

École polytechnique de Louvain

Efforts d'amarrage transversaux lors du remplissage en mode dégradé d'une écluse à aqueducs- larrons

Auteurs : **Ismaël EL OUAMARI, Manon LENAERTS**

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

Lecteurs : **Ir. Damien CHRISTIAENS, ir. João PACHECO DE ALMEIDA**

Année académique 2018–2019

Master [120] : ingénieur civil des constructions

REMERCIEMENTS

Nous souhaitons remercier toutes les personnes qui nous ont aidés et soutenus lors de la réalisation de ce travail.

Tout d'abord, nous tenons à remercier particulièrement nos promoteurs, Madame Céline Savary et Monsieur Didier Bousmar pour leur encadrement, leur disponibilité et leurs précieux conseils tout au long de l'année. Leur joie de vivre et leur soutien nous ont permis de dépasser tous les obstacles rencontrés et de nous surpasser pour la réalisation de ce travail.

Ensuite, nous souhaitons remercier les membres du personnel du Laboratoire des Recherches Hydrauliques pour leur aide précieuse dans la prise en main du modèle réduit de l'écluse de Lanaye. Le partage de leur expérience technique et matérielle nous a été indispensable.

Nous souhaitons aussi remercier Damien Christiaens pour nous avoir partagé son expérience du Laboratoire des Recherches Hydrauliques, pour sa disponibilité et ses nombreux conseils. Merci également à Monsieur João Pacheco De Almeida d'avoir accepté d'être notre lecteur.

Nous remercions également toutes les personnes qui ont lu et relu ce travail. Leur aide nous a permis d'améliorer la qualité de ce mémoire.

Nous souhaitons remercier personnellement nos proches et amis pour leur soutien durant la réalisation de ce travail, et plus généralement durant nos années d'études.

TABLE DES MATIÈRES

1	INTRODUCTION.....	1
1.1	CONTEXTE GÉNÉRAL	1
1.1.1	Contexte économique et écologique	1
1.1.2	Enjeux géographiques	2
1.2	LES ÉCLUSES	3
1.2.1	Systèmes de remplissage	4
1.2.2	Les efforts d'amarrage	6
1.2.3	Le mode dégradé.....	7
1.3	LA 4 ^{ÈME} ÉCLUSE DE LANAYE : LA PROBLÉMATIQUE.....	8
1.4	LES OBJECTIFS.....	13
2	LES EFFORTS D'AMARRAGE : ÉTAT DE L'ART	15
2.1	DIFFÉRENTES COMPOSANTES DES EFFORTS D'AMARRAGE	15
2.2	FORCE HYDROSTATIQUE	17
2.3	FORCE HYDRODYNAMIQUE	17
2.4	CRITÈRES DE SÉCURITÉ EXISTANTS	18
3	APPROCHE EXPÉRIMENTALE : DESCRIPTION DU MODÈLE RÉDUIT	20
3.1	DIMENSIONS DU MODÈLE	20
3.2	SYSTÈME DE REMPLISSAGE PAR AQUEDUCS-LARRONS	23
3.3	SYSTÈME D'AMARRAGE DU MODÈLE	24
3.4	DISPOSITIFS DE MESURE	26
3.4.1	Capteurs de niveau à ultrasons	26
3.4.2	Capteurs de pression différentielle	27
3.4.3	Capteurs de position à cordes.....	28
3.4.4	Jauges de déformation.....	28
3.4.5	Sondes de vitesses électromagnétiques	29
3.5	LOIS D'OUVERTURE DES VANNES	30
3.6	PROCÉDURE DES ESSAIS.....	31
4	RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX.....	33
4.1	NOTES PRÉLIMINAIRES	34
4.1.1	Conventions de signe	34
4.1.2	Lissage des données	35
4.1.3	Répétabilité des mesures	35
4.2	HYDROGRAMMES ET LIMNIGRAMMES.....	36
4.2.1	Remplissage.....	37
4.2.2	Vidange.....	39
4.2.3	Synthèse	40
4.3	PENTE D'EAU TRANSVERSALE.....	41
4.3.1	Sans barge	42
4.3.2	Avec barge.....	43
4.3.3	Comparatif avec/sans barge.....	44
4.3.4	Comparatif au droit/entre éjecteurs.....	44
4.4	PENTE DE ROULIS	46
4.5	FORCE D'AMARRAGE TRANSVERSALE	47
4.5.1	Comparaison avec le modèle analytique	50

4.6	VITESSES DE L'EAU AU SEIN DU SAS.....	52
4.6.1	Intégration des vitesses.....	65
4.6.2	Modèle conceptuel et comparaison	72
4.7	INFLUENCE DE DIFFÉRENTS PARAMÈTRES	76
4.7.1	Loi d'ouverture de la vanne	76
	<i>Influence sur l'hydrogramme</i>	<i>77</i>
	<i>Influence sur la force transversale</i>	<i>79</i>
	<i>Influence sur la pente d'eau</i>	<i>80</i>
	<i>Influence sur le roulis</i>	<i>81</i>
4.7.2	Taille des éjecteurs	82
	<i>Influence sur l'hydrogramme</i>	<i>82</i>
	<i>Influence sur la force transversale</i>	<i>84</i>
	<i>Influence sur la pente d'eau</i>	<i>85</i>
	<i>Influence sur le roulis</i>	<i>86</i>
4.7.3	Position transversale de la barge	87
	<i>Influence sur l'hydrogramme</i>	<i>87</i>
	<i>Influence sur la force transversale</i>	<i>87</i>
	<i>Influence sur la pente d'eau</i>	<i>89</i>
	<i>Influence sur le roulis</i>	<i>89</i>
4.7.4	Synthèse	90
5	PERSPECTIVES	91
6	CONCLUSION	92
7	BIBLIOGRAPHIE	95
8	TABLE DES FIGURES	97
9	TABLE DES TABLEAUX	101
10	ANNEXES.....	102
10.1	PLANS DU MODÈLE RÉDUIT	102
10.2	RÉPÉTABILITÉ DES MESURES	104
10.3	ESSAIS PRÉLIMINAIRES SUR LA MESURE DES PRESSIONS DIFFÉRENTIELLES.....	110
10.3.1	Sélection des tubes	110
10.3.2	Méthodologie des tests et résultats.....	111
10.3.3	Hauteur	113
10.3.4	Conclusion	114
10.4	INFLUENCE DE DIFFÉRENTS PARAMÈTRES	115
10.4.1	Loi d'ouverture des vannes	116
10.4.2	Taille des éjecteurs	129
10.4.3	Position transversale de la barge	134

1 INTRODUCTION

1.1 Contexte général

1.1.1 Contexte économique et écologique

Selon des prévisions réalisées par le Forum International des Transports auprès de l'OCDE, le transport mondial de marchandises va être multiplié par quatre d'ici 2050 [11]. Cela constitue un véritable défi pour les systèmes de transport. Dans le contexte économique et écologique mondial actuel, les moyens de transport les plus écologiques et les moins coûteux doivent être privilégiés. Le transport fluvial est actuellement le moyen de transport de fret le plus écologique et économique.

En effet, d'un point de vue économique, le transport fluvial est celui qui engendre le moins de coûts par rapport au transport routier, ferroviaire et aérien. La **Erreur ! Référence non valide pour un signet.** [14] illustre ces différences.

D'un point de vue écologique, le transport par voies navigables est clairement moins énergivore que le transport routier et aérien et donc moins générateur de gaz à effet de serre. Pour transporter une tonne de marchandises sur une même distance, un camion va produire dix fois plus de CO₂ qu'un bateau, tandis que la voie ferrée produira quatre fois plus de CO₂ que la voie d'eau. Les chiffres sont visibles à la Figure 1-2 [5].

En outre, le transport fluvial a aussi comme avantages le respect des sites aménagés, une limitation des risques d'accident et une réduction des nuisances sonores, olfactives et visuelles.

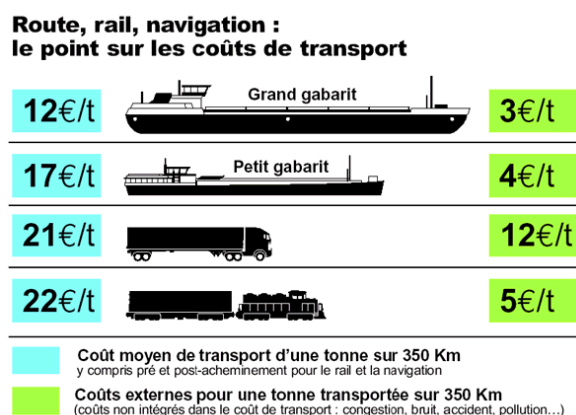


Figure 1-1: Coûts du transport [14]

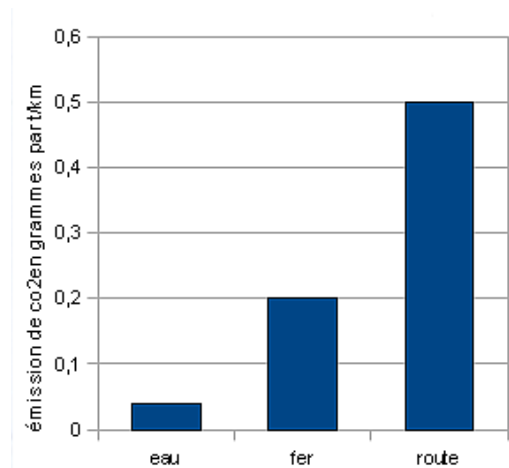


Figure 1-2: Emissions de CO₂ [5]

1.1.2 Enjeux géographiques

Bien qu'il présente de nombreux avantages, ce mode de transport nécessite l'aménagement de voies d'eau, propres à la navigation.

En Europe, le réseau de voies navigables s'étend sur plus de 29.000 km, dont plus de 1.500 km en Belgique. Parmi les réseaux les plus denses en Europe, la Belgique est placée quatrième, après la France, l'Allemagne et les Pays-Bas.



Figure 1-3: Liaison Seine-Nord Europe [24]

Pour répondre à la demande, les voies navigables font l'objet de vastes projets de génie civil partout en Europe. Ces projets visent à agrandir le réseau navigable et permettre le passage de navires de plus grand gabarit.

L'un de ces projets est la construction du canal Seine-Nord Europe, qui permettra la liaison entre la Seine et l'Escaut (Figure 1-3 [24]). Les travaux permettront la réalisation du canal au gabarit européen Vb, qui permettra d'accueillir des convois poussés de 185 m x 11,40 m, pouvant contenir l'équivalent de 200 camions.

Sur la Meuse, l'objectif est d'atteindre une voie navigable de classe VIb, à savoir des convois poussés de 195m x 22,8 m, pouvant contenir l'équivalent de 400 camions.

1.2 Les écluses

Depuis des millénaires, la navigation fluviale permet le transport de personnes et de marchandises. Mais cette navigation sur des voies naturelles ne peut se faire qu'au moment où les conditions le permettent. Le débit sur le cours d'eau impacte directement la navigabilité. Celui-ci varie en fonction des précipitations. Cette variation du comportement du cours d'eau entraîne des problèmes pour la navigation. Les deux principaux problèmes sont :

- En période d'étiage, le niveau est trop faible pour permettre d'avoir un tirant d'eau suffisant pour les bateaux. La navigation est impossible.
- En période de crue, la vitesse d'écoulement de l'eau est trop élevée pour permettre au bateau de naviguer en toute sécurité.

Pour remédier à ces problèmes et optimiser l'utilisation du réseau de navigation, l'homme a aménagé les cours d'eau et construit des barrages mobiles permettant de maintenir un niveau d'eau suffisant pour la navigation. En crue, au-delà d'un certain débit, la navigation ne peut être maintenue et ces structures peuvent s'effacer de manière à ne pas provoquer d'inondations. Pour franchir le dénivelé créé par le barrage, une écluse est construite en parallèle (Figure 1-4 [13]).

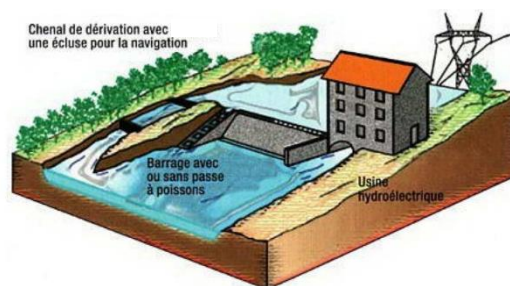


Figure 1-4: Barrage et écluse construite en parallèle [13]

Une écluse se compose d'un sas dont le niveau d'eau varie entre le niveau d'eau à l'amont et le niveau d'eau à l'aval. Une coupe longitudinale d'une écluse est visible à la Figure 1-5 [12]. Elle se présente comme un long couloir dont l'accès se fait par des portes aux extrémités amont et aval. Le sol de l'écluse est appelé le radier et les murs latéraux sont appelés les bajoyers.

Lorsque l'on souhaite faire franchir le dénivelé à un bateau, on le fait entrer dans le sas de l'écluse, on ferme la porte et on fait varier le niveau de l'eau dans le sas pour l'amener au niveau du bief dans lequel le bateau veut se rendre. Ce changement de niveau se fait par vases communicants, en mettant en relation le sas et le bief concerné au moyen de vannes et d'un éventuel réseau de conduites caractérisant le système de remplissage et de vidange. On appelle cette opération le sassement. [12]

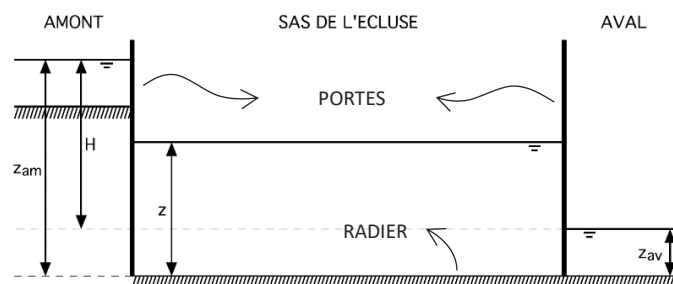


Figure 1-5: Coupe longitudinale d'une écluse

1.2.1 Systèmes de remplissage

Afin de permettre la variation de la hauteur d'eau dans le sas, l'écluse doit être équipée d'un système de remplissage permettant à l'eau d'accéder par gravité du bief amont au sas lors du remplissage et du sas au bief aval lors de la vidange.

Il existe de nombreux systèmes qui diffèrent selon la hauteur de chute à franchir, le gabarit des bateaux à faire passer, le temps de sasement maximal, la turbulence et les efforts admissibles sur le bateau, l'encombrement du système, ... Plus le système est simple, plus le coût de sa fabrication et de son entretien est économique. [2]

Les quatre systèmes de remplissage principaux sont :

- **Par les portes :** Lorsque la hauteur de chute est inférieure à 5-6 m, il est possible de remplir le sas par des vannes installées directement sur les portes d'accès. Cela se présente souvent sous forme d'orifices obstrués par des plaques mobiles. C'est un des systèmes les plus simples et les moins coûteux. Ce système peut créer une certaine agitation de l'eau dans le sas (Figure 1-6 [3] et Figure 1-7 [12]). [2]



Figure 1-6: Remplissage par les portes [3]



Figure 1-7: Exemple de remplissage par les portes

- **Contournement des têtes :** Pour des hauteurs de chute un peu plus importantes ou dans le but de diminuer l'agitation dans le sas, des conduites munies de vannes contournant les têtes peuvent être construites. L'eau est alors prélevée et injectée de part et d'autre des portes. En remplissage, deux jets sortants des bajoyers se font face, se rencontrent et se dissipent mutuellement. Une illustration de ce système de remplissage est visible à la Figure 1-8. Une chambre de dissipation à l'amont peut éventuellement être ajoutée de manière à mieux orienter et répartir l'écoulement sur la largeur du sas et ainsi limiter les perturbations dans celui-ci.[2]

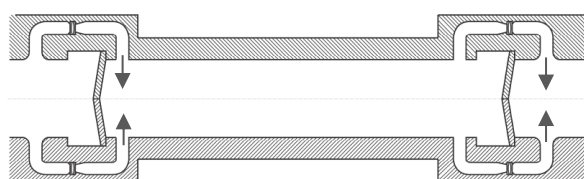


Figure 1-8: Contournement des têtes [3]

- **Aqueducs et larrons** : Pour des hauteurs de chute moyennes allant jusqu'à 20m, deux conduites, appelées aqueducs, sont construites le long de chaque bajoyer et communiquent avec le sas par une série de courtes conduites, appelés larrons, réparties le long de l'écluse (Figure 1-9 [3] et Figure 1-10 [22]). Les larrons se situent les uns en face des autres. Lors du remplissage, les jets sortants qui se font face se rencontrent, provoquant une dissipation d'énergie et un bouillonnement au milieu du sas. [2]

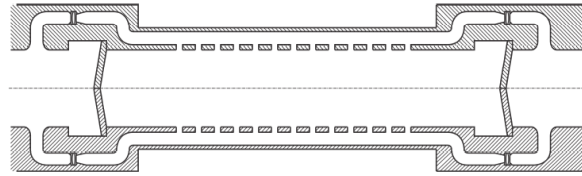


Figure 1-9: Remplissage par aqueducs et larrons [3]



Figure 1-10: Larrons sur l'écluse d'Ivoz-Ramet [22]

- **Par le radier** : Ce système est le plus complexe et le plus coûteux. Il est utilisé pour des hauteurs de chute importante. Il est le plus efficace pour limiter au mieux l'agitation de l'eau lors du remplissage. Le remplissage se fait à partir du radier au moyen d'une série de conduites amenant l'eau provenant du bief dans le sas. La construction des conduites est faite de sorte que le débit soit réparti équitablement sur toute la longueur de l'écluse, ce qui permet d'éviter les courants d'eau au sein du sas (Figure 1-11).

Si le système est bien réalisé, il est très efficace et permet une équirépartition du débit. Il comporte un certain inconvénient : le coût de conception et de construction est très élevé. De plus, sa complexité peut rendre son entretien difficile et ses conduites sont sujettes à l'obturation par divers débris. [2]

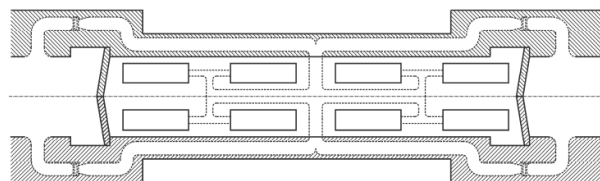


Figure 1-11: Remplissage par le radier [3]

1.2.2 Les efforts d'amarrage

Lors d'un sasement, afin d'éviter le déplacement horizontal dans le sas, les bateaux doivent s'amarrer aux bajoyers de l'écluse (Figure 1-12 [3]), par l'intermédiaire de têtes d'amarrage, appelés bollards lorsqu'ils sont situés en tête de bajoyer (Figure 1-13 [18]) ou organeaux lorsqu'ils sont nichés verticalement dans le bajoyer (Figure 1-14 [18]).

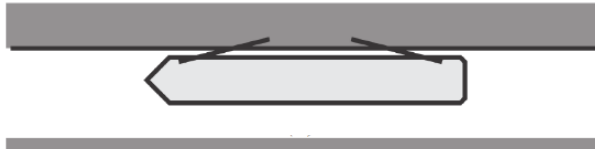


Figure 1-12: Amarrage d'un bateau dans un sas d'écluse [3]

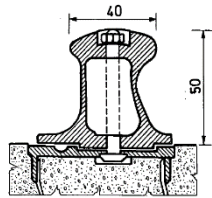


Figure 1-13: Bollard de surface [18]

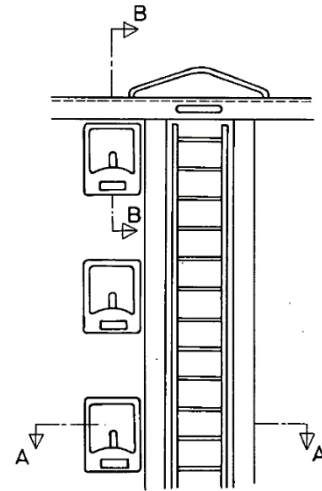


Figure 1-14: Organeaux [18]

Les différents systèmes d'alimentation conçus ont pour objectif de réduire l'agitation lors des opérations de sasement. Cette agitation se perçoit sur le bateau au travers des efforts d'amarrage. En cas de mouvements trop importants lors d'un sasement, des dégâts importants peuvent être causés sur les bateaux et sur la structure même de l'écluse, que ce soit au niveau des bajoyers ou au niveau des portes.

Afin de limiter les risques d'accident et de maintenir un certain confort pour les bateliers, des critères limitant les efforts d'amarrage existent. Ces critères varient en fonction des pays et de la catégorie du bateau. Plusieurs rapports de l'AIPCN, l'Association mondiale des infrastructures de transport par voie d'eau, donnent des recommandations quant aux valeurs admissibles des efforts d'amarrages (notamment le Rapport n°106, 2009 [16] et le Rapport n°155, 2015 [17]). Ces critères font l'objet d'une étude particulière plus loin dans ce travail.

Il n'est cependant pas toujours facile d'évaluer de tels efforts d'amarrage sur site. C'est la raison pour laquelle, dans la plupart des cas actuellement, l'évaluation de l'effort d'amarrage se fait à partir des mesures de pentes d'eau au sein du sas. La relation qui existe entre ces deux grandeurs sera explicitée plus loin dans ce travail, lorsque les différentes composantes d'une force d'amarrage seront présentées, dans le Chapitre 2 : Les efforts d'amarrage : état de l'art. Néanmoins, cette façon d'évaluer l'effort d'amarrage n'est pas toujours judicieuse, comme le montrera cette étude.

