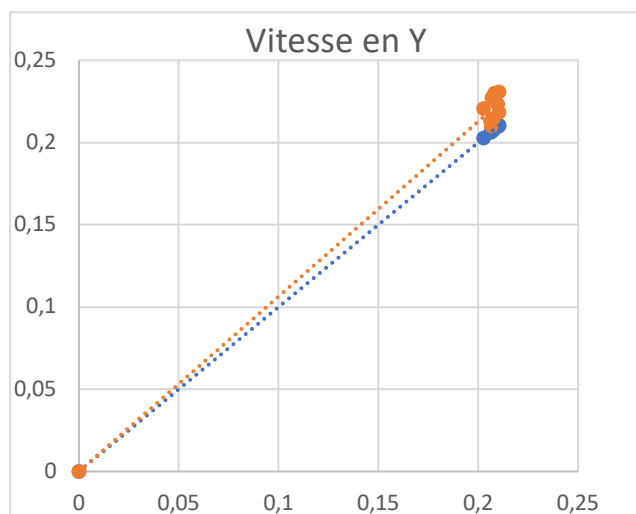
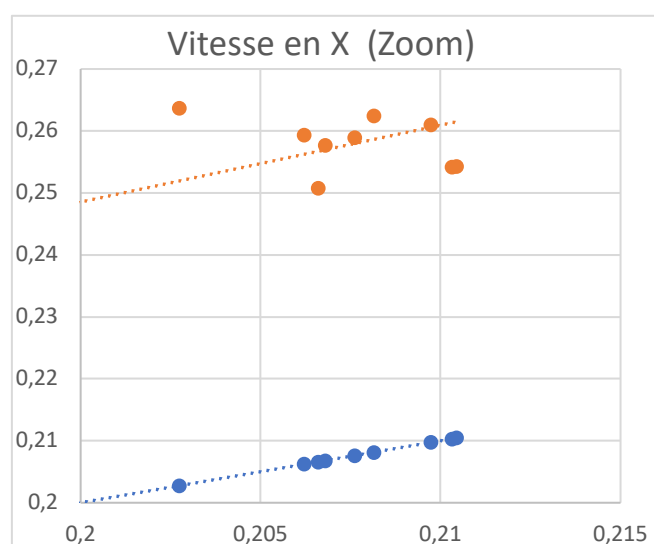
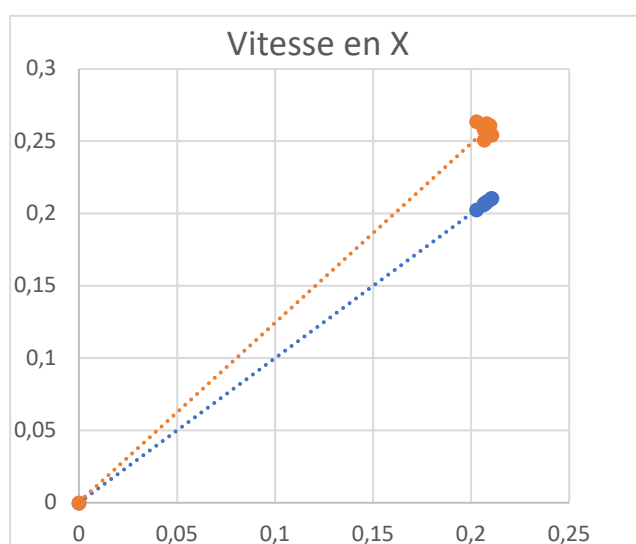


- Sonde de reference E646
- Sonde coude E541
- Linear (Sonde de reference E646)
- Linear (Sonde coude E541)

10.2.5 Sonde droite

10.2.5.1 S.D E530

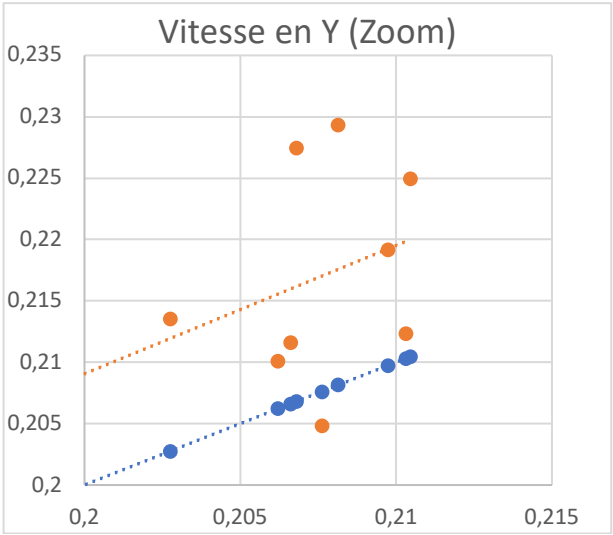
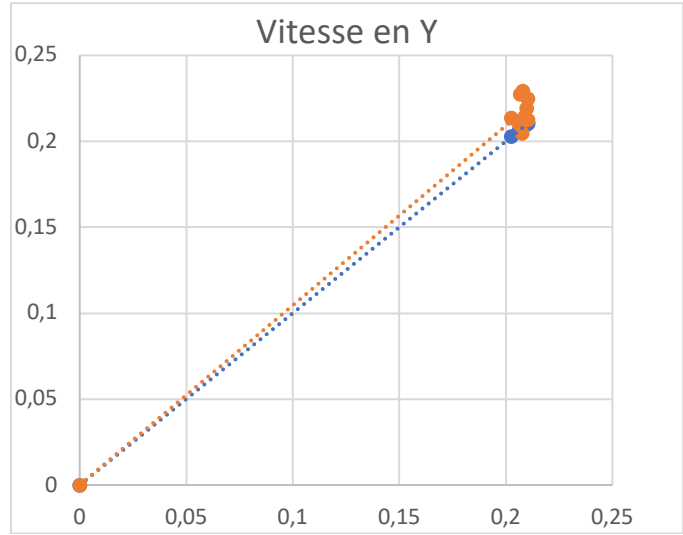
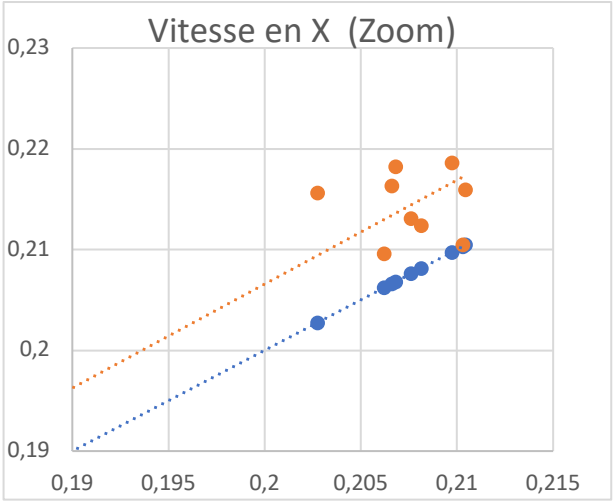
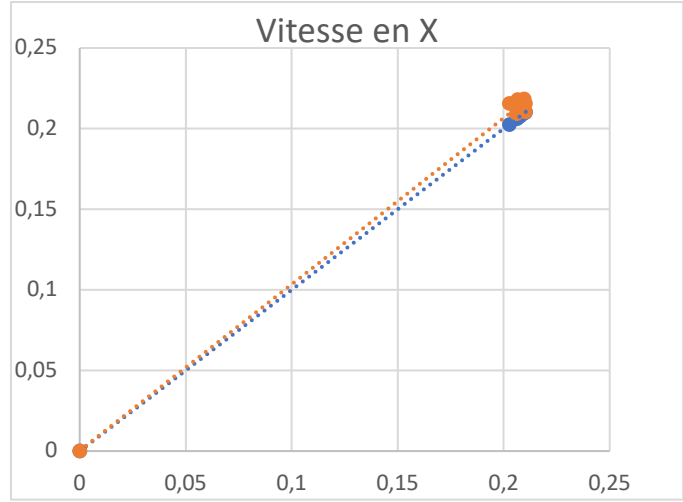
h_sonde [cm]	Sonde de reference E646		Sonde droite E530				Comparaison entre v_ref et v_sonde_testé	
	v_ref		En X		En Y		%X	%Y
	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart		
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,262467	0,013403	0,229894	0,011747	26%	10%
30	0,209728	0,010439	0,261026	0,012897	0,223463	0,015	24%	7%
40	0,207614	0,015841	0,258915	0,015635	0,21459	0,017186	25%	3%
20	0,206804	0,013024	0,257669	0,014589	0,227063	0,010774	25%	10%
30	0,202744	0,013774	0,263635	0,013468	0,220468	0,014567	30%	9%
40	0,206207	0,016807	0,259351	0,016913	0,212787	0,016182	26%	3%
20	0,21045	0,01371	0,254282	0,013292	0,230809	0,013055	21%	10%
30	0,210317	0,011565	0,254187	0,011111	0,218288	0,011655	21%	4%
40	0,206611	0,013729	0,250746	0,013186	0,210174	0,01849	21%	2%
							Max	30%
							Moy	24%
								6%