1.2.3 Le mode dégradé

Dans les différents systèmes de remplissage, l'apport d'eau se fait via les deux bajoyers (à l'exception du système de remplissage par les portes). La liaison entre le bief et le sas se fait au moyen de conduites équipées de vannes. Le remplissage se fait par l'ouverture de ces vannes, de manière symétrique. On parle alors de remplissage en mode normal (Figure 1-16 [20]).

Dans le cas où l'une de ces vannes est en maintenance ou en panne, le remplissage ne se fait plus que par une seule vanne. Ce mode de remplissage est appelé dégradé (Figure 1-15 [20]).

Le mode de remplissage dégradé présente certains inconvénients comme un temps de sasement plus élevé et surtout une agitation plus importante. Le jet d'eau sortant de l'aqueduc en fonctionnement n'est plus dissipé par le jet opposé. Ce jet vient alors frapper le bajoyer opposé et une pente d'eau transversale plus importante apparaît. Cette pente d'eau augmente l'effort dans les amarres et pose des problèmes de sécurité. Certains systèmes y sont plus sensibles que d'autres, comme le système de remplissage par aqueducs larrons (Figure 1-9 [3]).

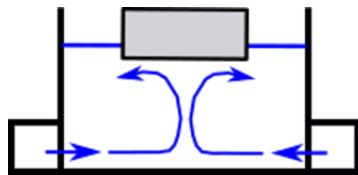


Figure 1-16: Remplissage normal [20]

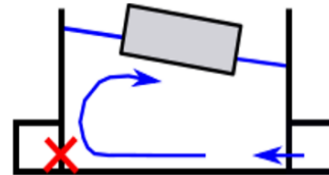


Figure 1-15: Remplissage dégradé [20]

1.3 La 4^{ème} écluse de Lanaye : la problématique

La liaison entre la Meuse et le canal Albert permet de relier Liège ou Anvers aux Pays-Bas et à l'Allemagne. Cette liaison se fait par le passage de l'écluse de Lanaye et son dénivelé de 13,7 mètres. Jusqu'en 2015, trois écluses étaient présentes à Lanaye : deux petites écluses (55 X 7,5 mètres) pour des bateaux de 600 tonnes et une écluse plus grande (136 X 16 mètres) pour des bateaux de 2000 tonnes. Celles-ci étaient trop petites pour la circulation fluviale croissante entre Liège et Rotterdam et il en résultait une attente importante pour les bateaux désirant emprunter l'ouvrage. Cet endroit était appelé le bouchon de Lanaye.

En 2011, commença la construction de la quatrième écluse de Lanaye. Ses dimensions sont de 225 mètres de long, 25 mètres de large, pour une dénivellation de 13,7 mètres. Elle permet le passage de bateaux de plus de 9000 tonnes. Le mode de remplissage choisi est un système par aqueducs-larrons (Figure 1-18 [3]). Elle fut inaugurée en 2015 (Figure 1-17 [20]).



Figure 1-17: Quatrième écluse de Lanaye [20]

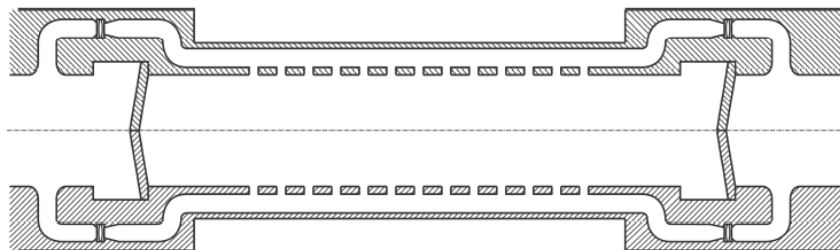


Figure 1-18: Remplissage par aqueducs et larrons [3]

1. INTRODUCTION

Une campagne d'essais a été réalisée lors de la mise en service de l'écluse par la direction des recherches hydrauliques du SPW en collaboration avec la direction de l'Expertise des Ouvrages. Cette campagne avait pour but de vérifier le bon fonctionnement de l'écluse. Elle a permis de contrôler les hydrogrammes de remplissage et de vidange et les mouvements d'eau dans le sas pendant les opérations de sasement. Le mode de remplissage dégradé a entre autres été étudié dans cette campagne d'essais.

Lors des essais en mode dégradé, la pente d'eau transversale a été mesurée. Comme exposé plus loin, il existe en effet un lien entre la pente d'eau dans le sas et l'effort d'amarrage. Le résultat de ces pentes d'eau est visible à la Figure 1-19 [20]. La pente transversale observée sur site était très importante, atteignant plus de 5‰, ce qui correspond à 10 fois la valeur admissible.

Ces essais avaient été réalisés pour une première loi d'ouverture de vannes linéaire. Cette loi est visible à la Figure 1-20 [20]. L'ouverture de la vanne se fait de 0° à 90° en 9 minutes.

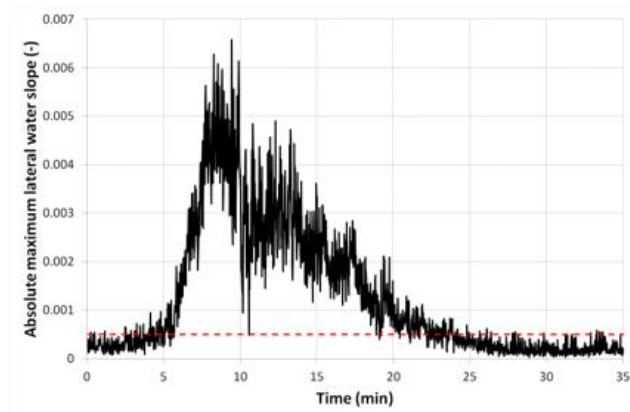


Figure 1-19: Pente d'eau en mode dégradé à Lanaye [20]

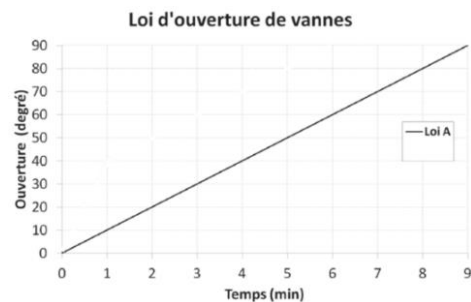


Figure 1-20: Loi d'ouverture A sur l'écluse de Lanaye [20]

Suite à ces essais, des recommandations ont été formulées par la Direction des Recherches hydrauliques du SPW au gestionnaire de la quatrième écluse de Lanaye, dans le cas d'un remplissage en mode dégradé :

- Les bateaux doivent s'amarrer du côté de l'aqueduc fonctionnel.
- Il faut éviter d'avoir plusieurs bateaux côte à côte sur la largeur du sas.

Incident à Lanaye

Malheureusement, ces recommandations n'ont pas toujours été respectées lors d'un remplissage en mode dégradé. Le 13 juillet 2016, après seulement quelques mois de mise en service, la vanne de remplissage du bajoyer droit n'était plus en fonctionnement. Le remplissage se faisait donc en mode dégradé. L'effet attendu lors de ce remplissage est illustré à la Figure 1-21 [20].

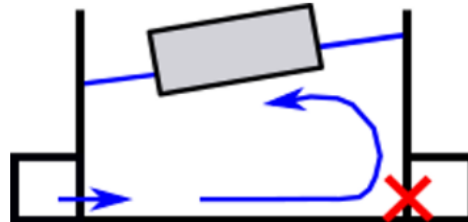


Figure 1-21: Mode dégradé [20]

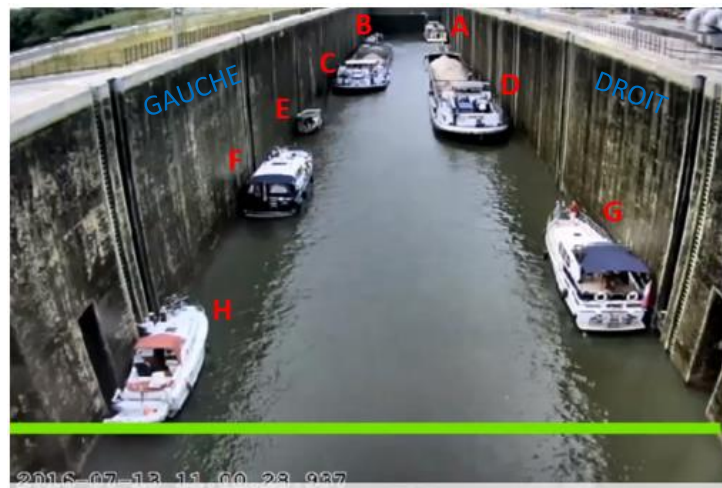


Figure 1-22: Photo du positionnement des bateaux à Lanaye [8]

Ce jour-là, lors d'un remplissage, les bateaux ont été placés tels que représenté à la Figure 1-22 [8]. On peut constater que les recommandations émises par la direction des recherches hydrauliques n'ont pas été respectées :

- Tous les bateaux auraient dû être amarrés uniquement sur le bajoyer gauche. Les bateaux A, D et G ont été mal placés.
- Deux bateaux ne peuvent pas être présents sur la même largeur. A et B, C et D, D et E ont été mal placés.

Quelques minutes après le début du sasement, la position des bateaux est visible à la Figure 1-23 [8]. Les bateaux A et D se sont éloignés du bajoyer droit. Probablement mal amarrés, ils ont été poussés vers le bajoyer opposé.

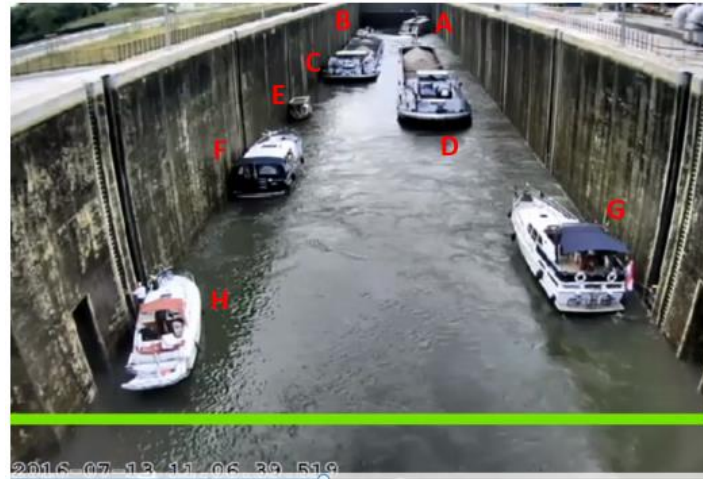


Figure 1-23: Photo de la situation après ouverture de la vanne [8]

Quelques minutes plus tard, la situation est encore plus critique. Comme on peut le voir sur la Figure 1-24 [8], le bateau A se rapproche dangereusement du B et le D est obligé de redémarrer ses moteurs pour éviter une collision avec les bateaux C et E.

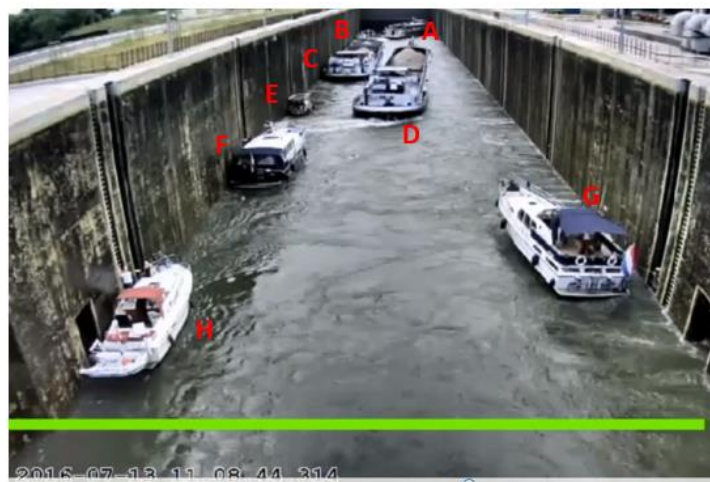


Figure 1-24: Photo de la situation critique [8]

Suite à cet incident, une nouvelle campagne d'essais a été réalisée afin de trouver une loi d'ouverture optimale, permettant de diminuer les pentes d'eau transversales tout en gardant un temps de sassement acceptable. La meilleure loi trouvée suite à cette campagne est une loi C qui, comparée à la loi A, est visible à la Figure 1-25 [20]. Cette loi suit la loi linéaire A pendant les 5 premières minutes jusqu'à un angle d'ouverture de 50°. Ensuite, elle reste constante sur un palier de 6 minutes. L'ouverture reprend enfin linéairement pour se terminer après 15 minutes.

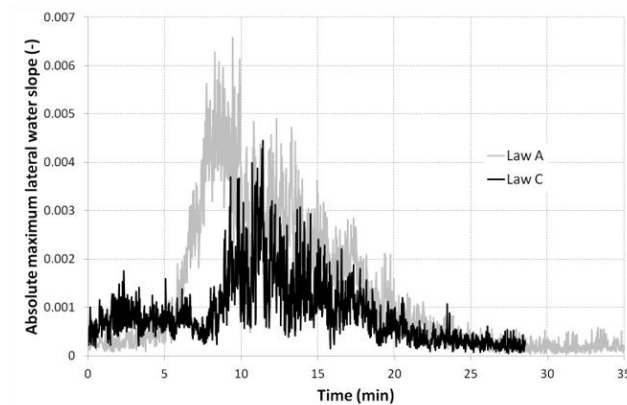


Figure 1-26: Pente d'eau en mode dégradé à Lanaye [20]

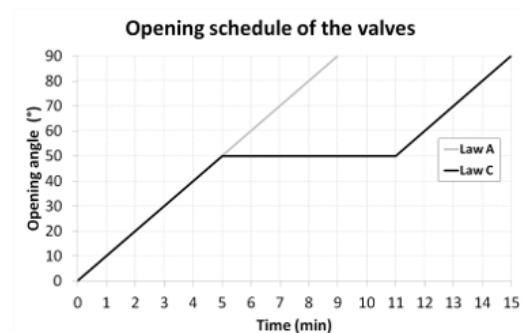


Figure 1-25: Loi d'ouverture A et C à Lanaye [20]

Les résultats pour cette nouvelle loi d'ouverture de vannes sont observables à la Figure 1-26 [20]. La pente transversale en mode dégradé atteint des valeurs plus faibles (4‰) que pour la loi A (6,5‰).

En plus des précédentes directives, il a été recommandé par la Direction des Recherches hydrauliques du SPW d'utiliser la loi C plutôt que la loi A lors d'un remplissage en mode dégradé. Cependant, la loi C n'est pas totalement satisfaisante pour garantir la sécurité des bateaux et de l'ouvrage.

Une attention particulière doit donc être apportée sur l'écluse de Lanaye lors d'un remplissage en mode dégradé. La vidange en mode dégradé ne semble pas induire des efforts importants sur les bateaux, les pentes d'eau dans le sas restant modérées. La connaissance des recommandations et une bonne communication entre éclusiers est primordiale pour assurer la sécurité de tous.

De manière à trouver des solutions plus efficaces pour limiter les efforts sur les bateaux en mode dégradé avec un tel système de remplissage, il est nécessaire d'étudier plus en détail l'écoulement lors de ces manœuvres. Outre les lois d'ouverture, certains éléments tels que la dimension des éjecteurs pourraient avoir une incidence. Il a, par exemple, été remarqué que les efforts transversaux sur l'écluse d'Ivoz-Ramet étaient moins importants que sur l'écluse de Lanaye. Les deux écluses possèdent le même système de remplissage-vidange, mais celle d'Ivoz-Ramet présente une chute plus faible, des débits de pointe inférieurs et des éjecteurs plus larges.

1.4 Les objectifs

La problématique de la 4^{ème} écluse de Lanaye mène à se poser plusieurs questions concernant le remplissage par aqueducs-larons en mode dégradé en particulier. Les objectifs de ce travail sont de :

- ❖ Comprendre les phénomènes hydrauliques qui ont menés aux observations sur le site de la 4^{ème} écluse de Lanaye. Ces observations étaient les suivantes :
 - La pente d'eau transversale observée est de 8 à 12 fois supérieure à la pente admissible établie en Belgique.
 - La pente d'eau diminue lorsque l'on joue sur la loi d'ouverture de la vanne.
 - Les bateaux amarrés du côté opposé à l'éjecteur fonctionnel sont poussés en direction du bajoyer fonctionnel.

En particulier, cela nous mène à vouloir :

- Décrire l'écoulement en travers du sas lors d'un remplissage en mode dégradé.
 - Établir le lien entre pentes d'eau et efforts d'amarrage transversaux.
 - Étudier l'influence de la loi d'ouverture de vanne sur les pentes d'eau et efforts d'amarrage.
 - Étudier l'influence de la position de la barge sur les efforts d'amarrage.
- ❖ Comprendre la raison pour laquelle les pentes d'eau transversales observées sur le site de Lanaye sont plus importantes que sur le site de Ivoz-Ramet. En particulier :
 - Étudier l'influence de la taille des éjecteurs sur le comportement de l'écoulement.

Pour répondre à ces objectifs, nous disposons du modèle réduit de l'écluse de Lanaye au laboratoire de la Direction des Recherches hydrauliques du Service public de Wallonie (SPW) à Châtelet.

- Afin de décrire et de schématiser l'écoulement en travers du sas, nous avons effectué des mesures de vitesses de l'eau lors du remplissage de l'écluse.
- Des mesures de pentes d'eau et de forces exercées sur une barge située dans le sas ont été réalisées pour établir le lien entre ces deux grandeurs.
- Afin d'étudier l'influence de la loi d'ouverture de vanne sur les pentes d'eau et efforts d'amarrage, nous avons effectué des essais pour trois lois d'ouverture de vanne différentes.
- Pour comprendre l'influence de la taille des éjecteurs sur le comportement de l'écoulement, nous avons réalisé de nouveaux essais en réduisant la taille des éjecteurs de moitié.
- Afin d'étudier l'influence de la position de la barge sur les efforts d'amarrage, différents essais ont été réalisés étudiant trois positions transversales de la barge au sein du sas.

Enfin, pour résumer, les objectifs globaux de cette recherche sont :

Premièrement, de comprendre l'ampleur du phénomène d'efforts d'amarrage transversaux par rapport à celui des efforts longitudinaux, dans une écluse à aqueducs larrons lors d'un remplissage en mode dégradé.

Deuxièmement, de trouver pour la 4^{ème} écluse de Lanaye des solutions permettant une meilleure sécurité lors d'un sassement en mode dégradé.

Troisièmement, d'anticiper et de limiter au maximum les efforts d'amarrage lors de la conception d'une nouvelle écluse.

2 LES EFFORTS D'AMARRAGE : ÉTAT DE L'ART

2.1 Différentes composantes des efforts d'amarrage

Les efforts d'amarrage, qu'ils soient longitudinaux ou transversaux, sont composés de plusieurs composantes hydrauliques.

Dans la littérature, on retrouve essentiellement des illustrations relatives aux efforts longitudinaux lors d'un remplissage par les têtes. Cette situation est transposable aux efforts transversaux lors d'un remplissage en mode dégradé. Il faut alors considérer les schémas de la littérature non pas comme des coupes longitudinales du sas mais comme des coupes transversales.

Les différentes composantes hydrauliques sont schématisées à la Figure 2-2 [9] :

- La différence de niveau d'eau ou **pente d'eau** (Figure 2-2.a) : Cette différence de niveau d'eau induit une pression hydrostatique sur le bateau. Cette composante hydrostatique peut être positive ou négative (comme indiqué sur la Figure 2-2.a) étant donné les mouvements possibles de va-et-vient de l'eau au travers du sas lors d'un remplissage asymétrique.
- La force due à la diminution de la **quantité de mouvement** (Figure 2-2.b) : La quantité de mouvement est proportionnelle au produit de la vitesse de l'eau et du débit. Au plus on s'éloigne du jet de l'éjecteur, au plus la vitesse diminue. Cela implique une quantité de mouvement décroissante. Cette diminution de quantité de mouvement induit une différence de niveau d'eau négative, menant à une force négative appliquée sur la barge.
- Le **frottement** de l'eau (Figure 2-2.c) : Appliqué sur la coque du navire, il résulte en une force qui entraîne le bateau dans la direction positive. Appliqué sur les parois du sas, il résulte en une différence de niveau d'eau induisant une force positive également. Cette composante est néanmoins négligeable devant les autres composantes et cela a été confirmé dans le travail expérimental réalisé par Tom Heinz [12]. C'est pourquoi, on ne tiendra pas compte de cette composante dans la suite de ce travail.
- L'action des **jets d'eau** (Figure 2-2.d) : En début de remplissage, les jets d'eau viennent directement frapper la coque de la barge à grande vitesse. Cela engendre une contribution positive à la force d'amarrage. Cet effet ne se présente qu'en remplissage et qui plus est, uniquement en début de remplissage où la vitesse des jets est importante et où le matelas d'eau dans le sas est faible. Dans certains cas, les jets d'eau peuvent entraîner la masse d'eau dans un mouvement de rotation et il existe alors également une contribution négative à la force d'amarrage, due au retour de l'eau dans la partie supérieure du matelas d'eau.

En résumé, deux composantes majeures de la force d'amarrage se distinguent :

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

2. LES EFFORTS D'AMARRAGE : ÉTAT DE L'ART

Comme l'illustre la Figure 2-1 [9], dans le cadre de l'effort d'amarrage longitudinal, la composante majeure de celui-ci est la composante hydrostatique. Cette théorie a effectivement été vérifiée dans les travaux de fin d'étude de T. Heinz [12], de P.A. Reding [19] et de R. Magotteaux [15]. Dans le cadre de l'effort d'amarrage transversal en remplissage dégradé, peu d'études ont été faites à ce sujet et l'un des objectifs de ce travail est de mettre en évidence la part de la composante hydrodynamique dans ces efforts.