- Sonde de reference E646
- Sonde droite E535
- Linear (Sonde de reference E646)
- Linear (Sonde droite E535)

10.2.5.2 S.D E531

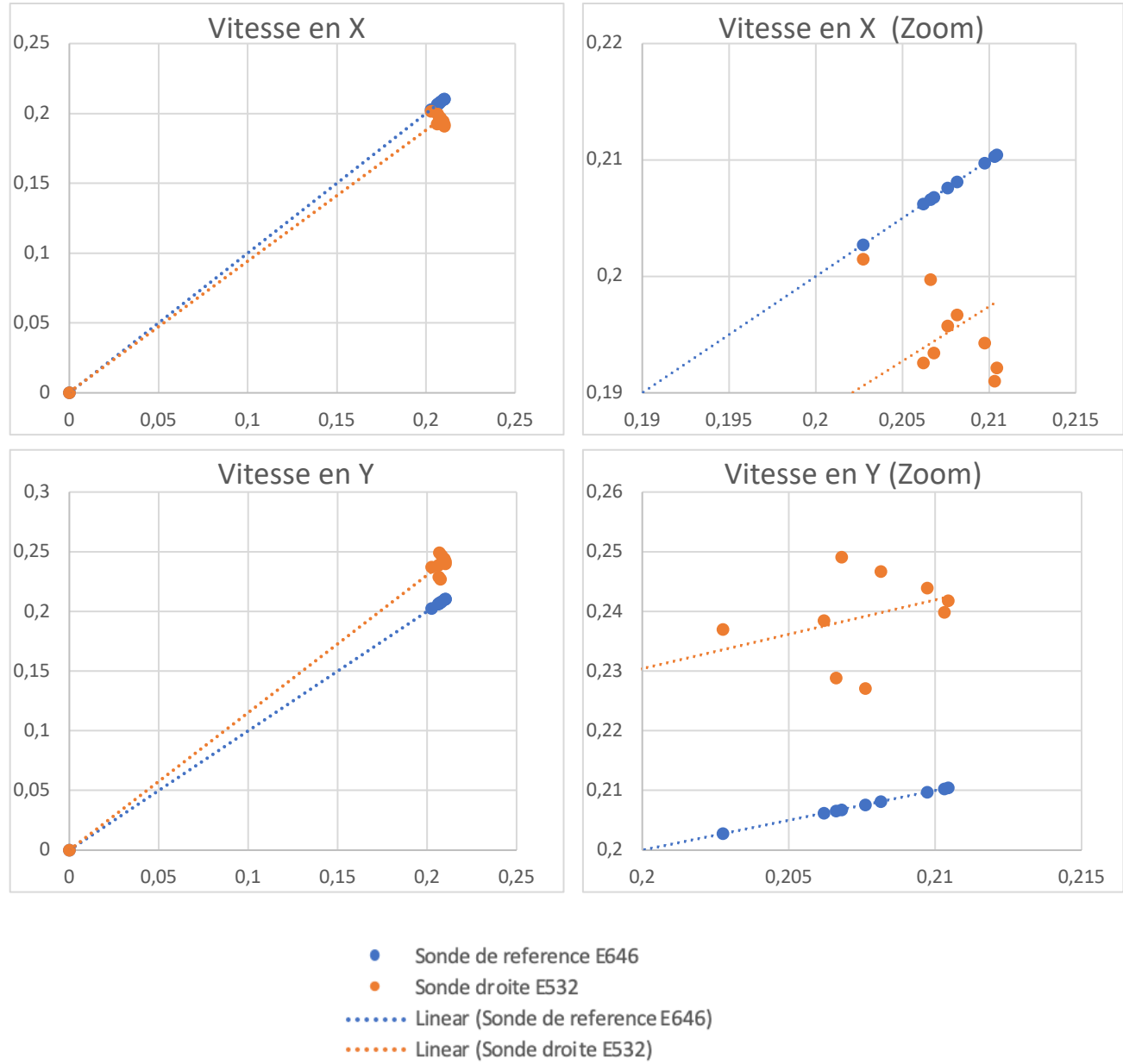
	Sonde de reference E646		Sonde droite E531				Comparaison entre v_ref	
	v_ref		En X		En Y		et v_sonde_testé	
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,212407	0,012717	0,229335	0,01053	2%	10%
30	0,209728	0,010439	0,218628	0,010717	0,219168	0,010282	4%	5%
40	0,207614	0,015841	0,213062	0,01479	0,204832	0,01302	3%	1%
20	0,206804	0,013024	0,218229	0,014659	0,227464	0,011022	6%	10%
30	0,202744	0,013774	0,21562	0,010169	0,213531	0,014271	6%	5%
40	0,206207	0,016807	0,20956	0,014845	0,210066	0,018173	2%	2%
20	0,21045	0,01371	0,215924	0,012356	0,224939	0,011823	3%	7%
30	0,210317	0,011565	0,210476	0,012463	0,212311	0,011049	0%	1%
40	0,206611	0,013729	0,216296	0,014491	0,2116	0,014776	5%	2%
						Max	6%	10%
						Moy	3%	5%



- Sonde de reference E646
- Sonde droite E531
- Linear (Sonde de reference E646)
- Linear (Sonde droite E531)

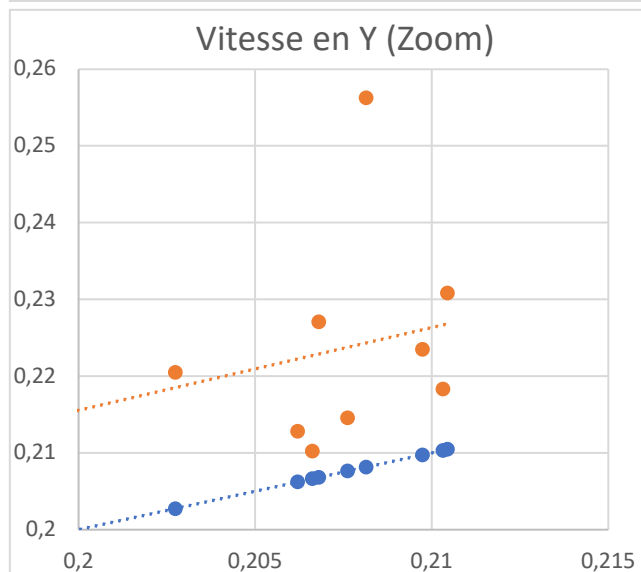
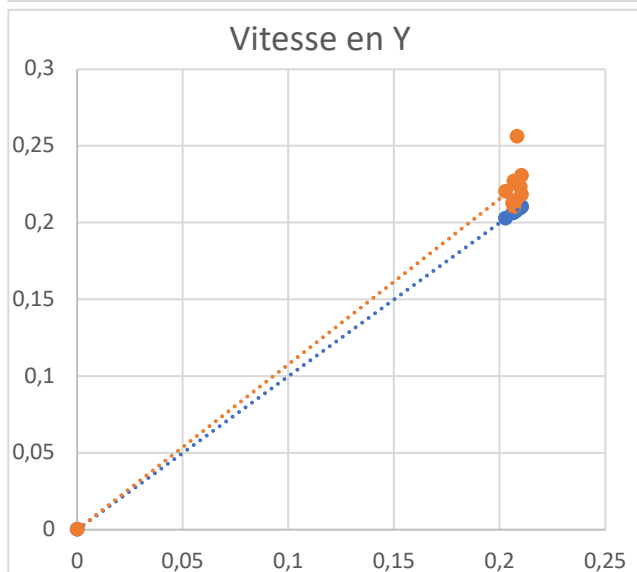
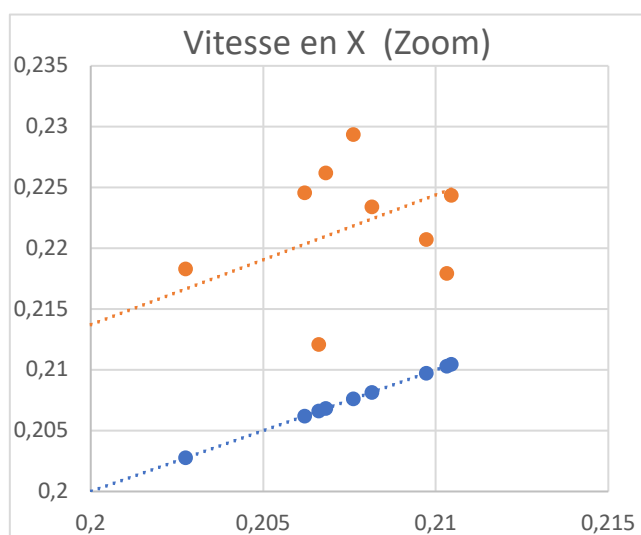
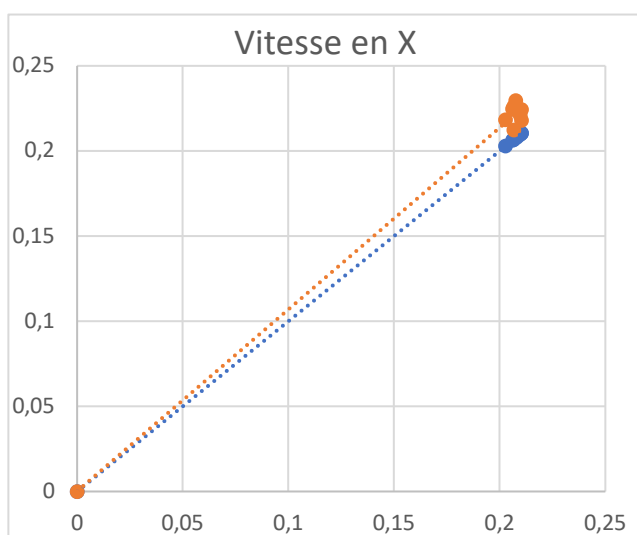
10.2.5.3 S.D E532