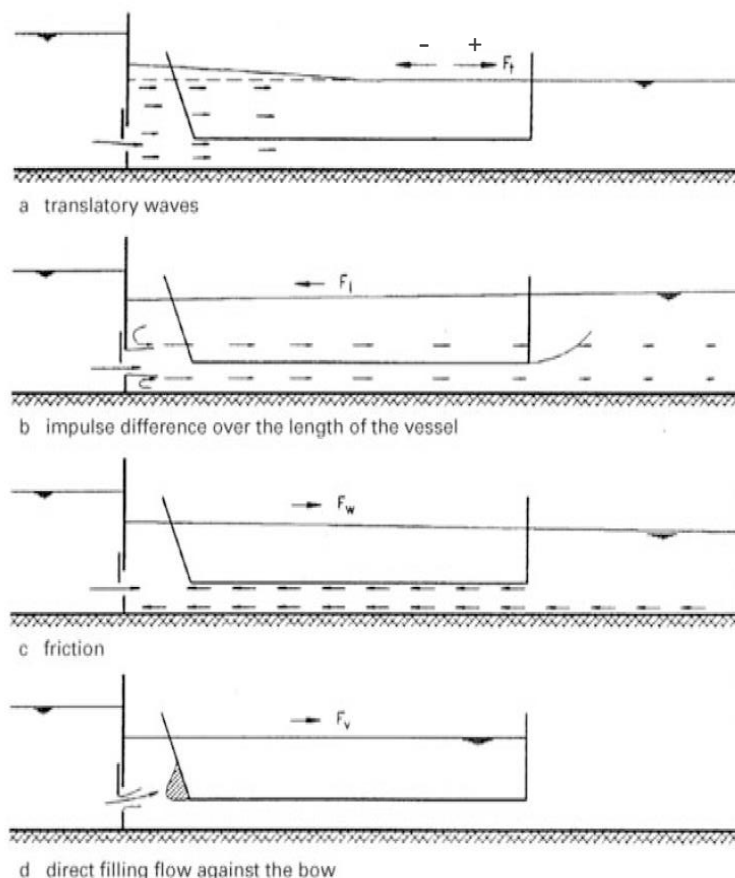


Figure 2-2: Les différentes composantes de l'effort d'amarrage [9]

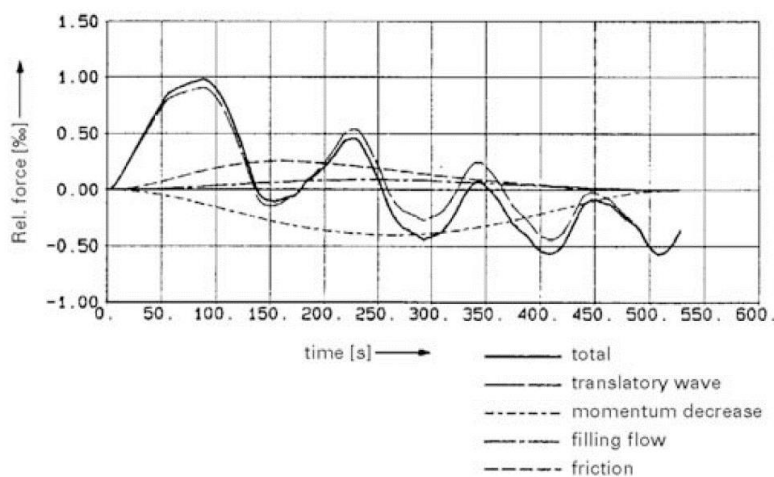


Figure 2-1: Les différentes composantes de l'effort d'amarrage [9]

2.2 Force hydrostatique

La composante hydrostatique de la force d'amarrage peut être évaluée à partir de la pente d'eau dans le sas. De la même manière qu'un objet placé sur une pente subit une force dans le sens de la pente, proportionnelle à son poids, la barge en flottaison subit une force proportionnelle à son poids propre et à la pente d'eau (Figure 2-3 [15]) :

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

Où :

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

P [kN] : le poids de la barge

θ_w [°] : l'angle d'inclinaison du plan d'eau

L'angle d'inclinaison d'une telle pente d'eau est généralement très petit, si bien que l'on peut faire l'approximation :

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

Où :

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

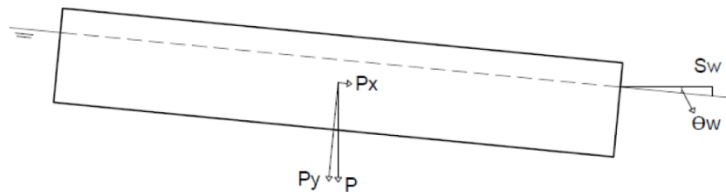


Figure 2-3: Inclinaison du plan d'eau [15]

2.3 Force hydrodynamique

Le débit d'eau entrant dans le sas d'une écluse entraîne une vitesse de l'eau qui exerce une pression hydrodynamique sur la coque de la barge. La pression hydrodynamique p_{hd} d'un fluide est définie par :

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

Où : p_{hd} [kN/m²], v [m/s] est la vitesse de l'eau et ρ_w [kg/m³] est sa densité ($\rho_w = 1000$ [kg/m³])

On peut, analytiquement, exprimer la composante hydrodynamique de la force d'amarrage F_{hd} [kN] comme la force de trainée résultant du bilan des pressions sur les faces avant et arrière de la barge :

$$F_{hd} = C_T \cdot \Delta p_{hd} \cdot h_v \cdot B_v$$

Où : C_T [-] est le coefficient de trainée, B_v [m] est la largeur de la barge et h_v [m] est son tirant d'eau (son enfoncement).

La difficulté d'estimer cette composante réside donc dans celle à estimer les champs de vitesses au sein du sas, lors de l'opération de sassement. L'un des objectifs de ce travail est de tenter d'évaluer ces champs de vitesses grâce à des mesures sur modèle réduit pour un remplissage en mode dégradé.

2.4 Critères de sécurité existants

Dans le sas de l'écluse, pendant les opérations de sassement, il est recommandé aux bateaux de s'amarrer à l'aide de deux amarres au minimum, l'une à la proue et l'autre à la poupe.

Les configurations d'amarrage recommandées en fonction du type de bateau sont illustrées à la Figure 2-4 [3] :

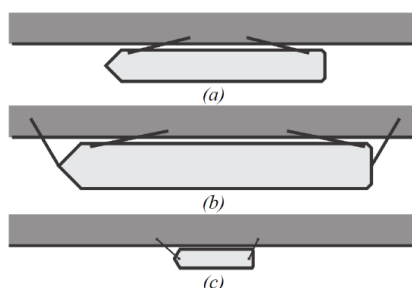


Figure 2-4: (a) Bateau de navigation intérieure (b) Bateau maritime (c) Bateau de plaisance [3]

On ne présentera dans cette section que les critères existants pour la navigation intérieure, faisant l'objet de cette étude (Figure 2-4.a).

Le critère de sécurité (C) concernant la force d'amarrage totale est généralement exprimé sous la forme d'une fraction du poids du bateau, en ‰ :

$$F_{max} = C \cdot P \quad [kN]$$

Où $P[kN]$ est le poids du bateau.

$$C = \frac{F_{max}}{P} * 1000 \quad [\text{‰}]$$

En Belgique et aux Pays-Bas, le critère n'est actuellement établi que pour des efforts d'amarrage longitudinaux. En Belgique, le critère sécuritaire est de 0,5 ‰ pour tout type de bateau et le critère maximum est de 1 ‰ [6].

Aux Pays-Bas, le critère de sécurité pour les efforts d'amarrage longitudinaux varie en fonction du type de bateau comme illustré à la Figure 2-5 [9]. Au plus le bateau est grand, au plus le critère est sévère.

vessel class	hawser force criteria (‰ of total water displacement)	
	in filling	at emptying or filling with floating bollards
CEMT class III	1.50	2.00
CEMT class IV	1.10	1.50
CEMT class Va	0.85	1.15

Figure 2-5: Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux aux Pays-Bas [9]

Les tonnages de bateaux de classe III, IV et Va sont en moyenne de 800 T, de 1350 T et de 2000 T, respectivement [22].

En remplissage, le critère est plus sécuritaire qu'en vidange (ou en remplissage avec système d'amarrage par bollards flottants¹). En effet, en vidange, la dissipation de l'énergie se fait dans le bief aval tandis qu'en remplissage, elle a lieu dans le sas où elle provoque plus de perturbations.

¹ Système d'amarrage qui suit l'évolution du plan d'eau par flottaison

2. LES EFFORTS D'AMARRAGE : ÉTAT DE L'ART

En ce qui concerne les efforts d'amarrage transversaux, on dispose des critères de sécurité établis par l'Allemagne et la Chine à la Figure 2-6 [17] et à la Figure 2-7 [25] respectivement (exprimés en kN). Les Tableau 2-1 et Tableau 2-2 reprennent ces critères, exprimés en ‰.

Tonnage (T)	≥ 3120	1665	280
Effort longitudinal maximum (‰)	1,1	0,9	0,8
Effort transversal maximum (‰)	0,54	0,45	0,39

Tableau 2-1: Critère de sécurité : efforts d'amarrage transversaux et longitudinaux en Allemagne

Tonnage (T)	3000	2000	1000	500	300	100	50
Effort longitudinal maximum (‰)	1,6	2	3,3	5,1	6,1	8,2	10,2
Effort transversal maximum (‰)	0,8	1	1,6	2,7	3,1	4,1	6,1

Tableau 2-2: Critère de sécurité : efforts d'amarrage transversaux et longitudinaux en Chine

On remarque que le critère sur l'effort d'amarrage transversal est plus sécuritaire que le critère sur l'effort d'amarrage longitudinal.

Pour des tonnages de barge élevés (≥ 3000 T) on retiendra, pour les efforts transversaux, un critère de 0,5 ‰. Ce critère est donc sécuritaire pour les autres types de bateaux.

Vessel displacement [t]	Vessel weight force [kN]	Allowable longitudinal hydrodynamic force [kN]	Allowable transversal hydrodynamic force [kN]
280	2,750	3.0	1.5
1,665	16,330	14.8	7.4
≥ 3,120	≥ 30,600	23.5	11.8

Figure 2-6: Critère de sécurité : efforts d'amarrage latéraux et longitudinaux en Allemagne [17]

Vessel Tonnage (t)	3000	2000	1000	500	300	100	50
Horizontal longitudinal components of allowable mooring forces (kN)	46	40	32	25	18	8	5
Horizontal transverse components of allowable mooring forces (kN)	23	20	16	13	9	4	3

Figure 2-7: Critère de sécurité : efforts d'amarrage latéraux et longitudinaux en Chine [25]

3 APPROCHE EXPÉRIMENTALE : DESCRIPTION DU MODÈLE RÉDUIT

Dans le cadre de cette étude, l'outil principal utilisé a été le modèle réduit de la quatrième écluse de Lanaye. Ce modèle se trouve au laboratoire de la Direction des Recherches hydrauliques du Service public de Wallonie (SPW) à Châtelet (Figure 3-1).



Figure 3-1: Hall du laboratoire de la Direction des Recherches hydrauliques

3.1 Dimensions du modèle

Le système de remplissage de l'écluse de Lanaye est un système de remplissage par aqueducs-larrons dont une disposition type est représentée sur la Figure 3-2 [15].

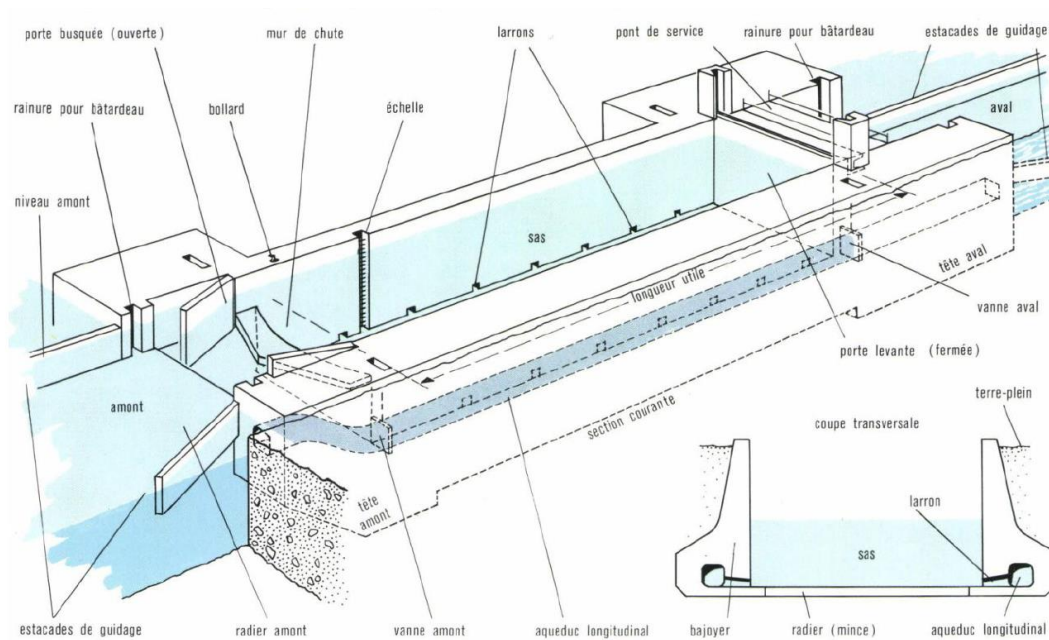


Figure 3-2: Disposition type d'une écluse à aqueducs-larrons [15]

3. APPROCHE EXPÉRIMENTALE : DESCRIPTION DU MODÈLE RÉDUIT

Le modèle réduit du laboratoire de la Direction des Recherches hydrauliques est visible à la Figure 3-3, sans la présence de la barge et à la Figure 3-4 en présence de la barge.

Il a été réalisé à l'échelle 1:25. Une des dimensions n'est cependant pas à l'échelle. La largeur du sas est de 0,72 m et aurait dû être de 1 m. Cela s'explique par le fait que la largeur de la 4ème écluse de Lanaye était initialement prévue à 18 m mais a finalement été construite à 25 m.

Il en résulte que les résultats obtenus sur le modèle réduit ne correspondent pas avec exactitude à ceux obtenus sur site mais permettent déjà de tirer des conclusions intéressantes quant aux phénomènes hydrauliques qui ont lieu et à l'influence de certains paramètres.



Figure 3-4: Photo du sas sans la présence de la barge



Figure 3-3: Photo du sas en présence de la barge

Le modèle est constitué de plusieurs éléments :

- Le bief amont qui simule le cours d'eau alimentant l'écluse. Il est alimenté en eau par une pompe et est équipé d'un déversoir en labyrinthe qui permet de garder un niveau constant dans le bief.
- Le sas qui contiendra les différents capteurs et la barge.
- Le système de remplissage qui est composé de deux aqueducs longeant les bajoyers. Ils sont équipés de vannes papillon à leurs extrémités.
- Le bief aval est aussi équipé d'un déversoir qui permet d'assurer un niveau d'eau constant. Le déversoir est réglé de sorte que la chute d'eau soit de 58 cm.
- Une barge dont les dimensions sont de 7,2m de long, 0,5m de large et 0,3m de haut. Ces dimensions sont proches d'un convoi de classe Vb à l'échelle 1:25. La barge est équipée d'une multitude de capteurs qui seront détaillés plus loin dans ce travail. La masse totale de la barge est de 602,7kg.

Les dimensions principales du modèle sont reprises à la Figure 3-5 et au Tableau 3-1. Les plans du modèle réduit sont disponibles à l'annexe 10.1.

3. APPROCHE EXPÉRIMENTALE : DESCRIPTION DU MODÈLE RÉDUIT

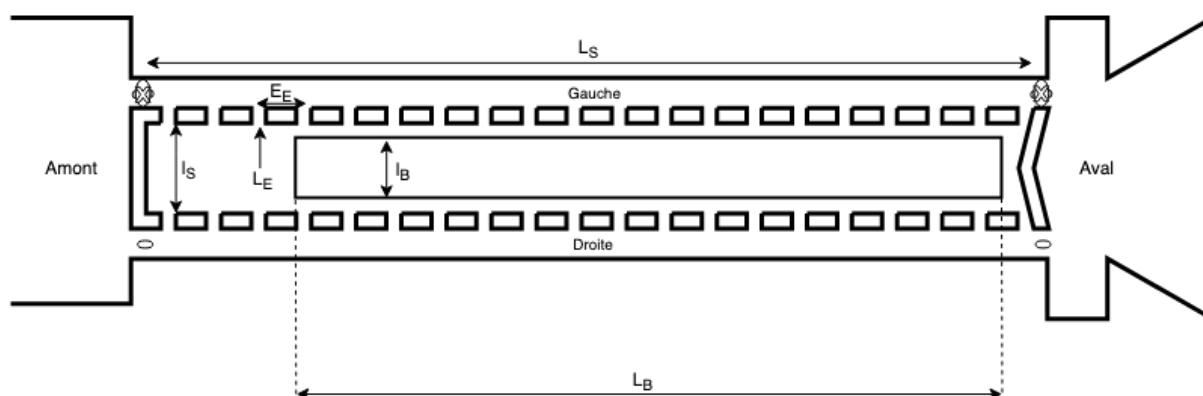


Figure 3-5: Dimensions principales du modèle réduit

Notation	Description	Valeur
L_S	Longueur du sas	900 cm
I_S	Largeur du sas	72 cm
L_B	Longueur de la barge	720 cm
I_B	Largeur de la barge	50 cm
L_E	Largeur de l'éjecteur	8 cm
H_E	Hauteur de l'éjecteur	1 cm
E_E	Entraxe entre éjecteurs	36 cm

Tableau 3-1: Dimensions principales du modèle réduit

3.2 Système de remplissage par aqueducs-larrons

Le système de remplissage utilisé est un système par aqueducs et larrons. Comme expliqué précédemment, deux aqueducs longent les bajoyers de chaque côté. Ces aqueducs sont en Plexiglas pour avoir un visuel pendant le remplissage et prévenir tout problème d'encrassement. Ils relient le bief amont au sas puis le sas au bief aval. La liaison avec le sas se fait par les larrons répartis sur la longueur du sas. Ils sont au nombre de 20 sur chaque bajoyer.

Le système de remplissage et vidange est contrôlé par 4 vannes papillons pouvant permettre un remplissage ou une vidange en mode normal ou dégradé. Chaque ouverture de vanne peut être contrôlée indépendamment. Les temps d'ouvertures peuvent être contrôlés à distance grâce au logiciel HydroCap3.

Les éjecteurs à la sortie des larrons ont une dimension de 8 cm de largeur et une hauteur de 1 cm. Une photo de l'éjecteur de référence est visible à la Figure 3-6.

Afin d'étudier l'influence de la taille de l'éjecteur lors d'un remplissage en mode dégradé, un dispositif a été créé pour réduire la surface de sortie de l'éjecteur. Les dimensions de l'éjecteur réduit sont de 4 cm de largeur et 1 cm de hauteur. Une photo de l'éjecteur réduit est visible à la Figure 3-7.

Ces dimensions sont résumées au Tableau 3-2.

	Éjecteur de référence	Éjecteur réduit
Largeur [cm]	8	4
Hauteur [cm]	1	1

Tableau 3-2: Dimensions des éjecteurs



Figure 3-6: Photo : éjecteur de référence



Figure 3-7: Photo : éjecteur réduit

3.3 Système d'amarrage du modèle

La barge du modèle réduit est maintenue en place grâce à deux axes verticaux traversant la celle-ci, comme illustré aux Figure 3-8 et Figure 3-9. Chaque axe vertical possède une base carrée posée sur le fond du sas et est maintenu fixe grâce à un portique, visible à la Figure 3-10.