	Sonde de reference E646		Sonde droite E532				Comparaison entre v_ref	
	v_ref		En X		En Y		et v_sonde_testé	
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,19669	0,015482	0,246707	0,01276	6%	19%
30	0,209728	0,010439	0,194285	0,017948	0,243909	0,010295	7%	16%
40	0,207614	0,015841	0,195734	0,013757	0,227069	0,018853	6%	9%
20	0,206804	0,013024	0,19344	0,012832	0,249066	0,014272	6%	20%
30	0,202744	0,013774	0,201501	0,013841	0,236998	0,012481	1%	17%
40	0,206207	0,016807	0,192585	0,015319	0,238442	0,016756	7%	16%
20	0,21045	0,01371	0,192133	0,012918	0,24181	0,011378	9%	15%
30	0,210317	0,011565	0,191024	0,012505	0,239847	0,015568	9%	14%
40	0,206611	0,013729	0,199734	0,012628	0,228841	0,015828	3%	11%
						Max	9%	20%
						Moy	6%	15%



10.2.5.4 S.D E533

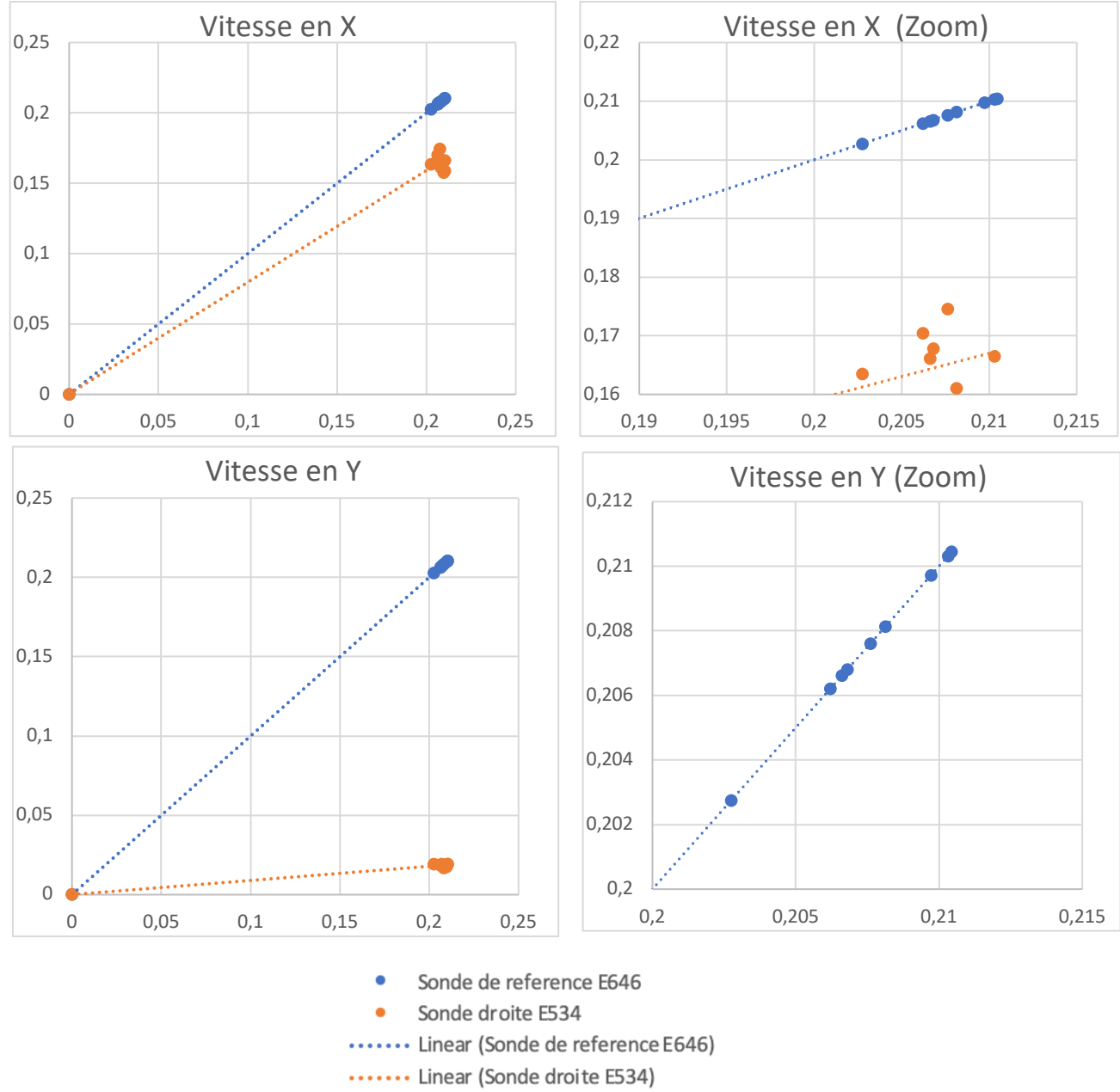
	Sonde de reference E646		Sonde droite E533				Comparaison entre v_ref et v_sonde_testé	
	v_ref		En X		En Y			
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,223417	0,013087	0,256214	0,010739	7%	23%
30	0,209728	0,010439	0,220718	0,011224	0,223463	0,015	5%	7%
40	0,207614	0,015841	0,229357	0,016144	0,21459	0,017186	10%	3%
20	0,206804	0,013024	0,226161	0,01091	0,227063	0,010774	9%	10%
30	0,202744	0,013774	0,218268	0,012969	0,220468	0,014567	8%	9%
40	0,206207	0,016807	0,224554	0,018054	0,212787	0,016182	9%	3%
20	0,21045	0,01371	0,224339	0,012761	0,230809	0,013055	7%	10%
30	0,210317	0,011565	0,217921	0,01461	0,218288	0,011655	4%	4%
40	0,206611	0,013729	0,212099	0,015292	0,210174	0,01849	3%	2%
						Max	10%	23%
						Moy	7%	8%



- Sonde de reference E646
- Sonde droite E533
- Linear (Sonde de reference E646)
- Linear (Sonde droite E533)