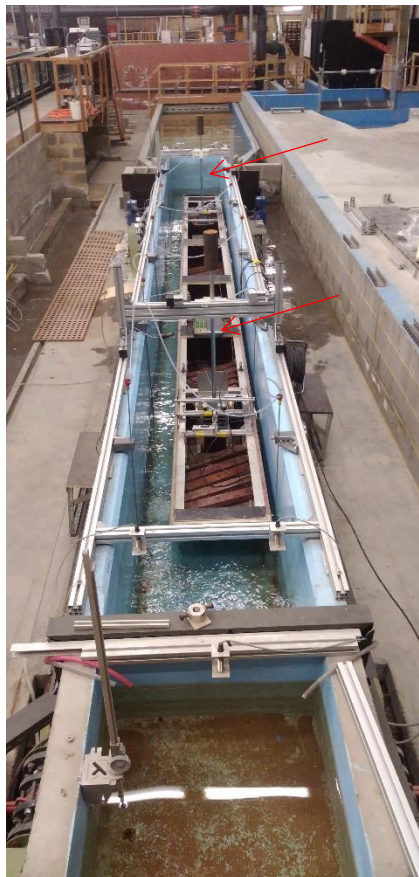


Figure 3-8: Axes verticaux du système d'amarrage



Figure 3-9: Axe vertical traversant la barge

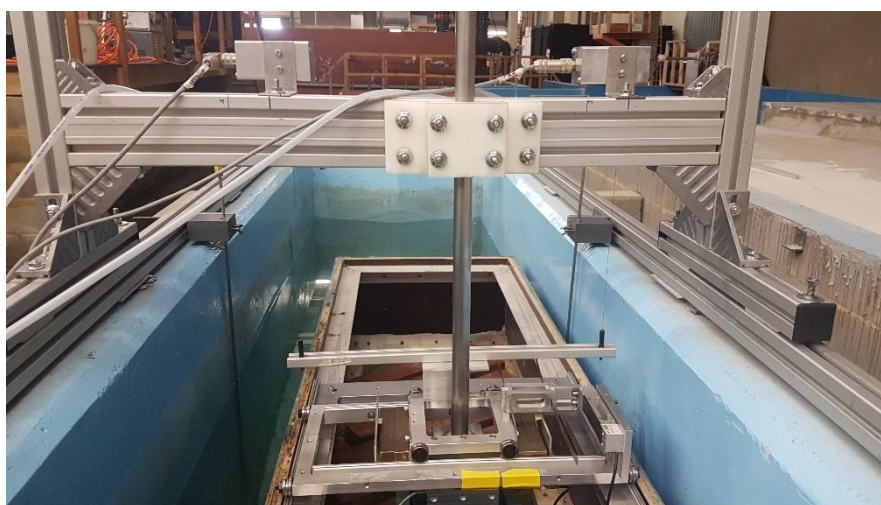


Figure 3-10: Système de fixation de l'axe vertical

3. APPROCHE EXPÉRIMENTALE : DESCRIPTION DU MODÈLE RÉDUIT

Un plateau contenant les différents capteurs relie la barge à l'axe (Figure 3-11 [15]). Ce système permet de mesurer les forces exercées sur la barge lors d'un sassement, ainsi que le roulis et le tangage subis par celle-ci. Durant le sassement, le coulisement vertical sans frottement est permis grâce à l'axe mais les mouvements longitudinaux et transversaux sont repris via les jauges de déformation.

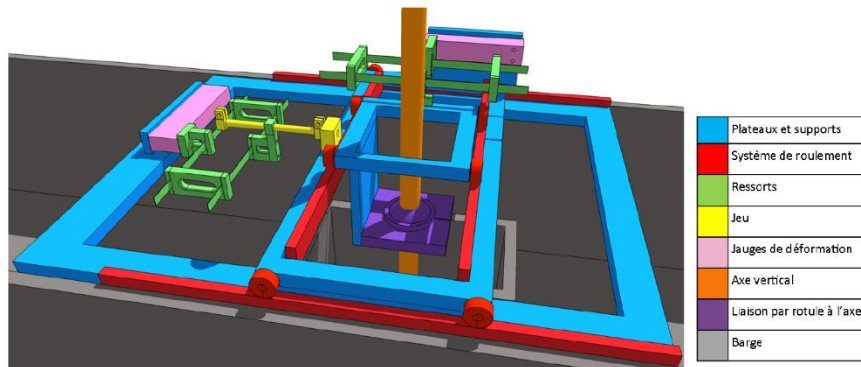


Figure 3-11: Plateau muni des capteurs reliant la barge à l'axe vertical [15]

Les amarres réelles sont généralement réalisées en nylon et présentent une certaine élasticité qui peut ou non être représentée sur le modèle réduit. Afin de pouvoir simuler l'élasticité des amarres, plusieurs configurations sont possibles au niveau de la liaison entre la barge et l'axe.

Ensuite, afin d'étudier les effets d'une amarre non tendue au début du sassement, un second mécanisme permet de rajouter un jeu aux amarres.

Ces différents mécanismes sont visibles aux Figure 3-12 et Figure 3-13.

Dans le cadre de ce travail, nous avons décidé d'étudier le cas d'amarres rigides et sans jeu. C'est la configuration de la Figure 3-13.

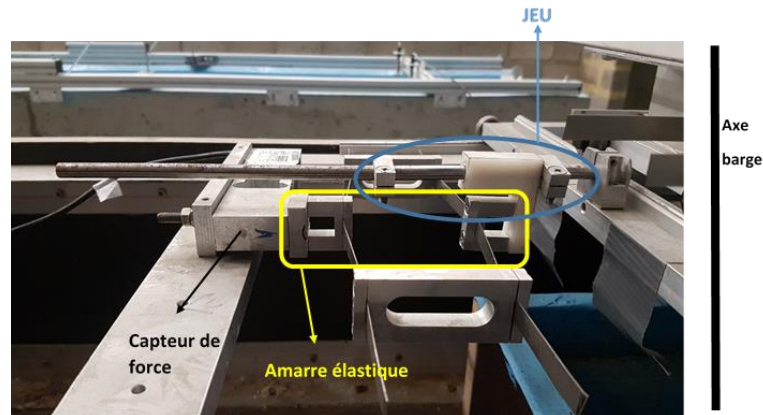


Figure 3-12: Amarre élastique et avec jeu

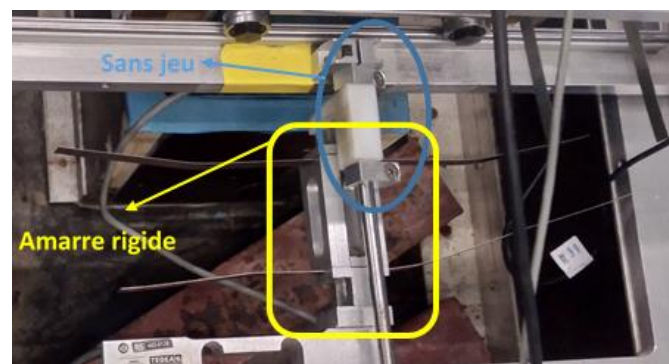


Figure 3-13: Amarre rigide et sans jeu

3.4 Dispositifs de mesure

Afin de réaliser les mesures de cette étude, introduites à la section 1.4 Les objectifs, plusieurs capteurs ont été utilisés (Figure 3-14) :

- Des capteurs de niveau à ultrasons (US)
- Des capteurs de pression différentielle (P_{dif})
- Des capteurs de position à corde
- Des jauges de déformation (F)
- Des sondes de vitesses électromagnétiques

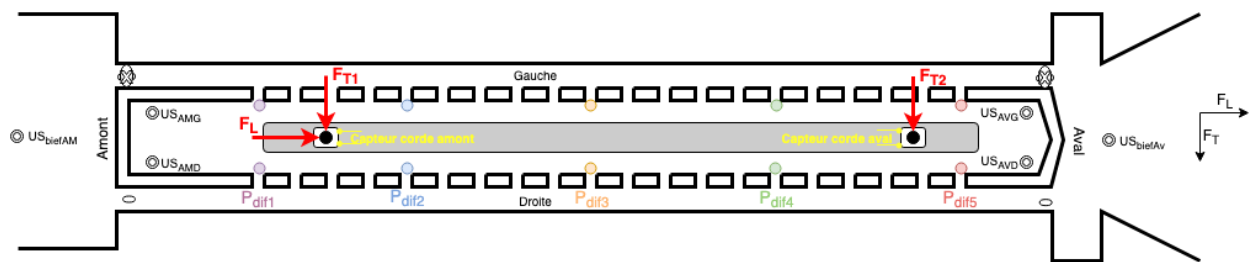


Figure 3-14: Dispositifs de mesures

3.4.1 Capteurs de niveau à ultrasons

Ces capteurs permettent de mesurer la distance entre le capteur et la surface libre en émettant un train d'ondes ultrasons qui est réfléchi par celle-ci. En mesurant le temps nécessaire à l'onde pour revenir au capteur et connaissant la vitesse de propagation de l'onde dans l'air, la distance est ainsi déterminée. [1]

Le modèle réduit est équipé de 6 capteurs, de type *Baumer Unam18U6903*. Ils ont une résolution de 0,3 mm mais renvoient un signal bruité dû aux mouvements d'eau dans le sas.

Quatre de ces capteurs sont placés dans le sas, un autre dans le bief amont et le dernier dans le bief aval (Figure 3-14).

Les capteurs présents dans le sas permettent la mesure de la courbe de remplissage et de vidange et ainsi d'en déduire les courbes de débits ou hydrogrammes. Les deux capteurs placés dans les biefs permettent le contrôle des niveaux d'eau amont et aval. L'un de ces capteurs est visible à la Figure 3-15 [12] avec son boîtier d'attache.

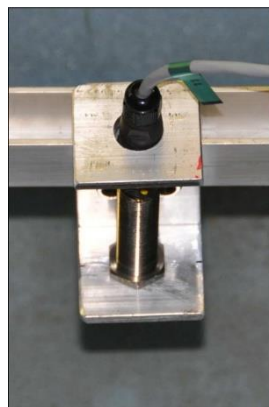


Figure 3-15: Capteur de niveau à ultrasons BAUMER

3.4.2 Capteurs de pression différentielle

La mesure de la différence de niveau d'eau entre deux points se fait grâce aux capteurs de pression différentielle. Cette mesure permet ensuite d'en déduire la pente d'eau.

Le capteur est constitué d'un boîtier circulaire dans lequel deux chambres sont séparées par une membrane flexible. Chacune des deux chambres est reliée à l'endroit où on souhaite mesurer la différence de niveau. Si les tuyaux et la chambre sont parfaitement remplis d'eau, la pression du côté de la membrane ayant le plus haut niveau d'eau sera la plus élevée (Figure 3-17 [12]).

Le modèle est équipé de cinq capteurs de pression différentielle de type YOKOGAWA EJA110E. Ils mesurent la pente d'eau transversale en cinq points différents sur la longueur du sas (Figure 3-14). Leur gamme de mesure est de ± 50 mm avec une précision d'environ 0,02 mm (Figure 3-16) [26]. [1]

Pour ce type de mesures, des essais préliminaires ont été réalisés pour déterminer le type de tubes à réaliser et à introduire dans le sas pour la prise de mesure. Ces résultats sont présentés en détail à l'annexe 10.3. Les conclusions ont mené au choix de tubes à ouverture sur le côté (Figure 3-18) positionnés à une hauteur de 25 cm pour la prise de pression (Figure 3-19). Cette position permet une prise de pression la plus proche possible de la pression hydrostatique.

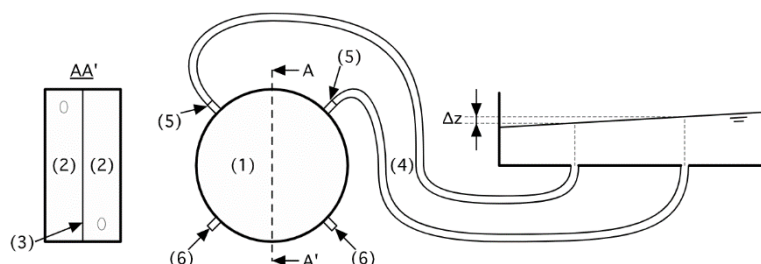


Figure 3-16: Principe de fonctionnement du capteur de pression différentielle [12]



Figure 3-17: Capteur de pression différentielle YOGOGAWA[26]



Figure 3-18: Tube à ouverture sur les côtés



Figure 3-19: Position des tubes sur une coupe longitudinale du sas

3.4.3 Capteurs de position à cordes

Le capteur à cordes permet la mesure dynamique d'une distance. Un fin câble est enroulé autour d'une poulie à ressort équipée d'un potentiomètre. Ce dernier permet de connaître la longueur de câble déroulé. Le ressort permet l'enroulement automatique du câble. [1]

La barge est équipée de quatre capteurs de position de type *ASM WS10SG* ; deux à la proue et deux à la poupe (Figure 3-14). Comme ces capteurs renvoient la distance entre la barge et le capteur, ils permettent d'en déduire le roulis et le tangage du bateau par différence de deux mesures.

Un capteur à corde est visible à la Figure 3-20.



Figure 3-20: Capteur de position à corde ASM

3.4.4 Jauges de déformation

Les efforts subis par la barge sont mesurés au moyen de jauges de déformation. Elles mesurent la déformation d'un matériau au moyen d'une petite résistance collée dessus dont la valeur varie avec la déformation de celle-ci.

Trois jauges de déformation ont été installées sur la barge : deux mesurant les efforts transversaux et une mesurant l'effort longitudinal (Figure 3-14).

Les trois jauges utilisées sont de type TEDEA-HUNTLEIGH et ont une plage de mesure allant jusqu'à 30N avec une précision de 0,006 N. [1]

L'une des sondes utilisées est visible à la Figure 3-21.



Figure 3-21: Jauge de déformation TEDEA-HUNTLEIGH

3.4.5 Sondes de vitesses électromagnétiques

Les sondes électromagnétiques de vitesse mesurent la vitesse de l'eau selon deux directions perpendiculaires. Le principe de fonctionnement est basé sur le déplacement d'un champ magnétique à travers un liquide conducteur. Deux paires d'électrodes de platine diamétralement opposées détectent les tensions induites produites par l'écoulement au-delà de la sonde (Figure 3-22). La sonde a été conçue de telle sorte que ces tensions soient proportionnelles à la vitesse du liquide parallèle au plan des électrodes. [1]

Plusieurs sondes coudées ont été utilisées dans le sas sans la présence de la barge (Figure 3-23).

Les sondes utilisées sont de type PEMS de WL Delft Hydraulics. La gamme de vitesse mesurable est de $\pm 2,5$ m/s avec une précision de 0,01 m/s. [4]



Figure 3-23: Sonde de vitesse PEMS



Figure 3-22: Tête de sonde de vitesse PEMS

3.5 Lois d'ouverture des vannes

Afin de réduire l'agitation du sas, il est possible de jouer sur différentes lois d'ouverture des vannes. Il existe, en théorie, plusieurs lois d'ouverture possibles :

- Ouverture instantanée : La vanne est ouverte instantanément. C'est une loi simplifiée, impossible à réaliser.

$$\omega_1(t) = 0 \text{ quand } t < 0$$

$$\omega_1(t) = \Omega_1 = \text{cste} \text{ quand } t \geq 0$$

- Ouverture linéaire : Le passage de 0° à 90° se fait à vitesse angulaire constante.

$$\omega_2(t) = \Omega_2 * \frac{t}{T}$$

Où T est la durée totale de sasement.

- Ouverture quadratique : La vanne est actionnée pour que son ouverture soit fonction du carré du temps.

$$\omega_3(t) = \Omega_3 * \frac{t^2}{T^2}$$

- Ouverture complexe : La vanne peut être ouverte de manière bilinéaire ou par paliers : ouverture linéaire jusqu'à un certain angle puis constante, ensuite linéaire à nouveau et ainsi de suite jusqu'à ouverture totale de la vanne.

La Figure 3-25 [2] illustre ces lois théoriques, en supposant un temps de sasement T identique pour chacune d'elles. On note que pour atteindre cet objectif, la taille de la vanne doit être multipliée par le facteur repris en ordonnée. L'exemple d'ouverture complexe représenté est une ouverture linéaire jusqu'à la moitié du sasement, puis constante à ouverture maximale jusqu'à la fin du sasement. Il existe d'autres ouvertures complexes, comme expliqué plus haut.

Dans le cadre de cette étude, la seule loi d'ouverture étudiée est la loi d'ouverture linéaire. On peut néanmoins jouer sur le temps d'ouverture de cette loi linéaire. Les temps d'ouverture envisagés dans cette étude sont 30s, 60s et 90s, comme le montre la Figure 3-24, illustrant l'ouverture de la vanne amont gauche du modèle réduit. Un temps d'ouverture de 30s signifie que la vanne passe de 0° à 90° en 30s avec une vitesse angulaire constante.

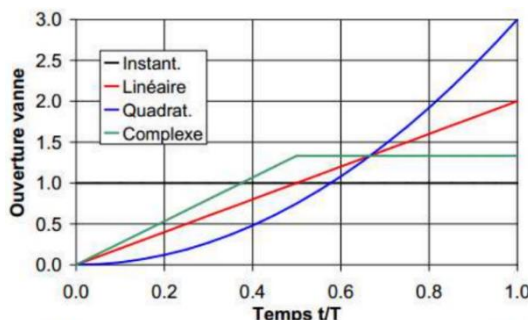


Figure 3-25: Différentes lois d'ouverture de vannes [2]

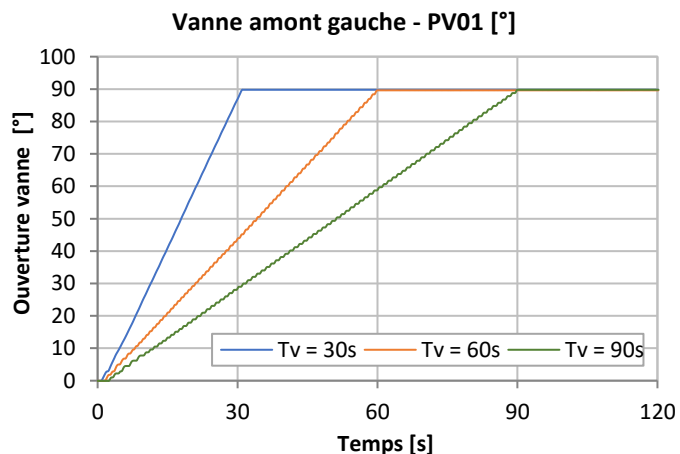


Figure 3-24: Lois d'ouverture linéaires en 30s, 60s et 90s

3.6 Procédure des essais

Les tests qui ont été réalisés sur le modèle réduit ont été faits en trois étapes.

- Dans un premier temps, des tests ont été réalisés sans la présence de la barge dans le sas. Cela nous a permis d'étudier les pentes d'eau en mode dégradé et en mode normal sans barge.
- Dans un second temps, nous avons pu mesurer et étudier les champs de vitesses dans le sas pour un remplissage en mode dégradé.
- Enfin, la barge a été introduite dans le sas. Nous avons pu étudier, en présence de la barge, les pentes d'eau, les efforts longitudinaux et transversaux et la pente de roulis de la barge.

On retrouve aux figures suivantes les différentes configurations d'essais réalisés avec l'emplacement des capteurs.

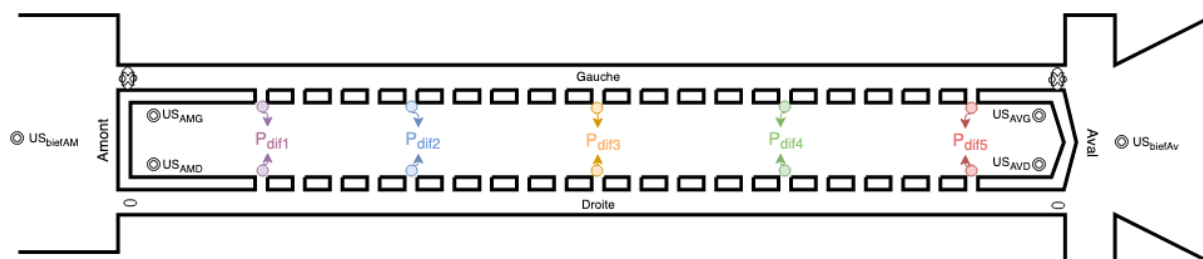


Figure 3-27: Mesures de pentes d'eau au droit des éjecteurs

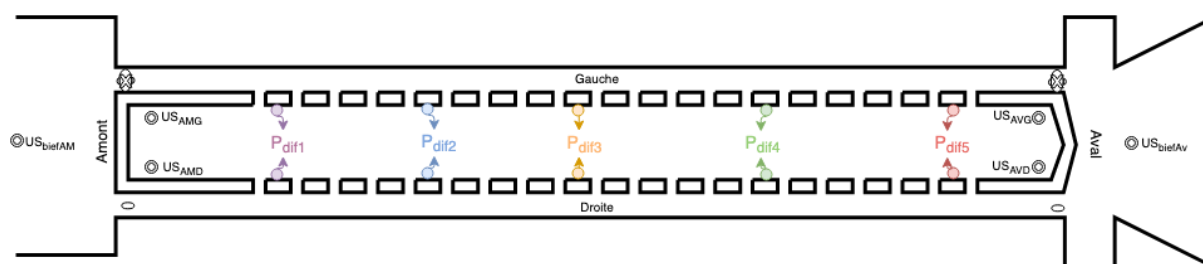


Figure 3-26: Mesures de pentes d'eau entre éjecteurs

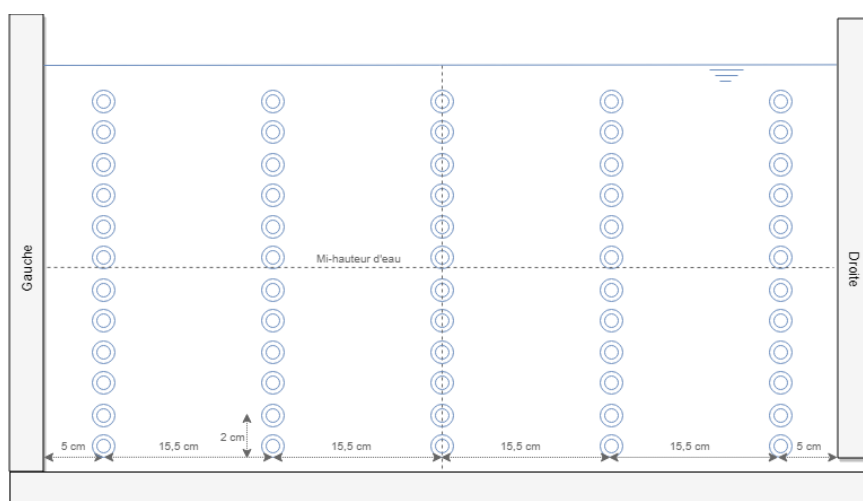


Figure 3-28: Emplacements de prises de vitesses

Le niveau d'eau visible à la Figure 3-28 est le niveau bas du sas. Il n'a pas été possible de prendre des mesures de vitesses dans la tranche d'eau correspondant à la hauteur de chute car les sondes devaient en permanence rester immergées.