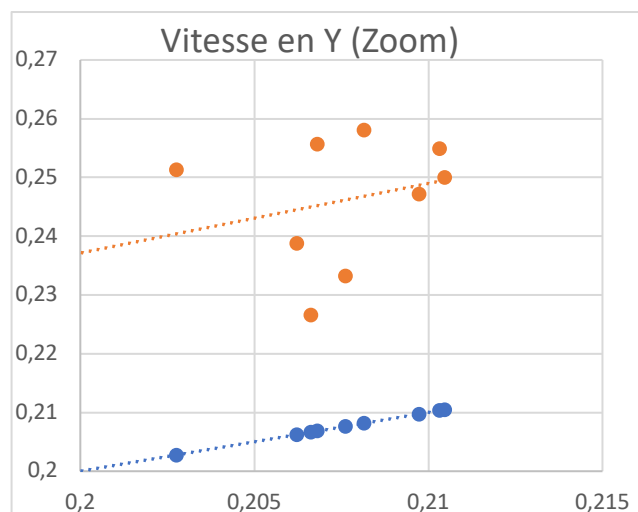
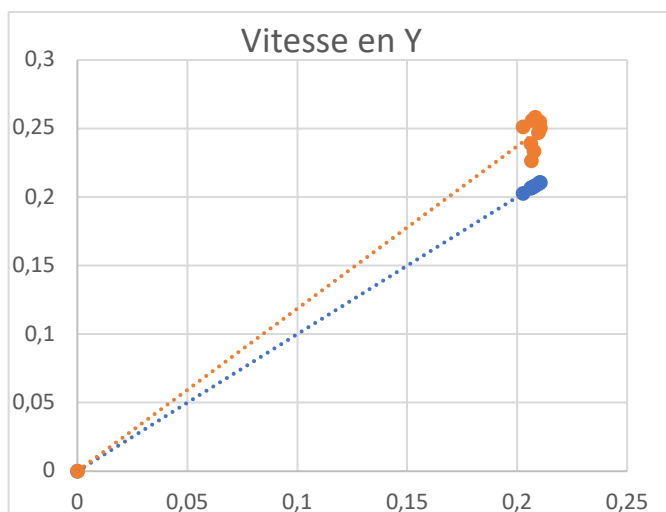
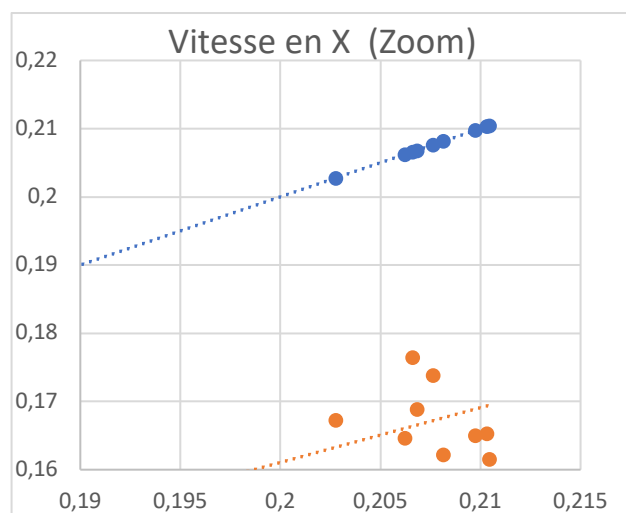
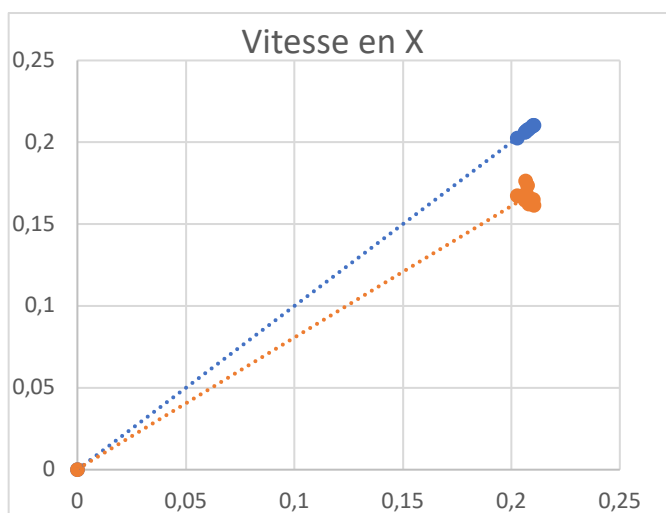
10.2.5.5 S.D E534

	Sonde de reference E646		Sonde droite E534				Comparaison entre v_ref	
	v_ref		En X		En Y		et v_sonde_testé	
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,161087	0,010012	0,016872	0,000187	23%	92%
30	0,209728	0,010439	0,157506	0,015156	0,017503	0,000316	25%	92%
40	0,207614	0,015841	0,174536	0,017893	0,01826	0,00013	16%	91%
20	0,206804	0,013024	0,167859	0,010626	0,019383	0,000077	19%	91%
30	0,202744	0,013774	0,163464	0,012775	0,019314	0,000106	19%	90%
40	0,206207	0,016807	0,170407	0,016147	0,018654	0,000201	17%	91%
20	0,21045	0,01371	0,158971	0,014025	0,019381	0,00007	24%	91%
30	0,210317	0,011565	0,166478	0,010841	0,019182	0,000162	21%	91%
40	0,206611	0,013729	0,166119	0,0122	0,018608	0,000176	20%	91%
						Max	25%	92%
						Moy	20%	91%



10.2.5.6 S.D E535

	Sonde de reference E646		Sonde droite E535				Comparaison entre v_ref et v_sonde_testé	
	v_ref		En X		En Y			
h_sonde [cm]	v_x [m/s]	ecart	v_x [m/s]	ecart	v_y [m/s]	ecart	%X	%Y
0	0		0		0			
20	0,208142	0,011711	0,162207	0,011588	0,258031	0,013111	22%	24%
30	0,209728	0,010439	0,164963	0,017063	0,247158	0,013728	21%	18%
40	0,207614	0,015841	0,17379	0,020216	0,233174	0,016456	16%	12%
20	0,206804	0,013024	0,168858	0,011913	0,255663	0,013154	18%	24%
30	0,202744	0,013774	0,167286	0,014106	0,251274	0,010617	17%	24%
40	0,206207	0,016807	0,164613	0,012265	0,23877	0,019541	20%	16%
20	0,21045	0,01371	0,161555	0,018135	0,249974	0,012888	23%	19%
30	0,210317	0,011565	0,165243	0,013298	0,254858	0,014455	21%	21%
40	0,206611	0,013729	0,176458	0,010498	0,226614	0,014781	15%	10%
			0,169023	0,01964		Max	23%	24%
						Moy	19%	19%



- Sonde de reference E646
- Sonde droite E535
- Linear (Sonde de reference E646)
- Linear (Sonde droite E535)

10.2.6 Conclusion

Tout d'abord, les valeurs de la sonde de référence E535 sont parfaitement cohérentes et exactes. On observe leur exactitude sur les graphes de la section 3, où les points sont précisément sur la droite interprétation linéaire.

Nous pouvons à présent comparer les résultats obtenus pour chaque sonde entre elles afin de déterminer les plus critiques.

Toutes les sondes sont dans une situation de surestimation ou sous-estimation par rapport aux mesures de la sonde de référence. On peut les observer dans les tableaux de la section : Résultats.

Il faut prendre en considération pour chaque sonde le fait que les mesures obtenues peuvent être supérieures ou inférieures lors de leur utilisation.

Nous avons pour :

Les sondes coudes

	Sonde coude E537		Sonde coude E538		Sonde coude E539		Sonde coude E540		Sonde coude E541	
	%X	%Y	%X	%Y	%X	%Y	%X	%Y	%X	%Y
Max	40%	9%	84%	8%	9%	102%	10%	55%	19%	21%
Moy	36%	3%	75%	6%	7%	102%	5%	54%	11%	17%

Les sondes droites

	Sonde droite E530		Sonde droite E531		Sonde droite E532		Sonde droite E533		Sonde droite E534		Sonde droite E535	
	%X	%Y	%X	%Y	%X	%Y	%X	%Y	%X	%Y	%X	%Y
Max	30%	10%	6%	10%	9%	20%	10%	23%	25%	92%	23%	24%
Moy	24%	6%	3%	5%	6%	15%	7%	8%	20%	91%	19%	19%

On observe que :

Les sondes coudes E537, E538, E539, E540 et la sonde droite E534 (en rouge) sont inutilisables car leurs mesures sont trop éloignées des mesures de la sonde de référence.

Le choix se porte sur la sonde droite E531

10.3 Test sur l'influence dispositif des sondes de vitesses électromagnétiques.

Afin de mesurer l'influence du dispositif 2 utilisant une sonde droite sur l'écoulement. En effet, le boîtier de la sonde droite pourrait influencer l'écoulement et donc les essais. Une comparaison entre le dispositif 1 utilisant une sonde coudée (données de El Ouamari et Lenaerts) avec le dispositif 2 a été effectuée.



Figure 10-8 : Dispositif 1 - Sonde coudée



Figure 10-9 : Dispositif 2 - Sonde droite

On observe sur la Figure 10-10, les résultats des vitesses mesurées et lissées sur 5 sec pour les deux dispositifs. On remarque aucune différence significative de mesure entre les deux dispositifs. Le boîtier de la sonde droite n'influence pas l'écoulement.

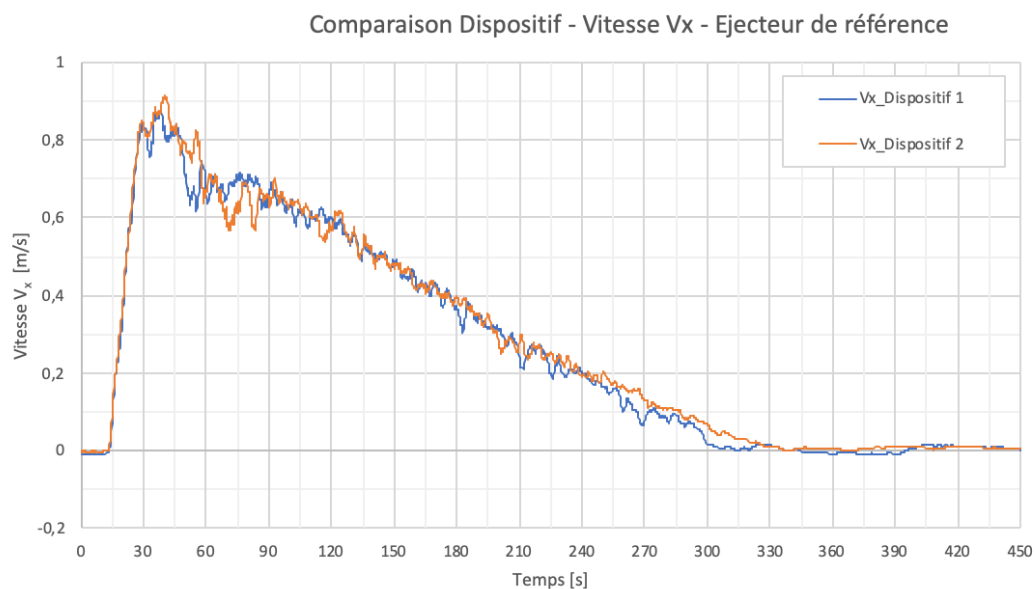


Figure 10-10 : Comparaison - Influence des dispositif sur la mesure des vitesses

10.4 Test de dispositif de la mesure de pression différentielle

10. ANNEXES

10.3 Essais préliminaires sur la mesure des pressions différentielles

Les prises de pression différentielle servent à trouver la pente d'eau présente, transversalement, lors d'un remplissage ou d'une vidange.