3. APPROCHE EXPÉRIMENTALE : DESCRIPTION DU MODÈLE RÉDUIT

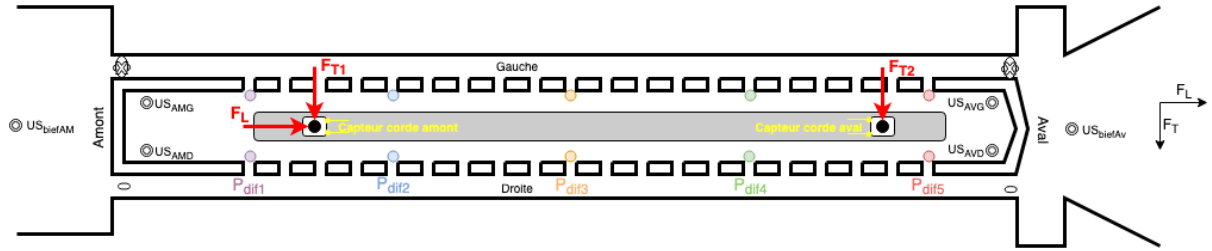


Figure 3-30: Mesures de pentes d'eau, forces d'amarrage et roulis pour la barge centrée

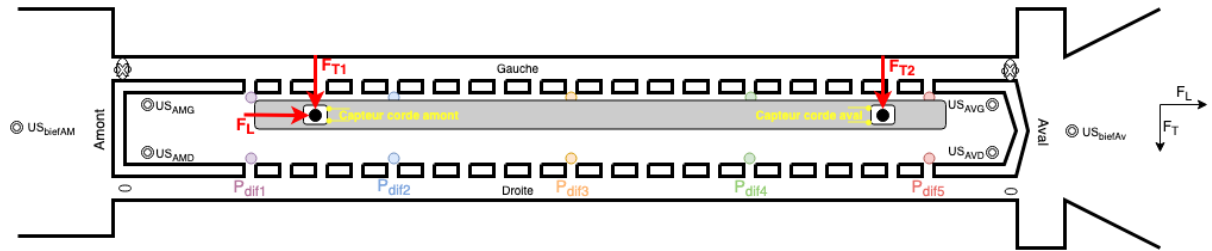


Figure 3-29: Mesures de pentes d'eau, forces d'amarrage et roulis pour la barge amarrée au bajoyer gauche

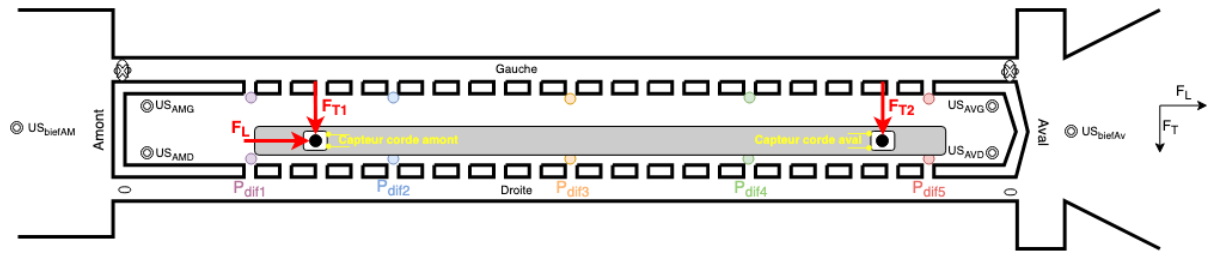


Figure 3-31: Mesures de pentes d'eau, forces d'amarrage et roulis pour la barge amarrée au bajoyer droit

Afin de pouvoir facilement comparer les données de pentes, de forces et de roulis, les mesures brutes prises par les différents capteurs ont été adimensionnalisées :

- La différence de niveau d'eau Δh [m] mesurée par les capteurs de pression différentielle a été divisée par la largeur du sas l_s [m]. Ainsi, la pente d'eau est donnée par :

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

- La différence de niveau de la barge Δr [m], déduite des distances verticales mesurées par les capteurs à cordes a été divisée par la distance horizontale l_c [m] entre ces deux capteurs. Ainsi, le roulis est déterminé par :

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

- La force f [N] mesurée par les jauges de déformations a été divisée par le poids P [N] de la barge. Ainsi la force d'amarrage est adimensionnalisée par :

$$F = \frac{f}{P} * 1000 [\text{‰}]$$

4 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les mesures réalisées au laboratoire de la Direction des Recherches hydrauliques ont permis de déterminer :

- Les **hydrogrammes et limnigrammes** de remplissage et de vidange.
- La **pente d'eau transversale** dans le sas lors des opérations de sassement.
- La **pente de roulis** de la barge.
- La **force d'amarrage transversale** de la barge.
- Les **vitesse**s verticales et transversales de l'eau pendant le sassement.

Le sujet d'étude se focalise sur le remplissage en mode dégradé, sur les pentes et efforts d'amarrage transversaux. Certains comparatifs introductifs avec le mode normal ainsi qu'avec la direction longitudinale seront néanmoins brièvement réalisés pour comprendre l'ampleur des effets du mode dégradé.

Les résultats expérimentaux seront confrontés aux résultats de l'approche analytique afin d'évaluer la validité de ces derniers.

Ensuite, on s'intéressera aux paramètres pouvant faire diminuer les efforts d'amarrage transversaux. L'influence des paramètres suivants sera évaluée :

- La loi d'ouverture des vannes (linéaire en 30s - 60s - 90s).
- La taille des éjecteurs (éjecteurs de référence – éjecteurs réduits de moitié).
- La position transversale de la barge (centrée – décentrée gauche – décentrée droite).

L'ensemble des résultats des essais et de toutes les combinaisons d'analyse possibles ne seront pas présentés dans ce présent rapport. Dans le corps de ce travail, nous trouverons les résultats les plus représentatifs. Certains autres résultats seront disponibles dans les annexes. Enfin, l'entièreté des résultats est disponible sur un support numérique.

4.1 Notes préliminaires

4.1.1 Conventions de signe

Avant d'entrer dans l'analyse des résultats, il est nécessaire de définir les conventions de signes des grandeurs physiques mesurées.

Tout d'abord, rappelons que la rive gauche et la rive droite d'une écluse sont déterminées en regardant vers l'aval. Lors des essais réalisés en mode dégradé, l'aqueduc droit était fonctionnel et l'aqueduc gauche était consigné, comme l'indique la Figure 4-1 [20]. Si certains essais ont parfois été réalisés de manière inversée pour des raisons pratiques, les résultats ont bien été symétrisés afin de toujours garder cette convention et ainsi faciliter les comparaisons.

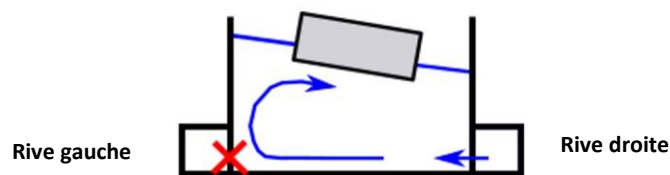


Figure 4-1: Remplissage dégradé

Les grandeurs physiques qui sont étudiées sont définies comme suit, en se référant aux Figure 4-2 et Figure 4-3 :

- Le **débit** (Q) : est défini positif lorsque 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 (Figure 4-2).
- 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 (Figure 4-2).
- Les **efforts transversaux** (F_{T1} et F_{T2}) : sont positifs lorsque la barge est poussée de la rive gauche vers la rive droite. De ce fait, si la force est purement hydrostatique, la pente d'eau et la force seront de même signe (Figure 4-3).
- Les efforts longitudinaux (F_L) : peu abordés, sont définis positifs lorsque la barge est poussée de l'amont vers l'aval (Figure 4-3).
- 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 (Figure 4-2).

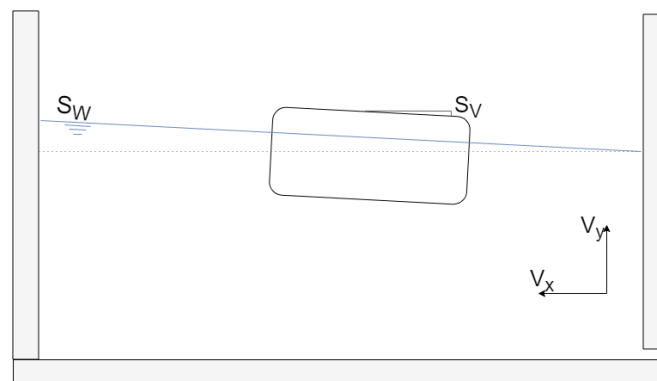


Figure 4-2: Convention de signes

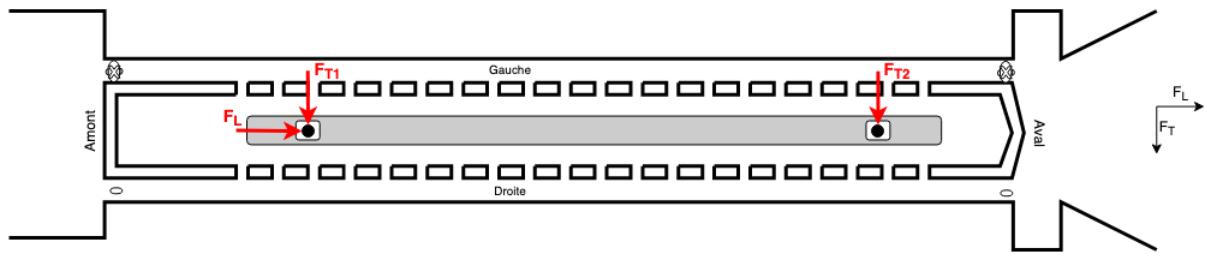


Figure 4-3: Convention de signes

4.1.2 Lissage des données

L'acquisition des mesures des différents capteurs a été réalisée à une fréquence de 5 Hz (une mesure toutes les 0,2 seconde). Afin de mieux visualiser la tendance générale des courbes et d'éliminer le bruit des données, un lissage a été effectué au moyen d'une moyenne mobile sur 2 secondes (11 mesures) : $X_n = \text{moyenne}(X_{n-5} \text{ à } X_{n+5})$. Un lissage plus important a le désavantage d'atténuer fortement les valeurs maximales. Sauf indication contraire, les résultats présentés dans ce chapitre représentent les signaux lissés ainsi sur 2 secondes.

4.1.3 Répétabilité des mesures

Chaque mesure de la campagne d'essais a été effectuée au minimum 2 fois (souvent 3 fois) afin de s'assurer de la répétabilité de celle-ci. Cela a ainsi permis d'écarter les essais défectueux et de garder au minimum un essai valable. Étant donné la bonne répétabilité de nos mesures, un seul fichier a été choisi et présenté graphiquement dans ce travail. Quelques exemples de répétabilité de données sont repris à l'annexe 10.2. L'ensemble des mesures répétées est disponible sur le support numérique. Seules les mesures de vitesses n'ont été réalisées qu'une seule fois en raison de la durée importante de la procédure pour ces essais.

4.2 Hydrogrammes et limnigrammes

On peut représenter l'évolution du niveau d'eau et l'évolution du débit dans le sas en fonction du temps, lors d'une opération de sassement, au moyen d'un limnigramme et d'un hydrogramme, respectivement.

L'objectif de cette section est d'introduire les premiers hydrogrammes et limnigrammes pour le mode dégradé et le mode normal (symétrique) et de quantifier l'influence du mode dégradé par rapport au mode normal sur le temps de sassement. D'autres analyses seront faites plus loin dans ce chapitre 4, concernant le mode dégradé uniquement.

Dans cette section, les hydrogrammes et limnigrammes présentés graphiquement sont le résultat d'essais de remplissage et de vidange :

- **En mode dégradé comparé au mode normal**
- **Pour une loi d'ouverture de vanne linéaire en 30s**
- **Pour une taille d'éjecteurs de référence (8cm x 1cm)**
- **Sas sans barge**

On appellera cette configuration : REF – 30s – sans barge.

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.

4.2.1 Remplissage

Le limnigramme et l'hydrogramme de remplissage sont représentés à la Figure 4-4 pour le remplissage en mode dégradé et à la Figure 4-5 pour le remplissage en mode normal. La loi d'ouverture des vannes amont s'effectue de 0° à 90° en 30s. L'allure de cette loi est représentée en pointillé sur les graphes afin de faire plus facilement une correspondance entre le pic de débit et l'ouverture maximale de la vanne.

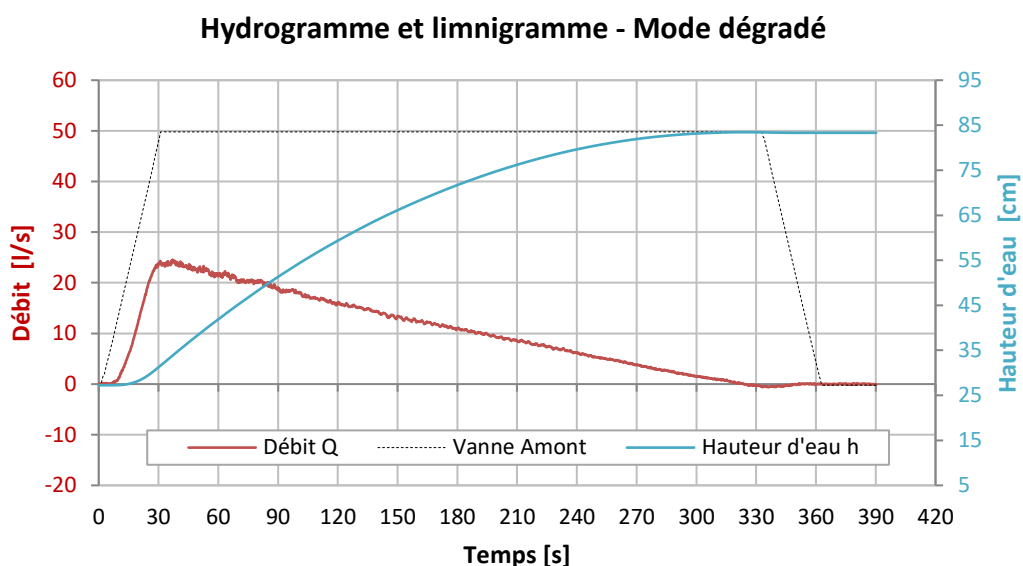


Figure 4-4: Remplissage - Hydrogramme et limnigramme - Mode dégradé - REF-30s-sans barge

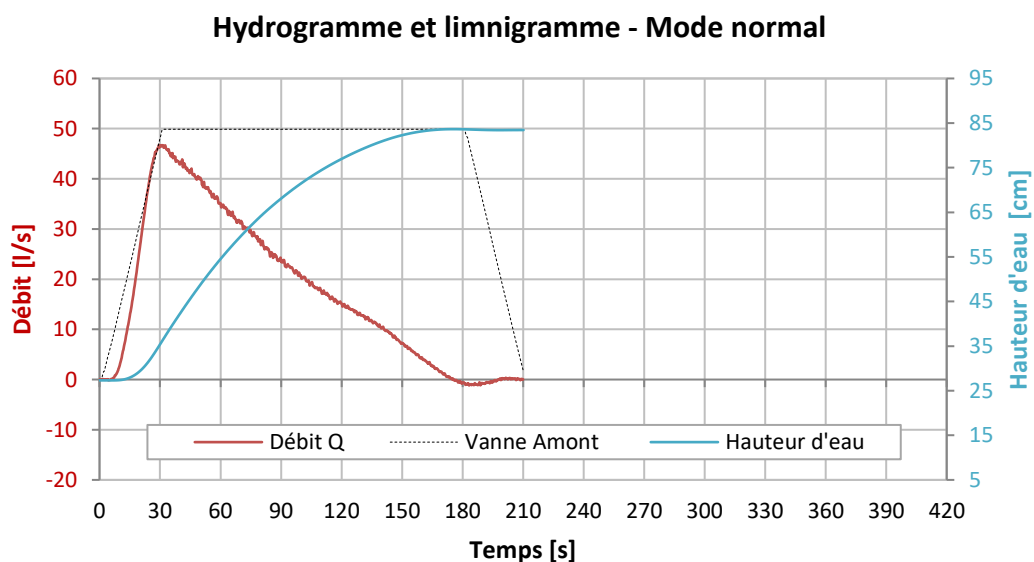


Figure 4-5: Remplissage - Hydrogramme et limnigramme - Mode normal - REF-30s-sans barge

Le débit maximum ainsi que la durée de remplissage du sas pour chacun des deux modes sont synthétisés dans le Tableau 4-1. L'opération de remplissage est considérée comme terminée lorsque le débit devient nul pour la première fois.

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

Tableau 4-1: Remplissage - Comparaison entre le mode dégradé et le mode normal

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.

On peut observer, à la fin du remplissage, un débit légèrement négatif avant de se stabiliser à zéro. Ceci est dû au phénomène de surremplissage du sas. L'eau qui, par principe des vases communicants, devrait théoriquement s'arrêter immédiatement lorsqu'elle atteint le niveau du bief amont, possède encore une énergie motrice lui permettant de surremplir légèrement le sas. La période où l'on observe un débit négatif correspond au moment où le niveau redescend pour se stabiliser au niveau du bief amont.

On constate, en début de remplissage, un certain délai avant la mise en mouvement du plan d'eau. Le débit devient non nul après environ 10 secondes. Cela est dû, en partie, à la perte de charge liée à l'inertie de l'eau. En effet, celle-ci est importante en début de remplissage étant donné la masse d'eau conséquente à mettre en mouvement (27 cm de matelas d'eau). Une autre raison de ce délai est la perte de charge à la vanne, beaucoup plus importante en début d'ouverture. À titre d'exemple, la Figure 4-6 [21] reprend les coefficients de perte de charge des vannes papillons mesurés sur le modèle de l'écluse d'Ampsin-Neuville. On observe que le coefficient de perte de charge ζ est bien plus important pour de faibles angles d'ouverture (0° à 20°) que pour des angles d'ouverture plus élevés.

Angle d'ouverture [°]	Ecoulement normal		Ecoulement dégradé (DRG/DRD)	
	α [m ⁴ s ²]	ζ [-]	α [m ⁴ s ²]	ζ [-]
80	45.4	9.7	43.1 / 46.4	9.2 / 9.9
70	76.4	16.3	71.3 / 78	15.2 / 16.6
60	152.6	32.5	1485.6 / 155	31 / 33
50	339.7	72.4	329.3 / 354.5	70.2 / 75.6
40	889.6	189.7	896.1 / 923.3	191 / 196.8
30	2995	638.7	3054 / 3093	651.2 / 659.5
20	15921	3995	14671 / 16673	3128 / 3555
10	148001	31558	73468 / 83141	15666 / 17728

Figure 4-6: Coefficients de perte de charge de la combinaison vanne-coude sur le modèle de l'écluse d'Ampsin-Neuville [21]

Enfin, on peut observer que, pour une loi d'ouverture de vanne en 30s, les pics de débits correspondent parfaitement au moment d'ouverture maximum de la vanne ($t = 30s$). Ceci s'explique, d'une part, parce que la perte de charge à la vanne est minimum lorsque celle-ci est totalement ouverte et d'autre part, parce que la différence de charge (moteur de l'écoulement) entre le bief amont et le sas est encore suffisamment élevée après 30s. En effet, le niveau du sas après 30s n'a augmenté que de quelques cm par rapport à la situation initiale.

4.2.2 Vidange

Le limnigramme et l'hydrogramme de vidange sont représentés à la Figure 4-7 pour la vidange en mode dégradé et à la Figure 4-8 pour la vidange en mode normal.