Pour la prise de ces mesures, deux défis se sont posés. Nous devons trouver d'une part, une manière de sélectionner, uniquement, la composante hydrostatique lors du sassement et d'autre part, la hauteur à laquelle cette mesure devait être faite.

Nous avons pour cela, mené une série de tests dont on trouve ci-dessous les résultats et conclusions.

10.3.1 Sélection des tubes

Initialement, nous avons commencé à travailler avec des tubes *classiques* dont l'ouverture se trouve en **bas du tube** (Figure 10-10). Le haut du tube étant relié au capteur de pression différentielle.

Toutefois, nous avons observé, lors des tests, que les résultats tenaient compte, outre la composante hydrostatique, d'une composante hydrodynamique.



Figure 10-10 Tube ouverture bas

Nous avons donc analysé les résultats et après l'étude du fonctionnement des tubes, nous avons décidé de reboucher le bas du tube et de creuser des **ouvertures sur les côtés** (Figure 10-11).

La réalisation de nouveaux tests (cfr. 10.3.2) nous a montré que la composante hydrodynamique était beaucoup moins présente qu'avec les tubes à ouverture par le bas. On se rapprochait donc de l'effet voulu à savoir la mesure d'une pression seulement hydrostatique.



Figure 10-11 Tube à ouvertures côtés

10.3.2 Méthodologie des tests et résultats

Nous avons commencé par placer cinq tubes à ouverture bas sur le même bajoyer gauche et espacés de 1 cm (Figure 10-12).

Chaque tube a été relié à la référence à 25 cm et placé au-dessus du 13e éjecteur gauche à 5, 10, 15 et 20 cm au-dessus du radier. Le même test a été réalisé pour les tubes à ouvertures côtés.

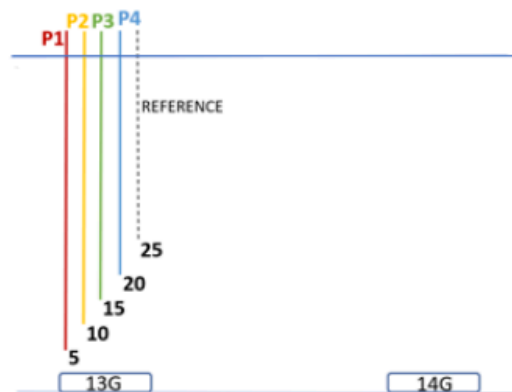


Figure 10-12 Configuration des tubes au droit (Test hydrostatique)

Les résultats obtenus sont notés : α_1 à α_4 . Nous allons comparer ces résultats à la pression hydrostatique présente à l'endroit de la prise de mesure (H_1 à H_4). La pression hydrostatique évolue dans le temps car la hauteur d'eau s'agrandit. Certains pas de temps ont donc été choisis (30, 40, 60, 100, 150 et 210 s). La comparaison à chaque pas de temps a été $H_1 + \beta \alpha_1$.

β est un facteur multiplicateur permettant de mieux voir l'écart. Le facteur utilisé est de 20.

Les graphiques se trouvent à la Figure 10-13 et Figure 10-14 pour les tubes, respectivement, à ouverture bas et à ouvertures côtés.

Nous pouvons observer que les écarts par rapport à la pression hydrostatique sont plus importants pour les tubes à ouverture bas que pour les tubes à ouvertures côtés. Cela nous conforte donc, dans l'utilisation des tubes à ouvertures côtés pour des résultats proches de l'hydrostatique.

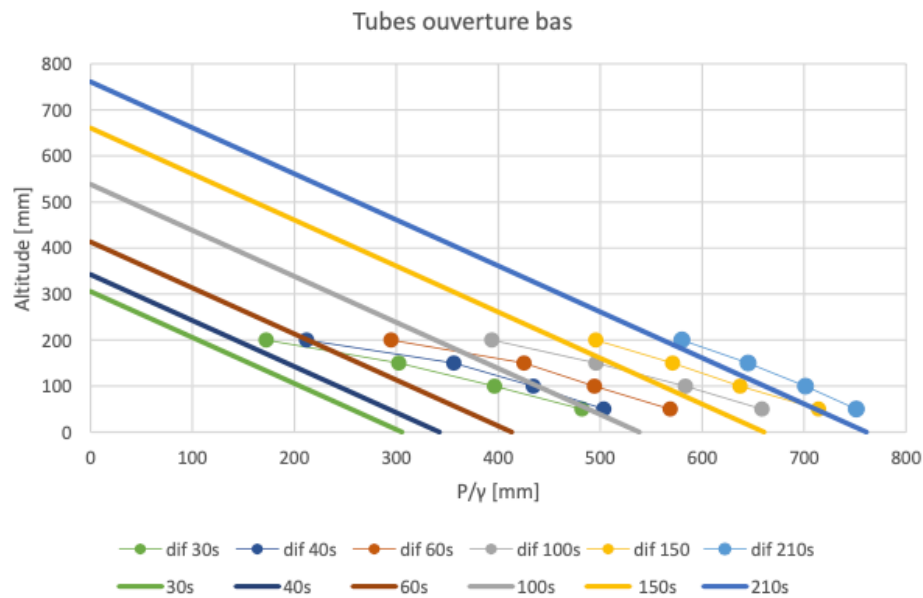


Figure 10-13 Résultats tubes à ouverture bas

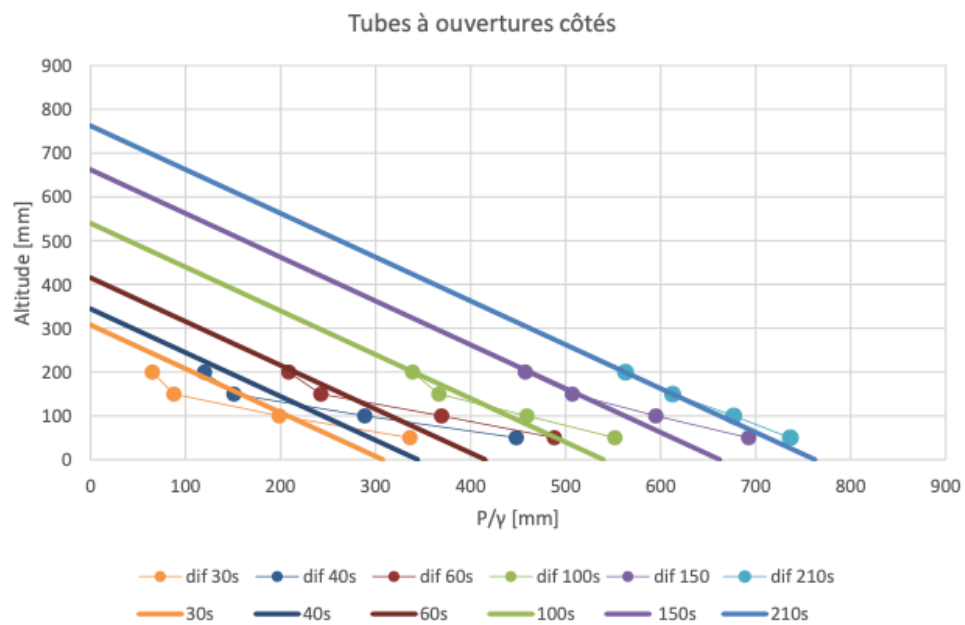


Figure 10-14 Résultats tubes à ouvertures côtés

10.3.3 Hauteur

Une fois le choix des tubes à ouvertures côtés réalisé, nous devons trouver à quelle hauteur mettre ceux-ci afin de n'avoir que la composante hydrostatique. Pour cela, nous avons comparé les résultats obtenus pour la configuration au droit des éjecteurs (visible à la Figure 10-12) et la configuration entre éjecteurs (visible à la Figure 10-15).

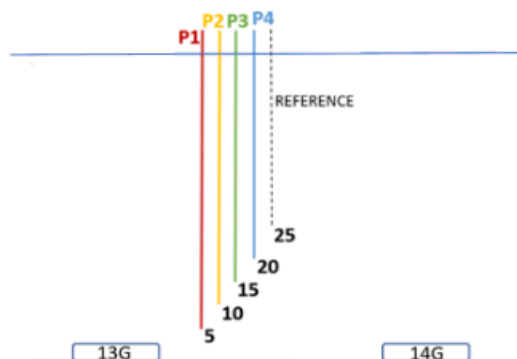


Figure 10-15: Configuration des tubes entre éjecteurs (Test hydrostatique)

Les résultats obtenus au droit des éjecteurs sont visibles à la Figure 10-16 et ceux obtenus entre les éjecteurs à la Figure 10-17.

Nous observons ainsi que plus la prise se fait en hauteur, plus l'écart est réduit.

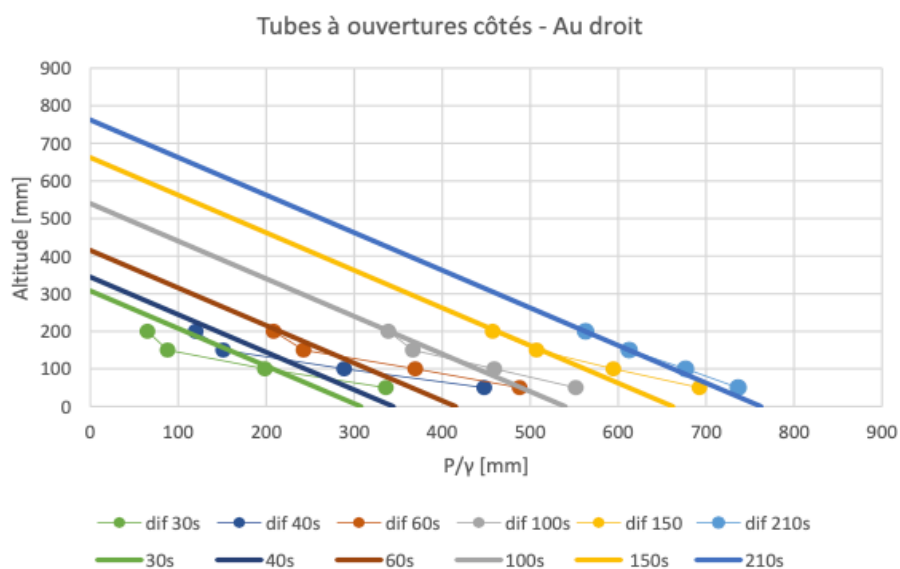


Figure 10-14 : Test de dispositif de la mesure de pression différentielle – p4 (El Ouamari et Lenaerts, 2019)

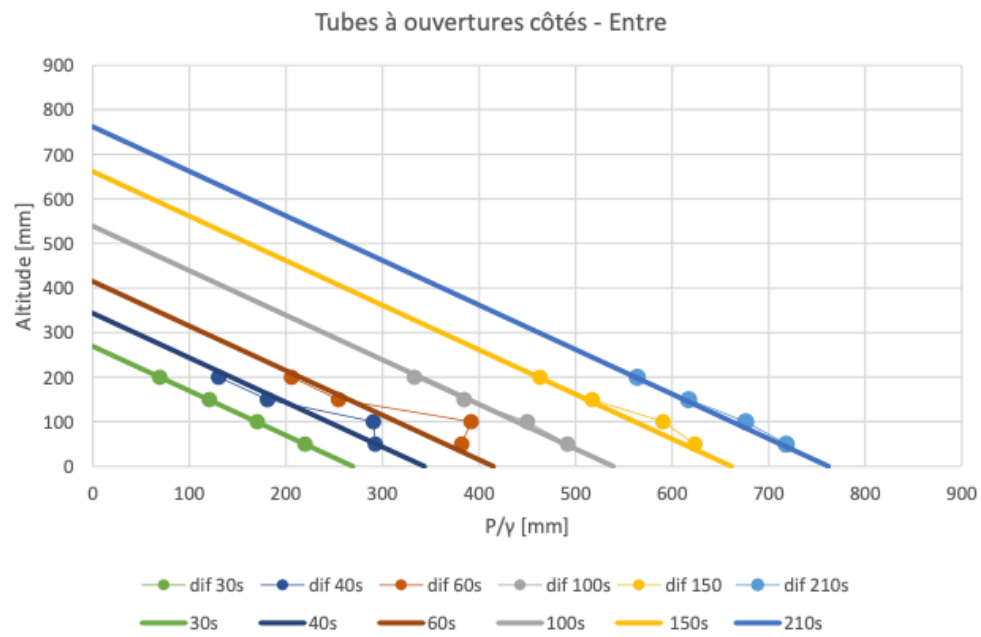


Figure 10-17 Entre

10.3.4 Conclusion

En conclusion, la prise de pression différentielle se fera avec les tubes à **ouvertures côtés** et à une **hauteur de 25 cm**.

10.5 Champ de vitesse dans le sas

10.5.1 Sans bateau

1^{ère} configuration :

Sortie : Éjecteur réduit

Positionnement : Au droit de l'éjecteur

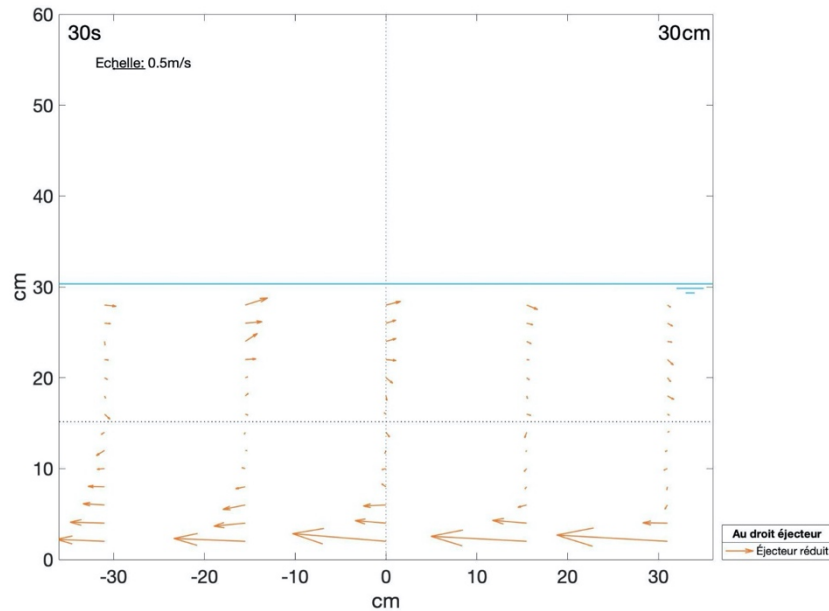


Figure 10-16 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit - 30 s après l'ouverture

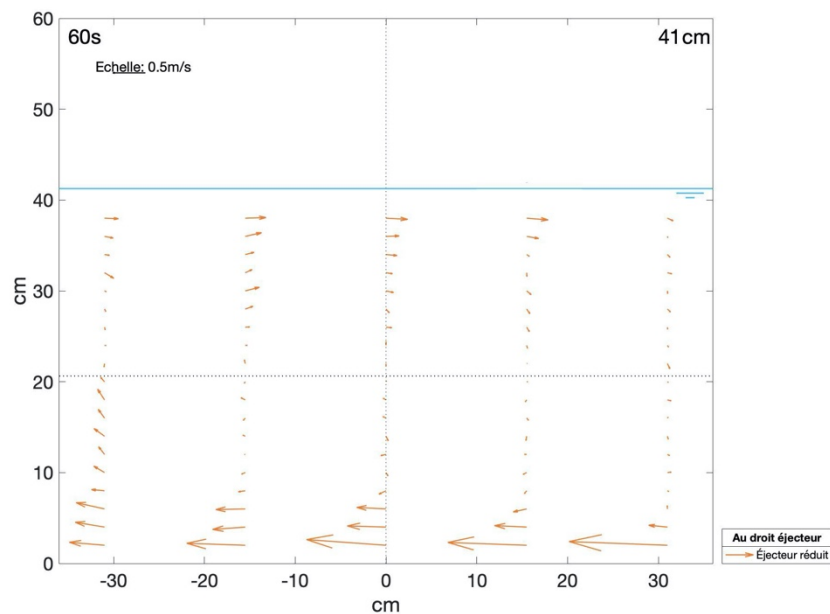


Figure 10-17 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit - 60 s après l'ouverture