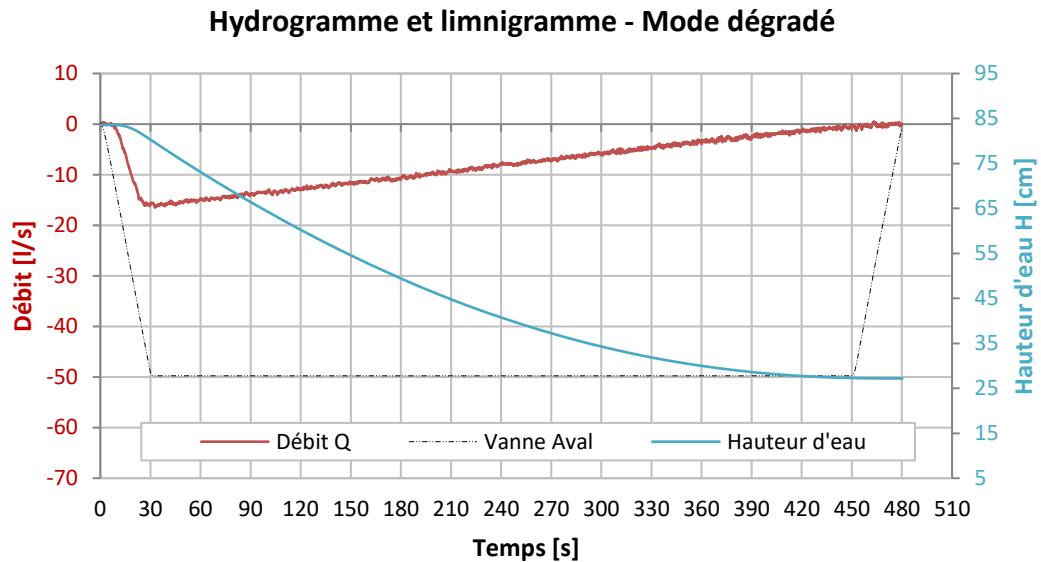


Figure 4-7: Vidange - Hydrogramme et limnigramme - Mode dégradé - REF-30s-sans barge

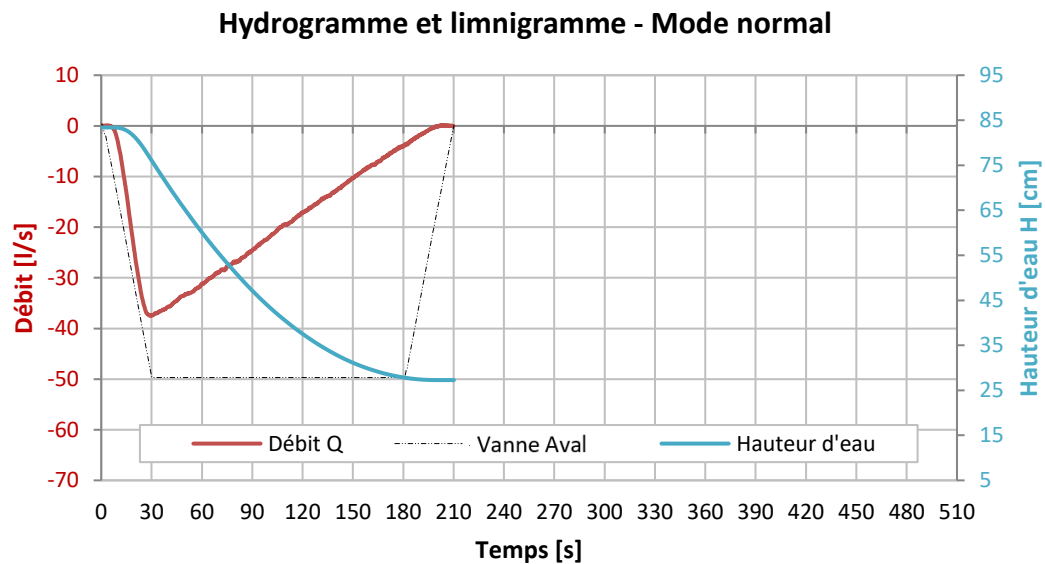


Figure 4-8: Vidange - Hydrogramme et limnigramme - Mode normal - REF-30s-sans barge

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

La valeur absolue du débit maximum ainsi que la durée de vidange du sas pour chacun des deux modes sont synthétisées dans le Tableau 4-2. L'opération de vidange est considérée comme terminée lorsque le débit devient nul pour la première fois.

	Débit maximum [l/s]	Durée de remplissage [s]
Mode dégradé	16,5	460,2
Mode normal	38,4	190,6

Tableau 4-2: Vidange - Comparaison entre le mode dégradé et le mode normal

Le débit maximum est 2,3 fois plus faible en vidange dégradée qu'en vidange normale. La durée de vidange est quant à elle 2,4 fois plus longue en mode dégradé qu'en mode normal.

4.2.3 Synthèse

Un récapitulatif des opérations de remplissage et vidange pour les modes dégradé et normal est repris dans le Tableau 4-3.

	Débit maximum [l/s]		Durée de sasement [s]	
	Remplissage	Vidange	Remplissage	Vidange
Tv = 30s				
Mode dégradé	24,6	16,5	320,8	460,2
Mode normal	47,9	38,4	175,8	190,6

Tableau 4-3: Synthèse – Comparaison entre le mode dégradé et le mode normal

On constate que la durée de vidange est supérieure à la durée de remplissage, surtout en mode dégradé.

Ce que l'on retient essentiellement de cette analyse est que, lors d'un sasement en mode dégradé, la durée de la bassinée est en moyenne multipliée par deux, par rapport au mode normal.

4.3 Pente d'eau transversale

En mode dégradé, les jets d'eau provenant de l'aqueduc fonctionnel se dirigent vers le bajoyer opposé, avant de remonter le long de celui-ci, créant ainsi un mouvement de recirculation de l'eau dans le sas, dans un plan transversal (Figure 4-10). Dans ce cas, la pente d'eau transversale est beaucoup plus importante que dans le cas d'un remplissage en mode normal où les jets se font face et provoquent une dissipation d'énergie au milieu de sas (Figure 4-9). Cette section s'intéresse à ces pentes d'eau transversales en mode dégradé.

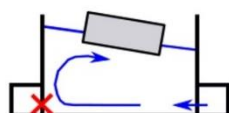


Figure 4-10: Mode dégradé

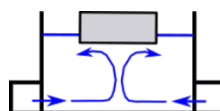


Figure 4-9: Mode normal

Actuellement, il existe des critères de sécurité sur les pentes d'eau dans le sas afin de limiter les efforts dans les amarres (par exemple, pentes d'eau inférieures à 0,85 ‰ pour une barge de classe Va CEMT). Ces critères sont souvent établis pour des pentes d'eau longitudinales.

Afin de vérifier ces critères in situ, les mesures de pentes d'eau sont généralement effectuées sans la présence de la barge. On peut s'interroger sur l'influence de celle-ci sur la pente d'eau mesurée. C'est pourquoi les essais ont été réalisés avec et sans barge dans le sas.

Dans cette section, les pentes d'eau transversales présentées graphiquement sont le résultat d'essais de remplissage :

- En mode dégradé
- Pour une loi d'ouverture de vanne linéaire en 30s
- Pour une taille d'éjecteur de référence
- Barge centrée (si présence de la barge)

Pour rappel, les mesures de pentes d'eau ont été réalisées à partir de 5 capteurs de pression différentielle répartis le long du sas (Figure 4-11). S_{w1} représente la pente d'eau mesurée par P_{dif1} , le plus à l'amont du sas et S_{w5} est la pente d'eau mesurée par P_{dif5} , le plus à l'aval du sas.

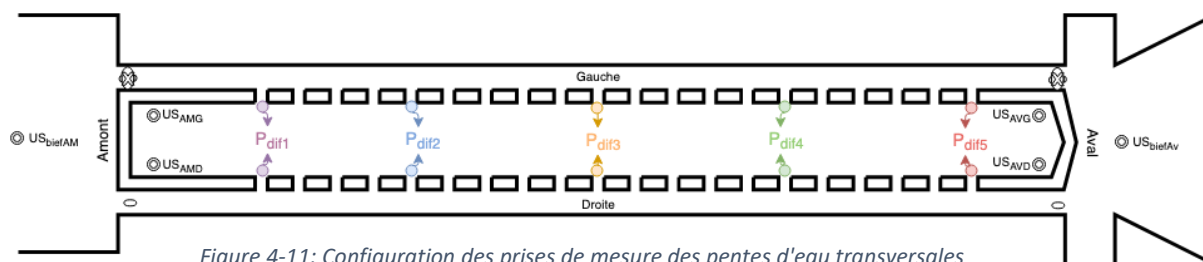


Figure 4-11: Configuration des prises de mesure des pentes d'eau transversales

Les objectifs de cette section sont divers :

Dans un premier temps, nous observerons si la pente transversale est constante tout le long du sas. Dans un second temps, nous ferons un choix pour évaluer la pente moyenne transversale. Ensuite, nous ferons un comparatif de ces dernières entre le cas avec barge et sans barge dans le sas. Enfin, nous observerons s'il existe une différence entre la mesure prise par des capteurs placés au droit des éjecteurs et la mesure prise par des capteurs placés entre les éjecteurs. De manière générale, dans la suite de ce travail, si aucune indication n'est faite à ce sujet, les graphes de pentes d'eau présentés sont le résultat de prises de pression *au droit* des éjecteurs.

4.3.1 Sans barge

Les pentes d'eau transversales mesurées à partir des 5 capteurs de pression différentielle sont représentées à la Figure 4-12. S_{w1} représente la pente d'eau mesurée le plus à l'amont du sas et S_{w5} est la pente d'eau mesurée le plus à l'aval du sas (Figure 4-11). La pente d'eau est donnée par :

$S_w = \frac{\Delta h}{l_s} \cdot 1000 \text{ [‰]}$; où $\Delta h [m]$ est la différence de niveau d'eau mesurée par les capteurs de pression différentielle et $l_s [m]$ la largeur du sas.

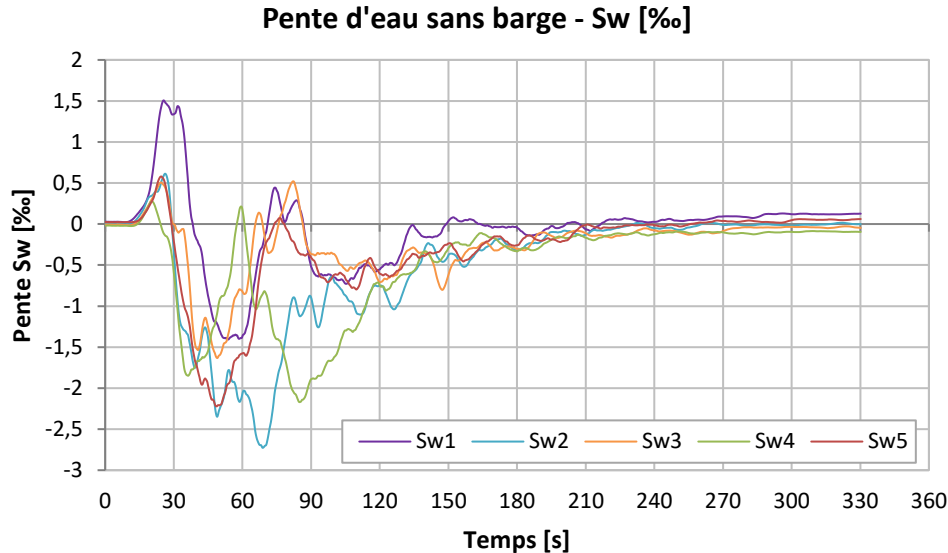


Figure 4-12: Pentes d'eau transversales - REF-30s-sans barge

Les pentes d'eau transversales ne sont pas totalement constantes le long du sas. On peut observer qu'en début de remplissage, la pente à l'amont du sas (S_{w1}) est 3 fois supérieure aux autres pentes. Cela peut s'expliquer par le fait qu'en début de remplissage, les larrons situés à l'amont débitent plus que les larrons situés plus en aval.

On observe également que la pente d'eau change de signe. Elle est positive en début de remplissage (le niveau d'eau en rive gauche est plus haut que le niveau d'eau en rive droite), atteint un maximum au moment de l'ouverture maximum de la vanne (t=30s) et passe ensuite en négatif. Quelques fois, la pente d'eau repasse également en positif, indiquant le retour de l'onde de sassement.

Pour faciliter la suite des analyses, il a fallu faire le choix d'une méthode pour évaluer la pente moyenne transversale dans le sas. La méthode choisie, pour la situation sans barge, est de prendre en considération toutes les mesures et d'en faire la moyenne (Figure 4-13).

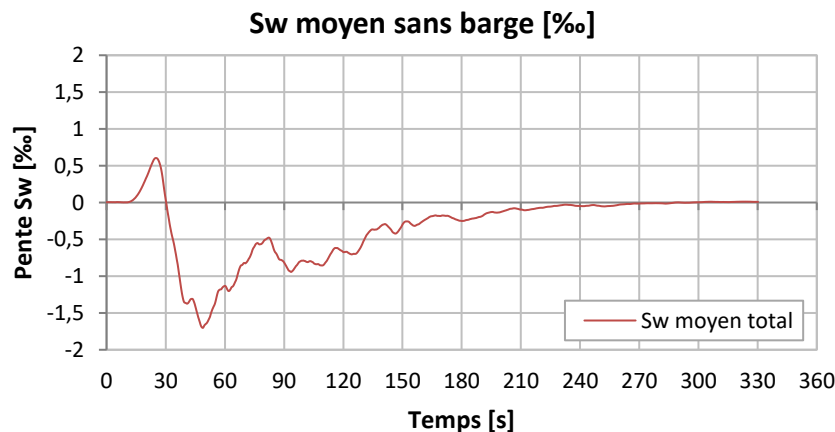


Figure 4-13: Pente d'eau transversale moyenne - REF-30s-sans barge

4.3.2 Avec barge

Les pentes d'eau transversales mesurées à partir des 5 capteurs de pression différentielle, en présence de la barge, sont représentées à la Figure 4-14.

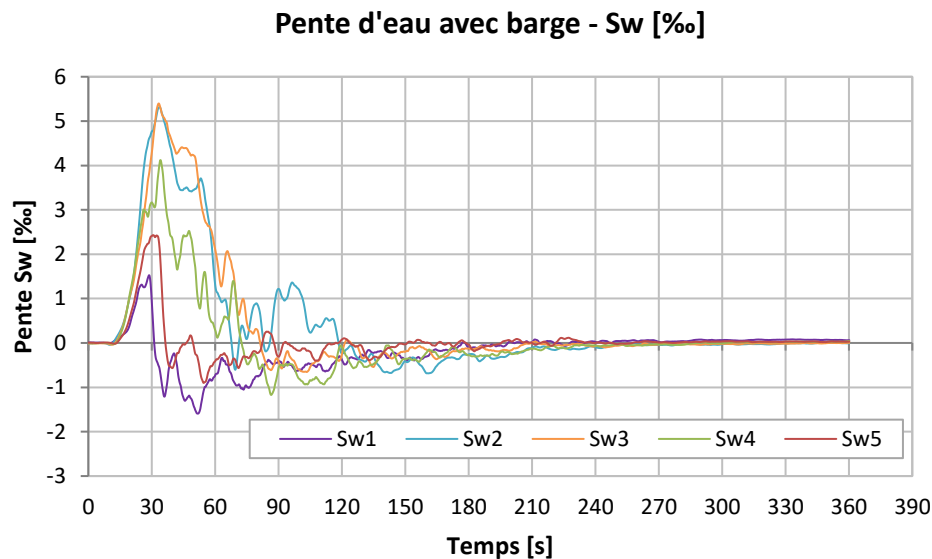


Figure 4-14: Pentas d'eau transversales - REF-30s-barge centrée

On peut observer deux tendances différentes sur ce graphe. L'allure des courbes relatives aux capteurs situés le plus à l'amont (S_{w1}) et le plus à l'aval (S_{w5}) ressemble fortement à ce que l'on a observé sans la barge, à savoir une pente positive qui passe rapidement en négatif après l'ouverture maximale de la vanne. L'allure des courbes relatives aux capteurs intermédiaires (S_{w2} à S_{w4}) ont des pics plus élevés et ne repassent quasiment pas en négatif. Cette différence s'explique par le fait que, tandis que les capteurs intermédiaires sont situés au droit de la barge, les capteurs le plus à l'amont et le plus à l'aval sont situés aux extrémités de la barge, là où l'eau est encore libre de la contourner et de se comporter presque comme si la barge n'était pas présente. En revanche, l'eau étant bloquée au droit de la barge, la pente s'accroît.

Dans ce cas-ci, il est moins judicieux de réaliser la moyenne sur toutes les mesures. La méthode choisie pour évaluer la pente moyenne transversale, pour la situation avec barge, est de réaliser la moyenne sur les 3 mesures intermédiaires (S_{w2} à S_{w4}), appelée « moyenne centrée » (Figure 4-15).

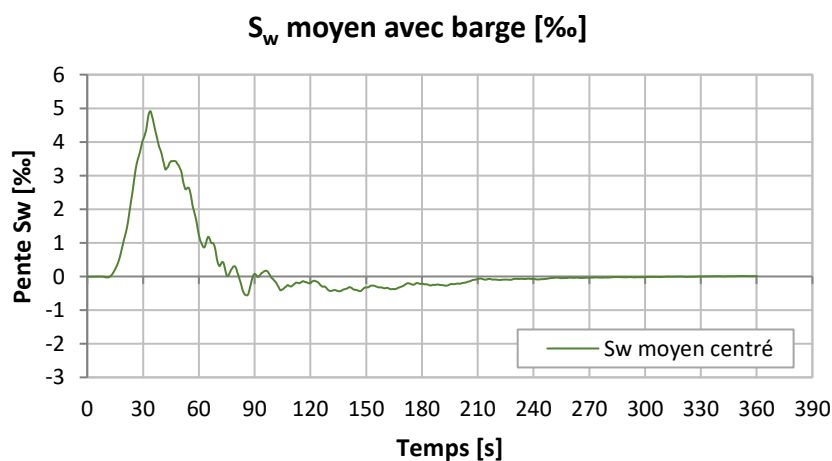


Figure 4-15: Pente d'eau transversale moyenne - REF-30s-barge centrée

4.3.3 Comparatif avec/sans barge

La Figure 4-16 reprend la comparaison des pentes d'eau transversales (moyennées comme présenté aux sections précédentes) entre les situations avec et sans barge.

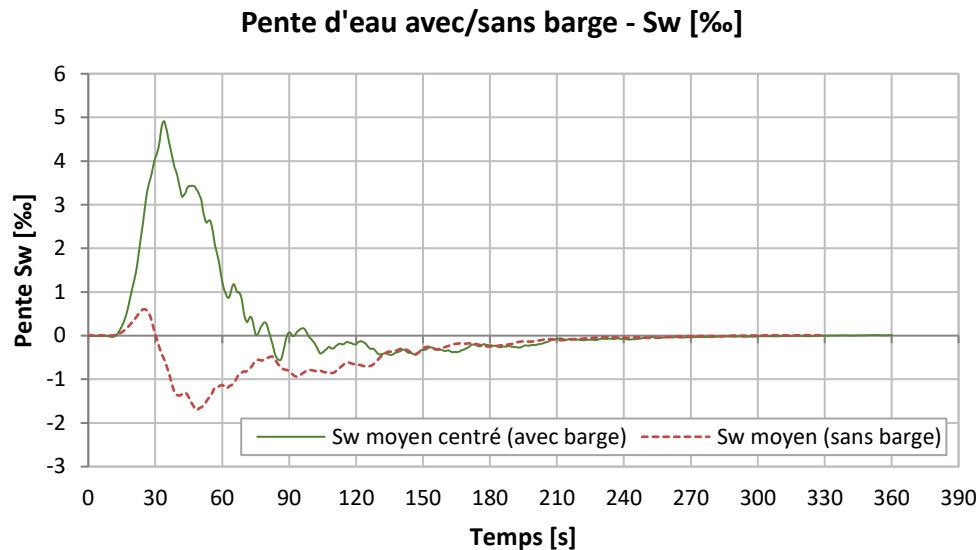


Figure 4-16: Pente d'eau transversale moyenne - Comparatif avec/sans barge – REF-30s

On observe bien qu'il existe, en mode dégradé, une différence notable suivant que l'on mesure la pente d'eau transversale avec ou sans barge. La pente transversale moyenne est 10 fois plus élevée avec la barge que sans la barge. Étant donné que la force d'amarrage est usuellement déduite de cette pente d'eau, le choix de considérer l'une ou l'autre s'avère crucial. Ce choix sera discuté plus loin lorsque ces pentes d'eau seront confrontées aux forces d'amarrage mesurées au laboratoire.

4.3.4 Comparatif au droit/entre éjecteurs

Outre la comparaison des situations avec et sans barge, on peut également s'interroger sur la continuité de la pente transversale entre ce qu'il se passe au droit des éjecteurs et ce qu'il se passe entre les éjecteurs. Les deux configurations sont rappelées à la Figure 4-18 et à la Figure 4-17.

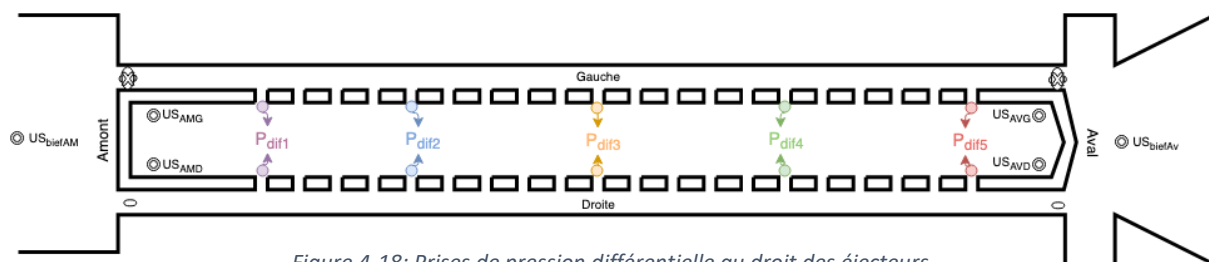


Figure 4-18: Prises de pression différentielle au droit des éjecteurs

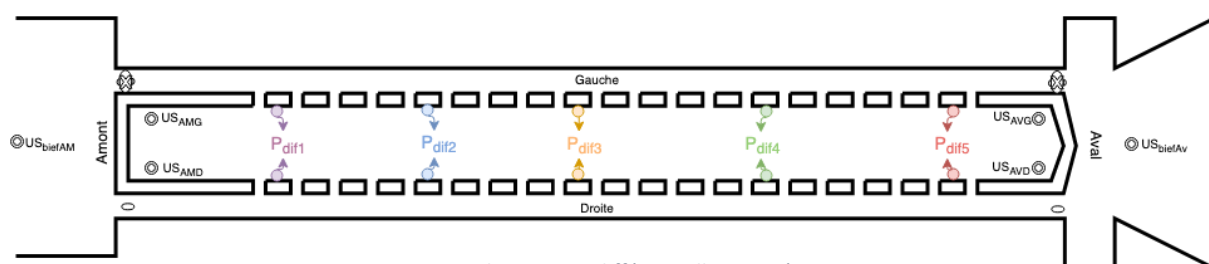


Figure 4-17: Prises de pression différentielle entre éjecteurs

Les Figure 4-19 et Figure 4-20 illustrent cette comparaison pour la situation sans barge (Figure 4-19) et la situation avec barge (Figure 4-20).

Pour la situation avec barge (Figure 4-20), que l'on se situe au droit ou entre les éjecteurs pour la prise de mesure, les résultats sont similaires.

En revanche, pour la situation sans barge (Figure 4-19), il semble qu'il y ait une discontinuité de la pente suivant que l'on se situe au droit ou entre les éjecteurs. En début de remplissage, la pente mesurée entre les éjecteurs est 4 fois plus grande que celle mesurée au droit des éjecteurs, puis rejoint l'autre courbe. Cette différence peut être expliquée par l'hypothèse que le jet d'eau sortant de l'éjecteur se diffuse latéralement et remonte le long du bajoyer opposé. Donc, entre éjecteurs, les jets provenant des deux éjecteurs se rencontrent et accentuent la perturbation. La pente d'eau à cet endroit-là est donc plus importante. La présence de la barge (Figure 4-20) a pour effet de bloquer le retour de l'eau et donc d'uniformiser cette diffusion.

In situ, pour la mesure d'une pente d'eau transversale sans barge en mode dégradé, il serait conseillé de se placer entre les éjecteurs afin d'obtenir la mesure la plus critique.

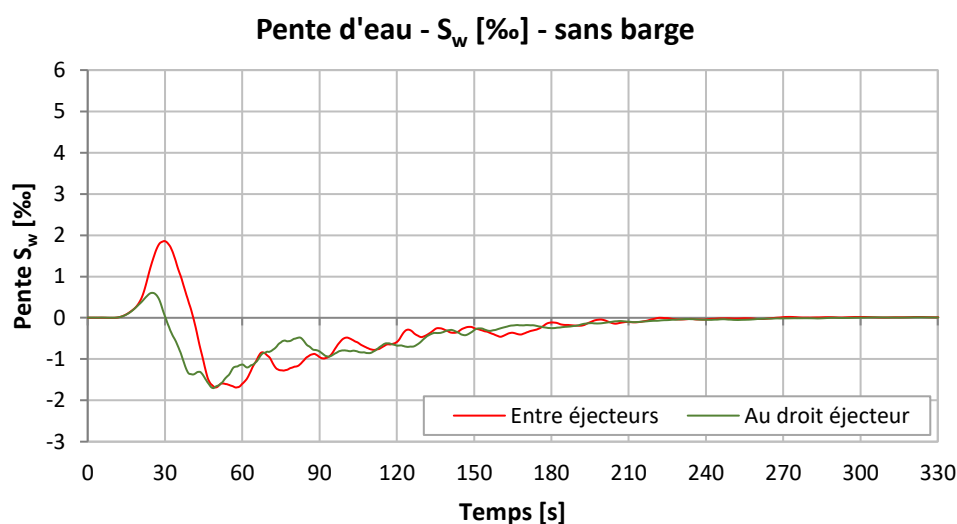


Figure 4-19 : Pente d'eau transversale moyenne – Comparatif au droit/entre éjecteurs – sans barge

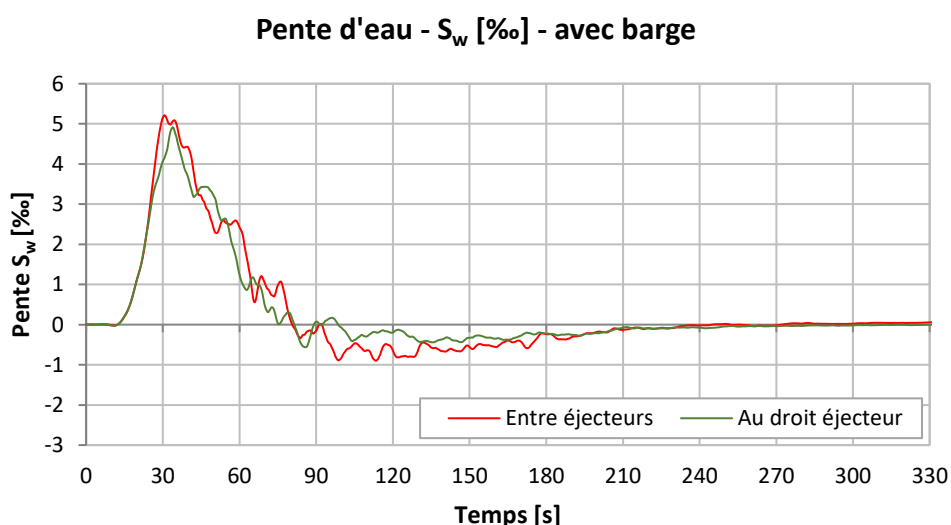


Figure 4-20 : Pente d'eau transversale moyenne – Comparatif au droit/entre éjecteurs – avec barge

4.4 Pente de roulis

Les mesures des pentes de roulis amont et aval, réalisées à l'aide des capteurs à cordes reliés à la barge, sont représentées à la Figure 4-21. La pente de roulis est déterminée par :

$S_v = \frac{\Delta r}{l_c} \cdot 1000 [\text{‰}]$; où $\Delta r[m]$ est la différence de niveau de la barge déduite des distances verticales mesurées par les capteurs à cordes et $l_c [m]$ la distance horizontale entre ces deux capteurs.

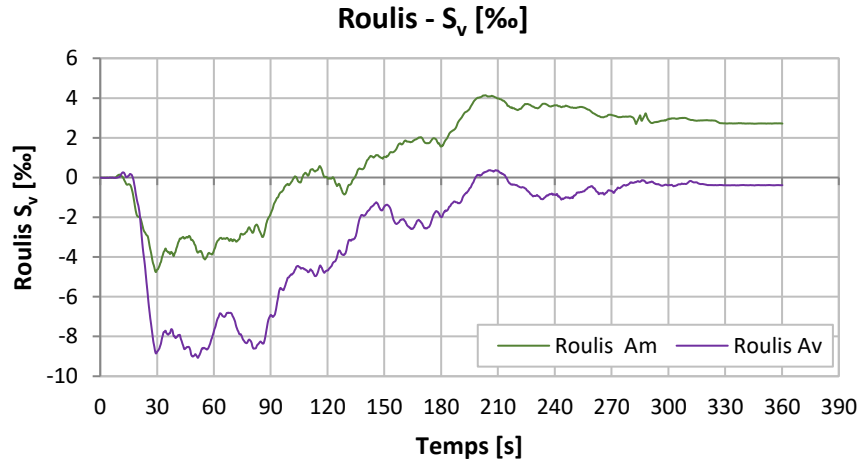


Figure 4-21: Pentes de roulis (amont et aval) - REF-30s-barge centrée

Après dépouillement et croisement de données, il s'est avéré que le capteur amont gauche était défaillant. Étant donné que nous disposons d'une double mesure, nous ne présenterons systématiquement que le roulis aval et écartons la donnée défaillante du roulis amont (Figure 4-22).

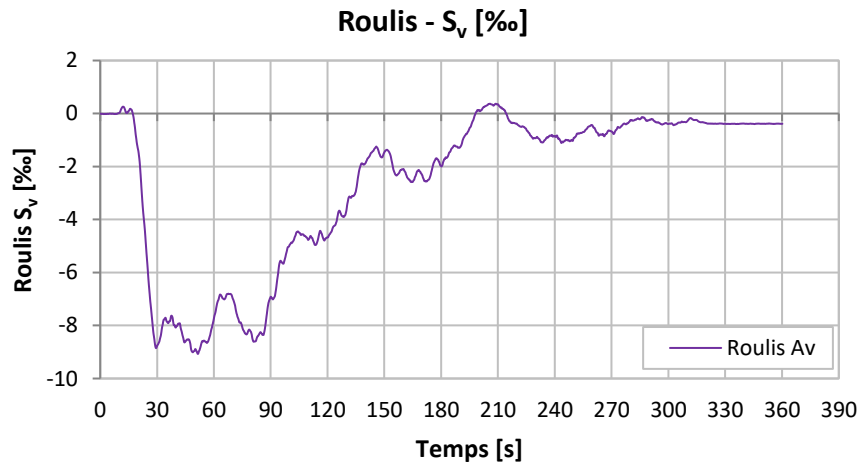


Figure 4-22: Pente de roulis aval

Nous pouvons observer deux choses intéressantes concernant le roulis. Premièrement, contrairement aux pentes d'eau en début de remplissage, le roulis est négatif (le niveau à droite est supérieur au niveau à gauche). L'inclinaison de la barge ne suit donc pas la pente d'eau comme on pourrait l'imaginer, elle y est opposée. Cela s'explique par le fait que la barge étant bloquée par les axes verticaux, le jet de retour frappant la carène entraîne la barge dans un mouvement de rotation opposé.

Deuxièmement, la valeur du roulis maximum, de l'ordre de 9‰ en valeur absolue, est nettement supérieure à ce qu'on a pu constater pour les pentes d'eau, avec (5‰) ou sans barge (2‰). Un comparatif sera réalisé dans la section suivante afin de confronter ces résultats aux forces d'amarrage mesurées au laboratoire.

4.5 Force d'amarrage transversale

Les forces d'amarrage ont pu être mesurées au laboratoire au moyen de 3 jauges de déformation placées sur la barge. L'une mesure l'effort longitudinal (F_L), les deux autres les efforts transversaux (F_{T1} et F_{T2}).

La barge est placée en position montante (proue à l'amont et poupe à l'aval). Comme l'illustre la Figure 4-23, le capteur mesurant F_{T1} est placé à la proue (et donc à l'amont du sas) et le capteur mesurant F_{T2} est positionné à la poupe (et donc à l'aval du sas).

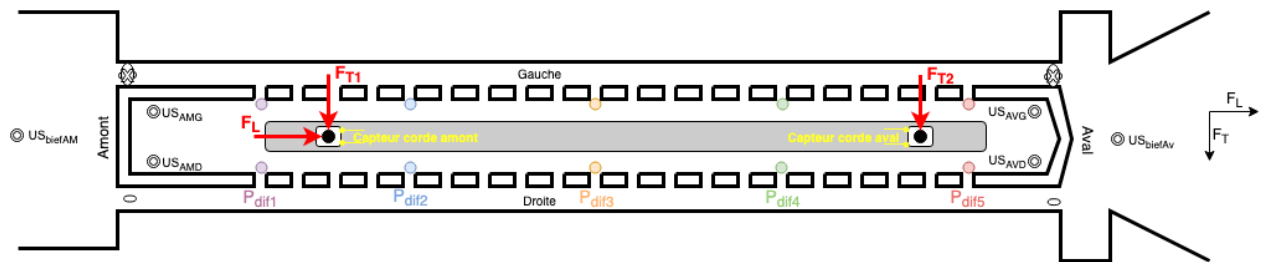


Figure 4-23: Configuration pour la mesure des efforts d'amarrage transversaux

L'objectif de cette section est d'une part, de présenter l'ampleur des efforts d'amarrage transversaux par rapport aux efforts longitudinaux lors d'un remplissage en mode dégradé et d'autre part, de confronter ces mesures d'efforts transversaux aux différentes pentes étudiées précédemment. Cela permettra d'en tirer les conclusions concernant la part de la composante hydrostatique et de la composante hydrodynamique des forces d'amarrage en mode dégradé.

Dans cette section, les forces d'amarrage présentées graphiquement sont le résultat d'essais de remplissage :

- En mode dégradé
- Pour une loi d'ouverture de vanne en 30s
- Pour une taille d'éjecteur de référence
- Barge centrée

La Figure 4-24 présente les forces d'amarrages transversales F_{T1} et F_{T2} en comparaison avec la force d'amarrage longitudinale F_L .

Les différentes forces d'amarrage F représentées sur ces figures sont des forces adimensionnalisées: $F = \frac{f}{P} \cdot 1000$ [%]; où $f[N]$ est la force mesurée par les jauges de déformations et $P[N]$ est le poids de la barge.

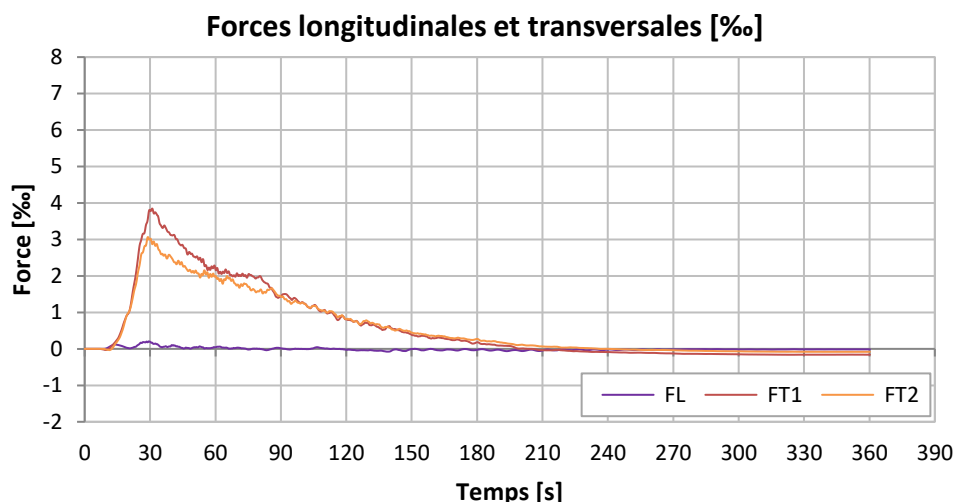


Figure 4-24: Forces d'amarrage longitudinales et transversales - REF-30s-barge centrée

Cette figure nous permet de constater que la force d'amarrage longitudinale est négligeable devant le phénomène des efforts transversaux en mode dégradé. Les forces d'amarrage F_{T1} et F_{T2} sont 10 à 13 fois plus élevées que la force longitudinale.

Afin de considérer la force d'amarrage transversale totale (F_T) exercée sur la barge, il conviendra de tenir compte, dans la suite de cette étude, de la somme de F_{T1} et F_{T2} comme illustré à la Figure 4-25. La force d'amarrage transversale totale est alors 23 fois plus élevée que la force longitudinale.

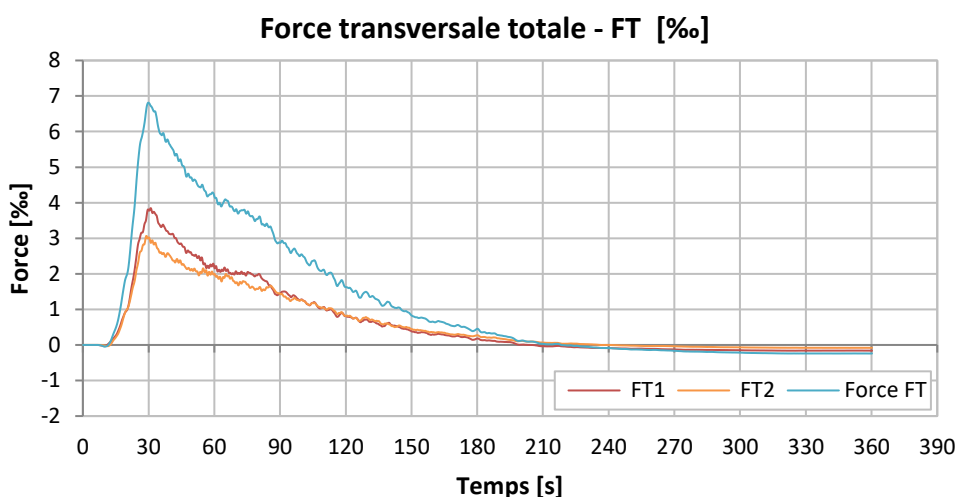


Figure 4-25: Force d'amarrage transversale totale - REF-30s-barge centrée

Il serait également intéressant de comparer cette valeur de la force d'amarrage transversale avec les valeurs obtenues pour la force longitudinale dans le cadre d'un remplissage symétrique par contournement de têtes. Les travaux de T. Heinz, de P.A. Reding et de R. Magotteaux fournissent certains résultats intéressants présentés aux Figure 4-28 [12], Figure 4-26 [19] et Figure 4-27 [15], respectivement.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

On aperçoit que la tendance et la valeur maximale de la force longitudinale est très similaire dans les différentes expériences. On peut constater que la force longitudinale maximale en remplissage symétrique par contournement de têtes (1,5‰) est 4,5 fois moins élevée que la force d'amarrage transversale en remplissage dégradé par aqueducs-larrons (7‰).

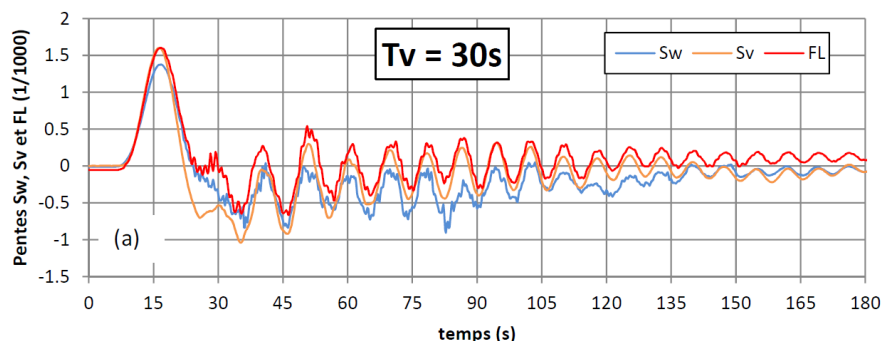


Figure 4-28: T.Heinz : Force longitudinale FL pour un remplissage par contournement des têtes - $T_v=30s$ - Barge centrée [12]

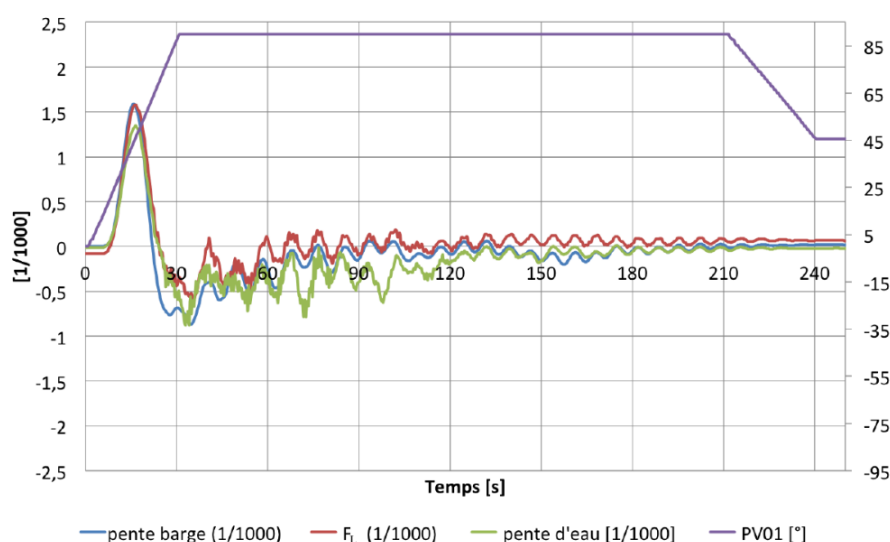


Figure 4-26: P.-A. Reding : Force longitudinale FL pour un remplissage par contournement des têtes - $T_v=30s$ [19]

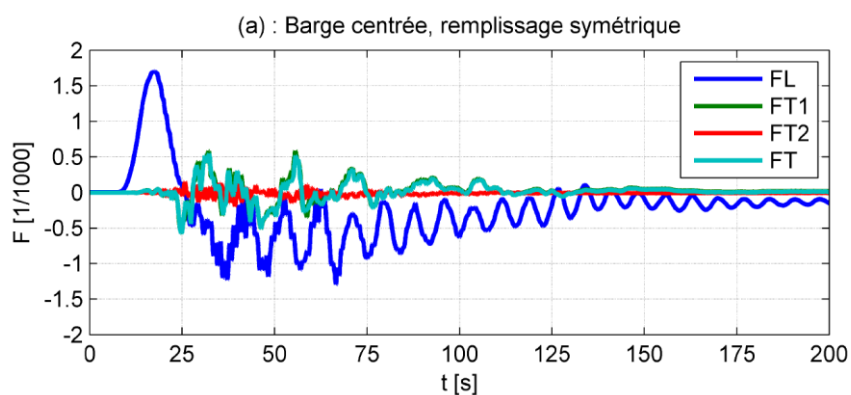


Figure 4-27: R. Magotteaux : Force longitudinale FL pour un remplissage par contournement des têtes - $T_v=30s$ [15]

4.5.1 Comparaison avec le modèle analytique

Comme décrit dans l'état de l'art de ce travail, la force d'amarrage est la combinaison d'une composante hydrostatique (liée à la pente d'eau dans le sas) et d'une composante hydrodynamique (liée à la vitesse de l'eau dans le sas). La composante hydrostatique F_{hs} peut être évaluée comme :

$$F_{hs} = P \cdot S_w$$

Où : P est le poids de la barge et S_w est la pente d'eau ;

Ou de manière adimensionnalisée, comme égale à la pente d'eau S_w :

$$\frac{F_{hs}}{P} \cdot 1000 = S_w [\text{‰}]$$

Si la force d'amarrage mesurée était purement hydrostatique, celle-ci devrait être simplement égale à la pente d'eau. Il devient intéressant de confronter les résultats des mesures prises par les capteurs de forces avec les résultats des différentes pentes mesurées afin de déterminer la proportion de cette composante hydrostatique dans l'effort d'amarrage transversal.

Le comparatif, pour un remplissage dégradé, avec une loi d'ouverture de vanne en 30s, une taille d'éjecteurs de référence et une barge centrée, est représenté à la Figure 4-29.