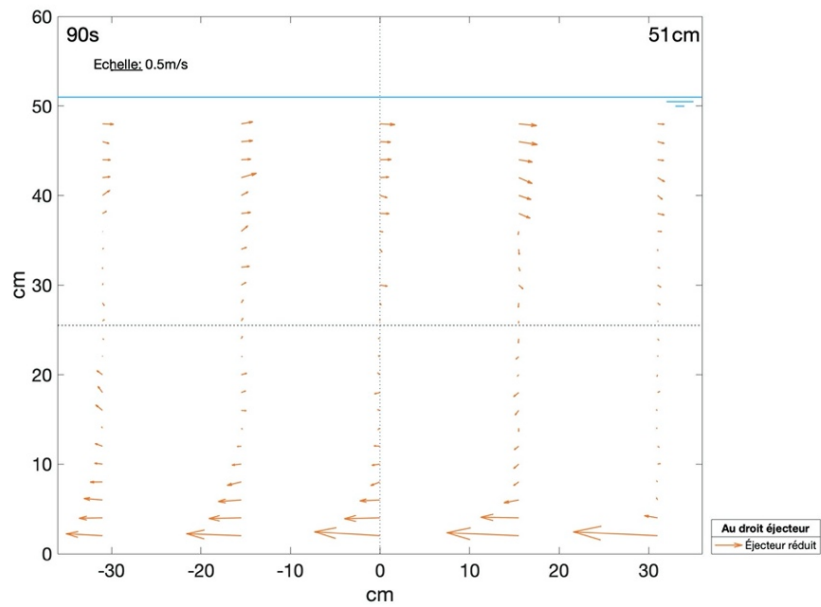


Figure 10-18 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit - 90 s après l'ouverture

10.5.2 Avec bateau

1^{ère} configuration :

Sortie : Éjecteur réduit avec bateau

Positionnement : Au droit de l'éjecteur

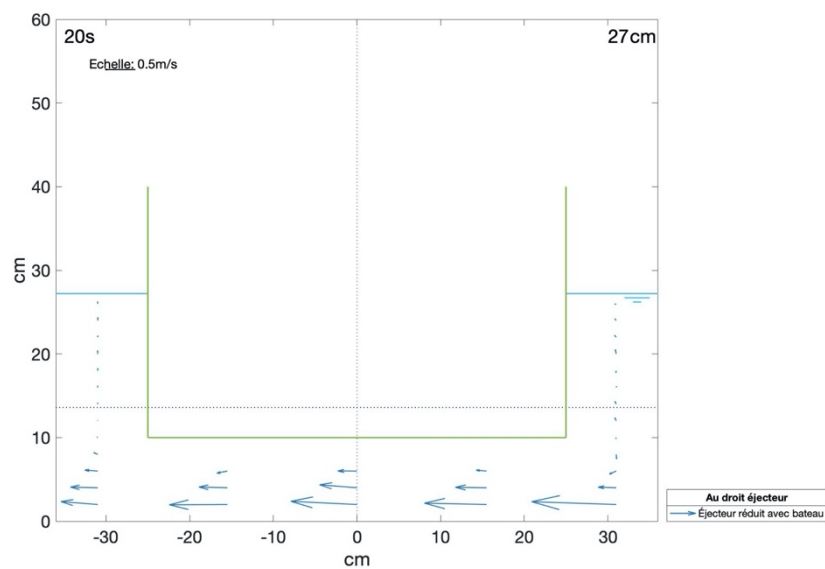


Figure 10-19 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 20 s après l'ouverture

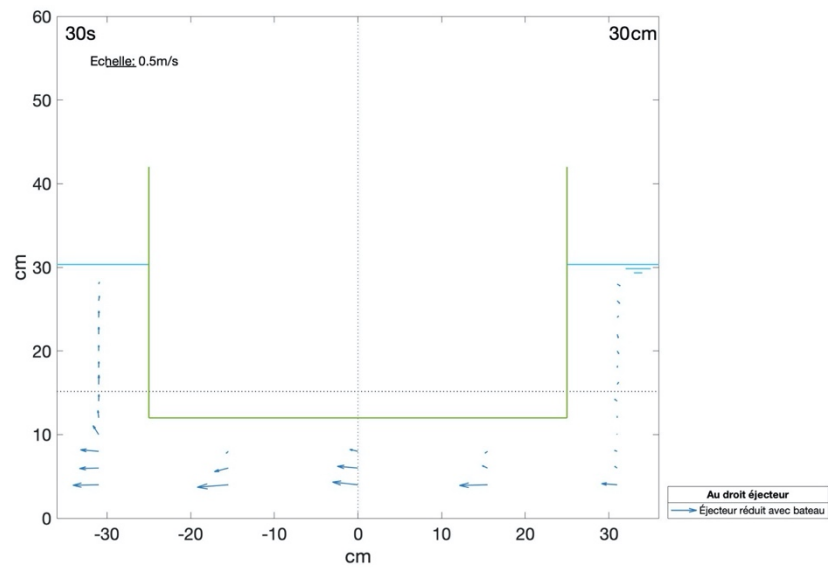


Figure 10-20 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 30 s après l'ouverture

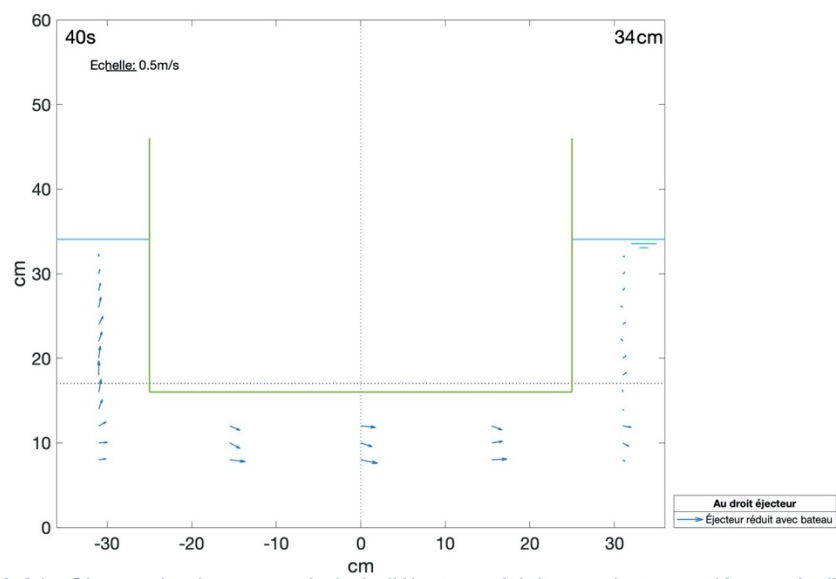


Figure 10-21 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 40 s après l'ouverture

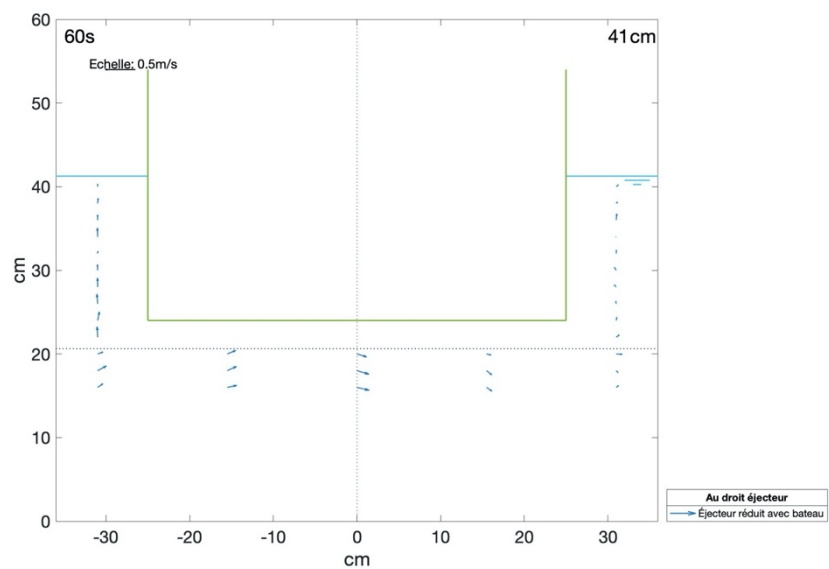


Figure 10-22 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 60 s après l'ouverture

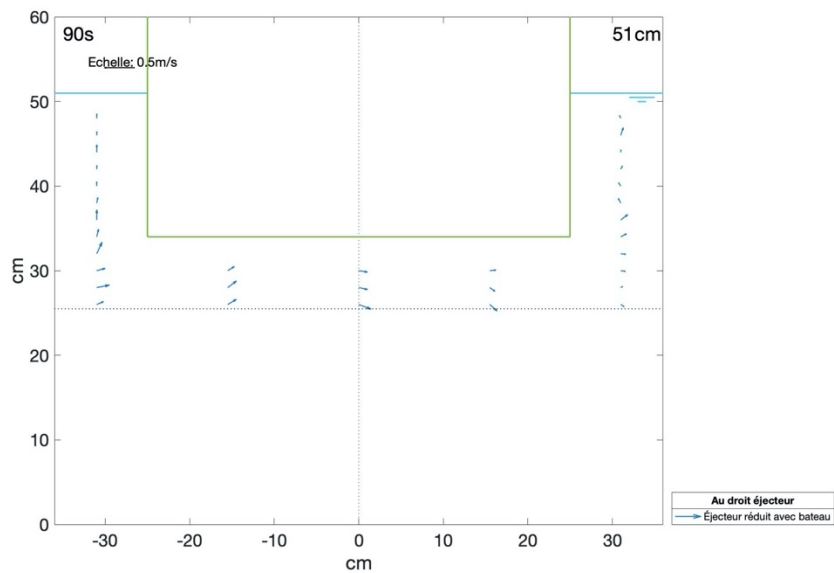


Figure 10-23 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec bateau - 90 s après l'ouverture

2^{ème} configuration :

Sortie : Comparaison de l'éjecteur réduit avec et sans bateau

Positionnement : Au droit de l'éjecteur

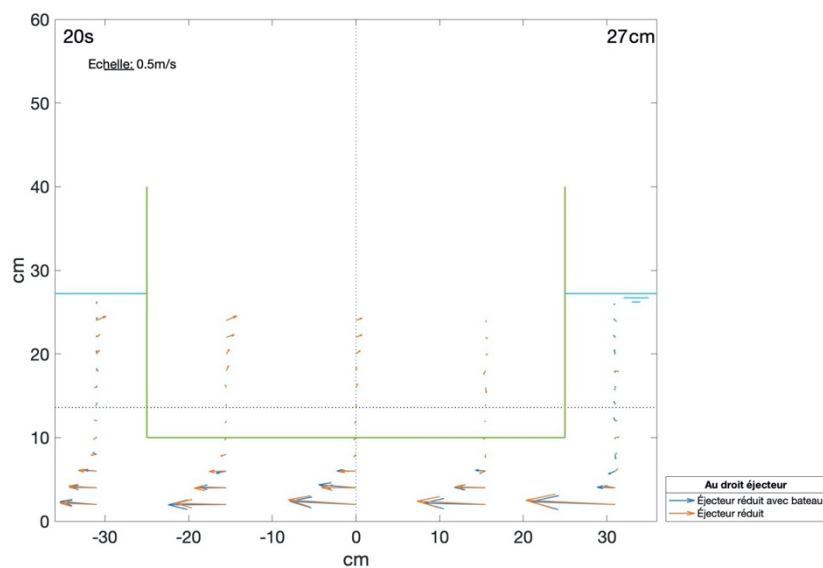


Figure 10-24 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec et sans bateau - 20 s après l'ouverture

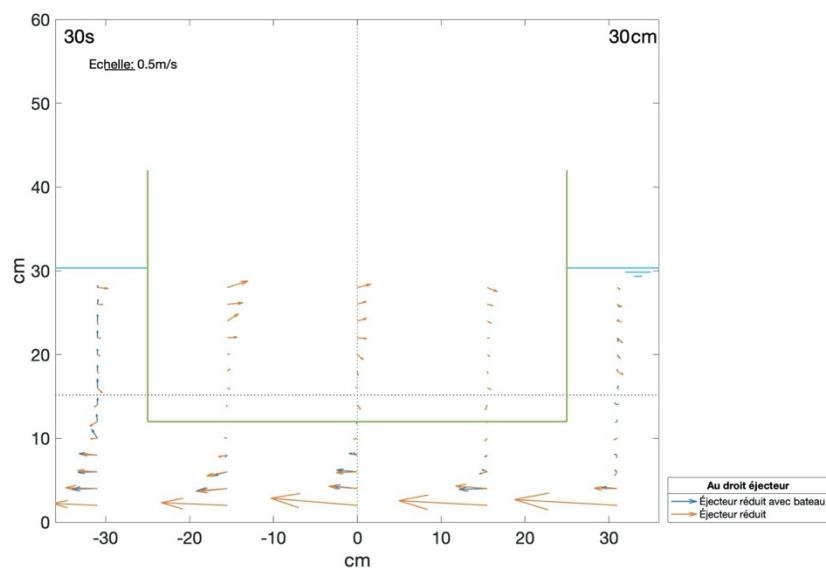


Figure 10-25 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec et sans bateau - 30 s après l'ouverture

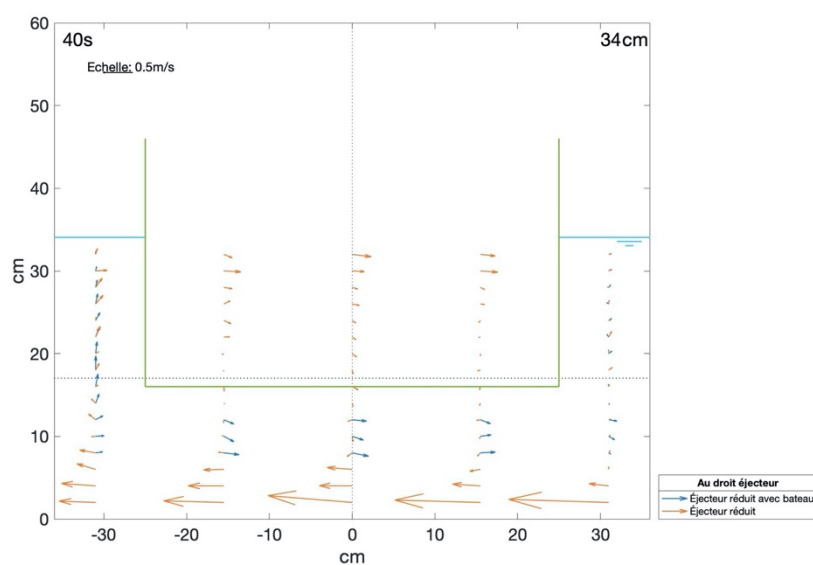


Figure 10-26 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur de réduit avec et sans bateau - 40 s après l'ouverture

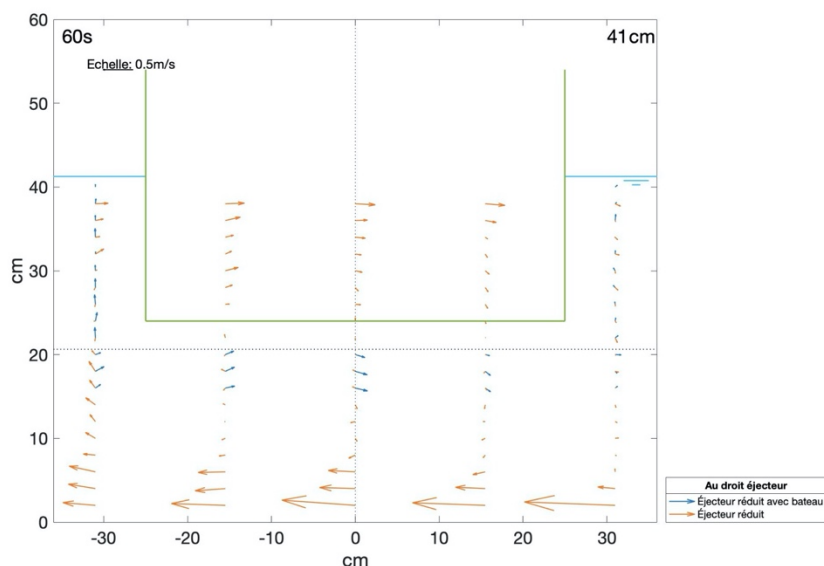


Figure 10-27 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec et sans bateau - 60 s après l'ouverture

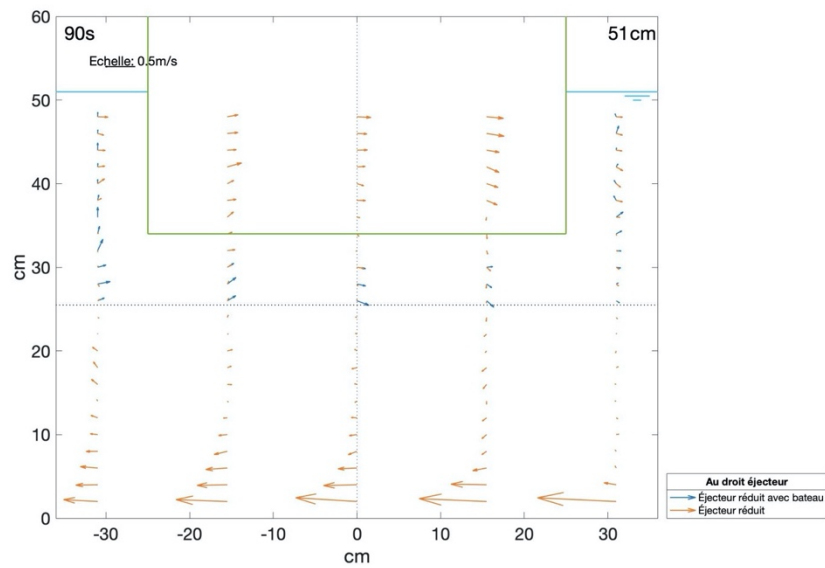


Figure 10-28 : Champ de vitesse au droit de l'éjecteur réduit avec et sans bateau - 90 s après l'ouverture

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

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