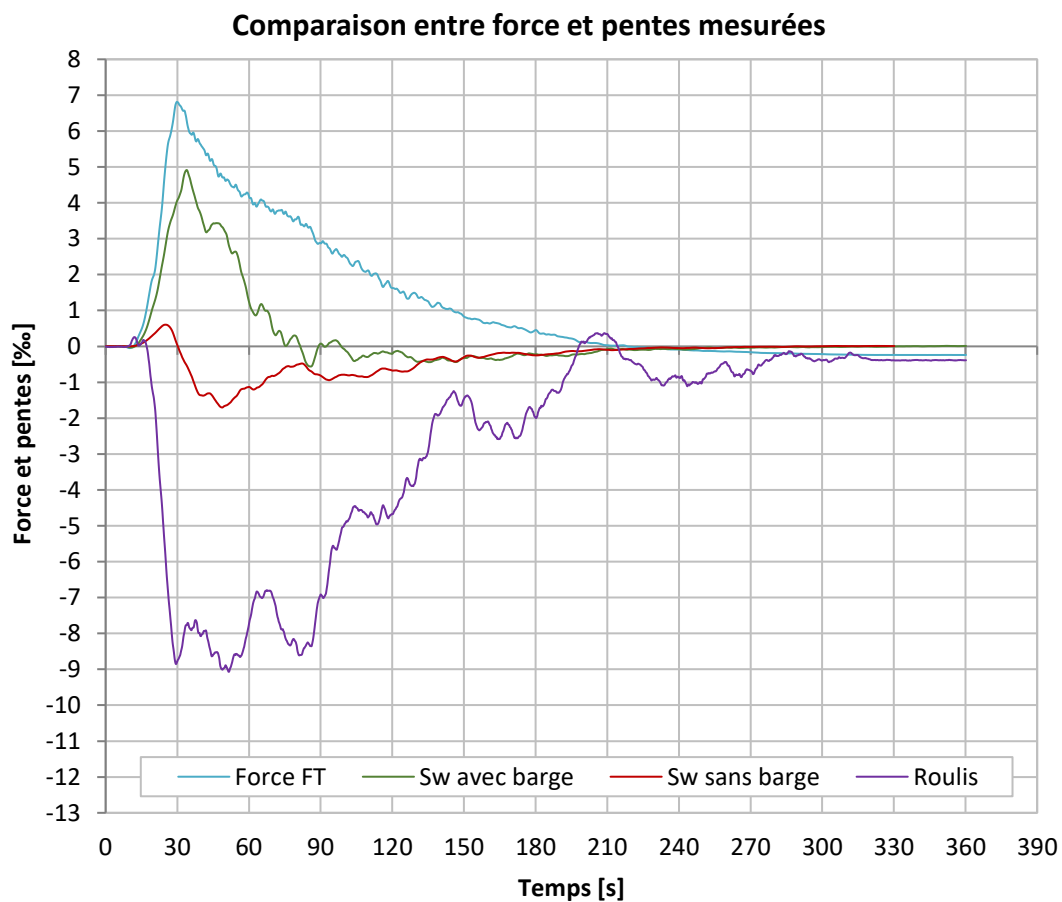


Figure 4-29: Comparaison entre force d'amarrage et différentes pentes mesurées

L'effort d'amarrage, représenté en bleu clair atteint un maximum positif de 7 ‰, ce qui est largement au-delà de la limite recommandée de 0,85‰ pour les bateaux de classe Va CEMT ou même de 1‰ dans certains cas.

La pente d'eau (en vert pour le cas avec barge et en rouge pour le cas sans barge), représentant la composante hydrostatique de la force, atteint des valeurs positives de respectivement 5‰ et 0,5 ‰. On peut conclure d'une part que, la pente d'eau à prendre en compte est la pente d'eau avec barge et d'autre part que, malgré cela, la force hydrostatique ne suffit pas pour évaluer l'effort d'amarrage transversal en mode dégradé. Il existe une composante hydrodynamique non négligeable que nous allons tenter de quantifier à la section suivante grâce aux mesures de vitesses d'eau dans le sas réalisées au laboratoire.

Enfin, en ce qui concerne la valeur significative maximum, le roulis, bien qu'opposé à la force d'amarrage, se rapproche de la valeur de celle-ci en valeur absolue. L'allure du roulis suit moins l'allure de la force que les autres courbes, mais l'intérêt reste bien d'étudier la valeur maximum de la force d'amarrage lors de l'opération de remplissage. Le roulis tient en effet compte de la composante hydrodynamique du phénomène. Cela étant dit, la valeur maximum du roulis reste plus élevée que la force.

Il sera intéressant d'analyser d'autres configurations et de jouer sur différents paramètres afin d'observer leur influence sur ces courbes. Cela fait l'objet de la section 4.7 : Influence de différents paramètres.

4.6 Vitesses de l'eau au sein du sas

Des mesures de vitesses ont été réalisées au laboratoire afin d'étudier les recirculations de l'eau au sein du sas lors d'un remplissage en mode dégradé. Deux tailles d'éjecteurs ont été envisagées pour cette étude: des éjecteurs dits de référence (8cm x 1cm) et des éjecteurs de taille réduite (4cm x 1 cm).

On peut rappeler la configuration des différentes prises de mesures à la Figure 4-30. Ces mesures de vitesses ont été réalisées uniquement pour une loi d'ouverture de vanne linéaire en 30s.

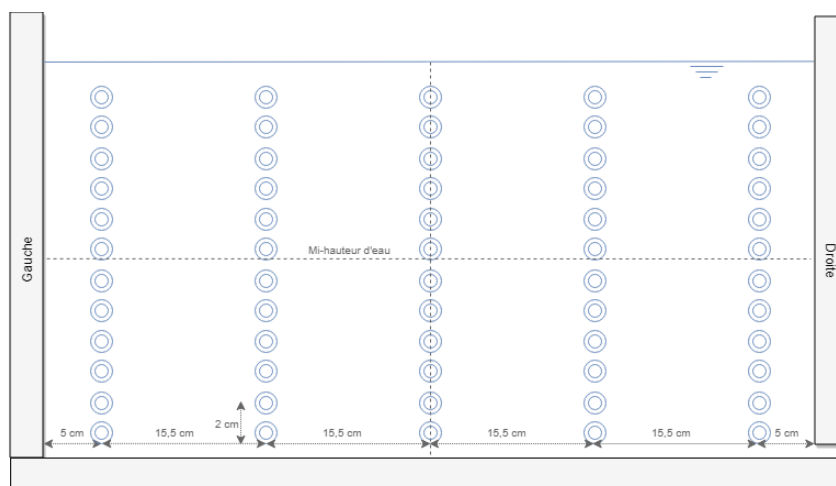


Figure 4-30: Configuration des prises de vitesses dans un plan transversal du sas

En pratique, toutes les mesures de vitesses n'ont pas pu être prises dans un seul plan transversal. L'utilisation de plusieurs sondes lors d'un remplissage permettrait d'obtenir plusieurs points du maillage en une seule fois (et donc un gain de temps considérable) mais ne pouvait se faire sur la même coupe transversale. En effet, les sondes de vitesses utilisées créent un champ magnétique autour d'elles qui empêche donc deux sondes de se retrouver à proximité l'une de l'autre. Des perturbations mutuelles du champ entraîneraient des résultats faussés. Une distance minimale sécuritaire de 30 cm entre sondes a donc été décidée, impliquant de devoir prendre des mesures sur des plans transversaux différents.

Après de nombreux essais préliminaires, l'hypothèse que les champs de vitesses ne varient pas significativement d'un plan transversal à l'autre (par exemple entre la sortie d'éjecteur la plus à l'amont et celle la plus à l'aval) a été considéré comme acceptable au vu des écarts négligeables mesurés.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Un exemple de données brutes récoltées est présenté aux Figure 4-33 et Figure 4-32 . Elles illustrent la composante transversale v_x de la vitesse, en 5 points sur la largeur du sas, à une hauteur fixée à 2 cm du fond du sas, l'une au droit d'un éjecteur de référence (Figure 4-33) et l'autre au droit d'un éjecteur réduit (Figure 4-32).

Comme représenté sur la Figure 4-31, V1 représente la vitesse mesurée par la sonde située en rive droite (proche de l'éjecteur fonctionnel) et V5 est celle mesurée par la sonde en rive gauche. Pour la suite des analyses, ces données brutes ont été lissées sur 5 secondes.



Figure 4-31: Configuration des mesures de vitesses à 2cm du fond du sas

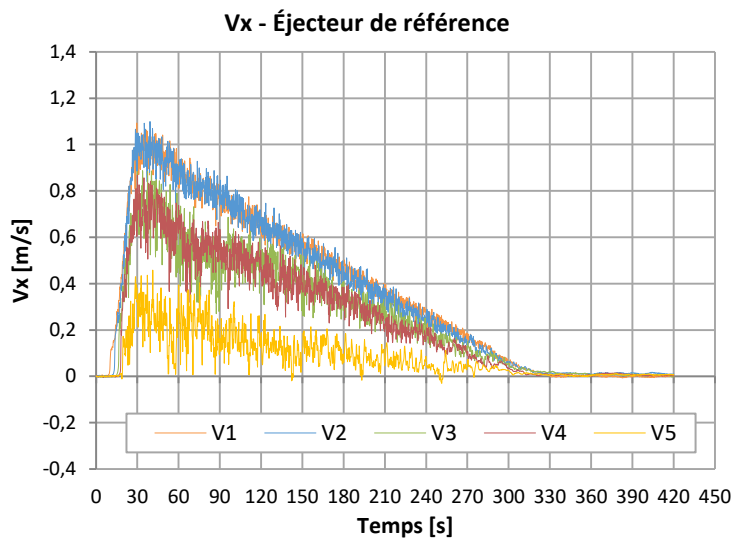


Figure 4-33: Composante transversale de la vitesse à 2cm du fond du sas – Éjecteur de référence

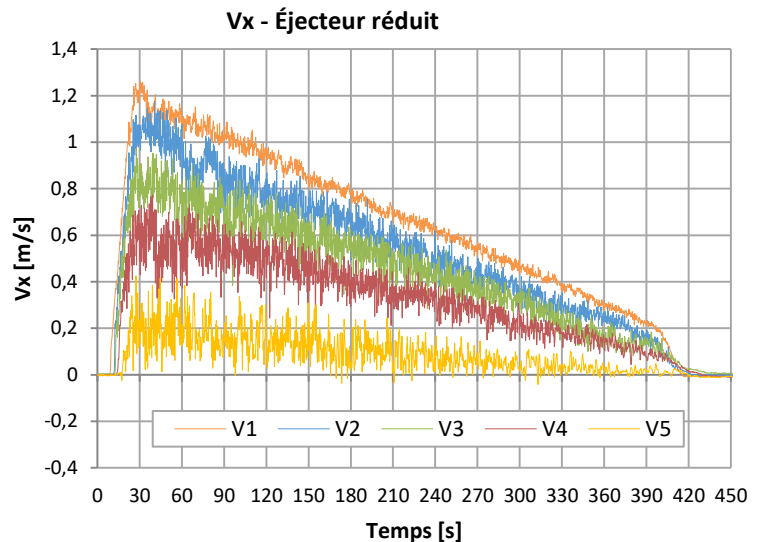


Figure 4-32: Composante transversale de la vitesse à 2cm du fond du sas – Éjecteur réduit

On observe, dans les deux configurations d'éjecteur, la diminution de la vitesse v_x (à 2cm du fond du sas) au plus on s'éloigne de l'éjecteur. On peut également noter l'ordre de grandeur des vitesses maximales mesurées à la sortie des éjecteurs (1 à 1,2 m/s). Les vitesses mesurées devant les éjecteurs réduits sont plus importantes.

Pour le cas des éjecteurs réduits, on peut remarquer une diminution abrupte de la vitesse en fin de remplissage : cela indique que les vannes ont commencé à se fermer trop tôt. Cette observation a été faite après dépouillement des résultats mais n'engendre pas de grandes conséquences sur l'analyse de ceux-ci.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Une vue en plan des prises de mesures est disponible à la Figure 4-35 pour le cas des éjecteurs de référence et à la Figure 4-34 pour le cas des éjecteurs réduits. Les mesures de vitesses ont été prises à la fois au droit et entre les éjecteurs. Au total 240 points de prises de vitesse ont été réalisés.

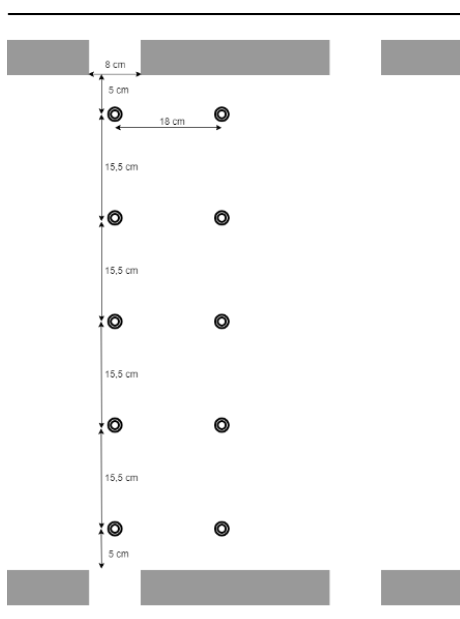


Figure 4-35: Vue en plan des prises de vitesses pour un éjecteur de référence

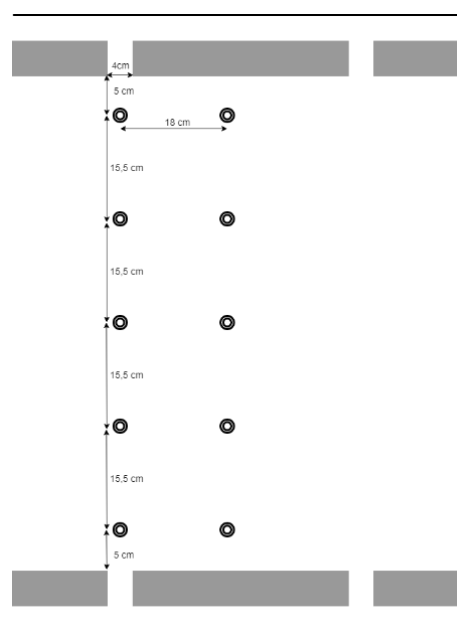


Figure 4-34: Vue en plan des prises de vitesses pour un éjecteur réduit

Avant de procéder à la représentation en deux dimensions des champs de vitesses dans le plan transversal du sas, une réflexion préalable a été faite sur la comparaison des données entre le cas des éjecteurs de référence et le cas des éjecteurs réduits.

En effet, les hydrogrammes et limnigrammes de ces deux cas de figure ne sont pas similaires (Figure 4-36 et Figure 4-37):

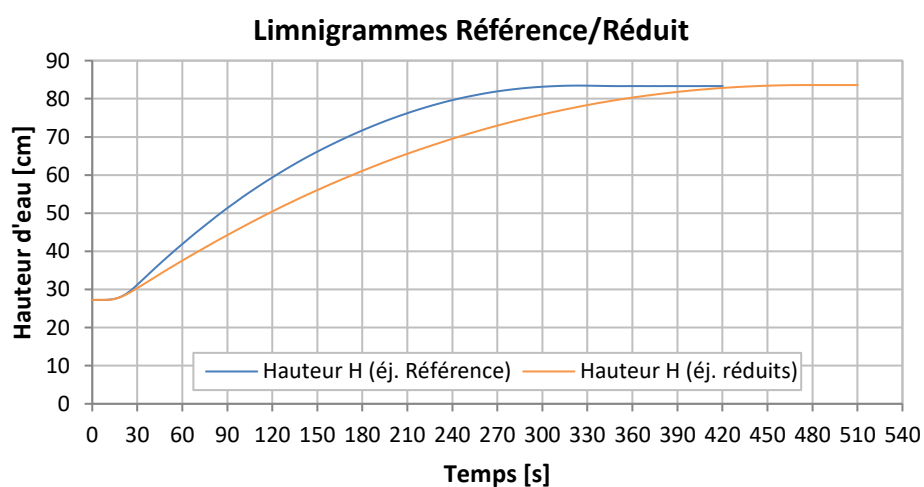


Figure 4-36: Limnigrammes - Éjecteurs de référence/réduits - Ouverture de vanne en 30s

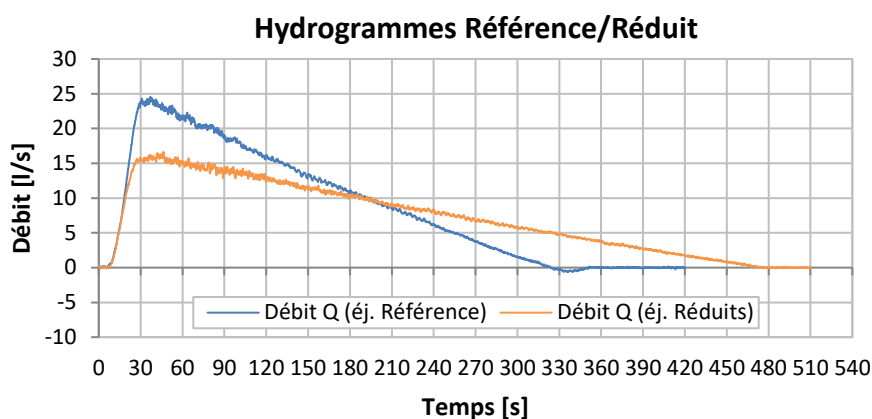


Figure 4-37: Hydrogrammes - Éjecteurs de référence/réduits - Ouverture de vanne en 30s

La taille des éjecteurs étant réduite de moitié, le temps de remplissage, avec la même loi d'ouverture de vanne, est augmenté.

Afin de comparer des résultats pour un remplissage à niveau égal, nous avons redéterminé l'hydrogramme pour le cas des éjecteurs réduits. La Figure 4-38 représente en orange l'hydrogramme original et en brun foncé l'hydrogramme tel qu'il serait si l'évolution du niveau d'eau était égale à celle relative aux éjecteurs de référence.

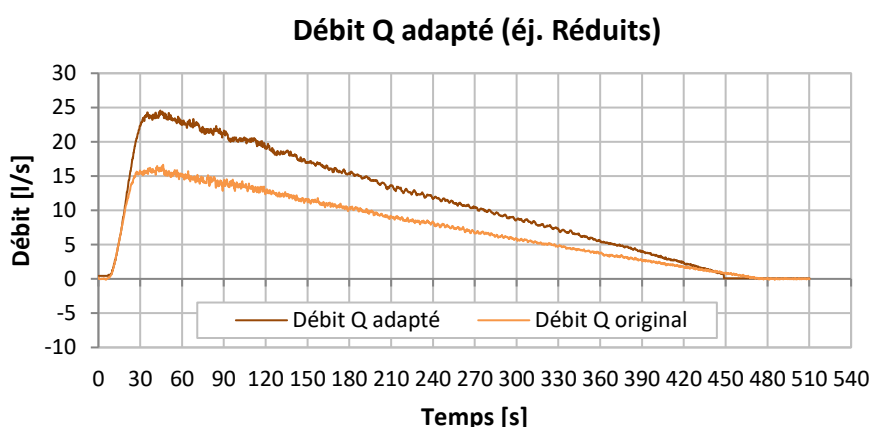


Figure 4-38: Hydrogrammes (original et adapté) relatifs aux éjecteurs réduits

Nous avons ensuite déterminé le facteur liant le débit adapté au débit original. Ce facteur est le celui que l'on doit appliquer aux champs de vitesses mesurés dans le cadre des éjecteurs réduits pour qu'ils puissent être comparés aux champs de vitesses observés pour des éjecteurs de référence (Figure 4-39).

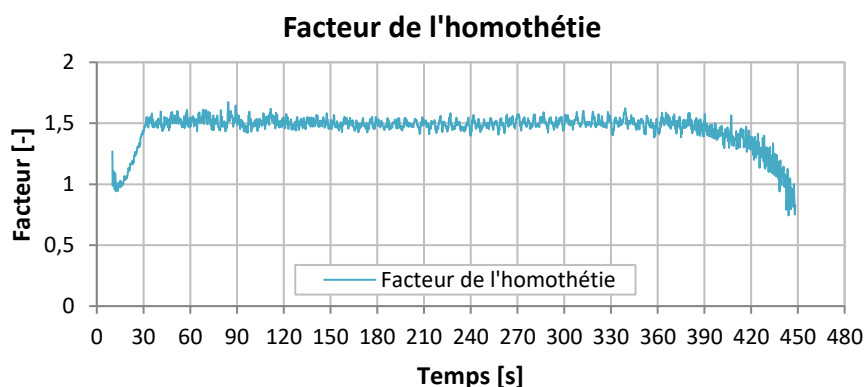


Figure 4-39: Facteur de l'homothétie des champs de vitesses

Les résultats des champs de vitesses transversales sont présentés ci-après, sous forme d'illustrations obtenues via le logiciel Matlab, pour différentes configurations et à différents temps du remplissage. Ces représentations permettent de mieux comprendre le comportement de l'eau lors d'un remplissage en mode dégradé.

1^{ère} configuration :

Sortie : Éjecteur de référence

Positionnement : Au droit de l'éjecteur

Sur la Figure 4-41, on aperçoit le champ de vitesse 30s après l'ouverture de la vanne. À ce moment-là, la vanne est complètement ouverte et le débit est maximum. La hauteur d'eau est de 31 cm. Sur les figures suivantes, la ligne d'eau en bleu clair n'est pas toujours visible. C'est la raison pour laquelle la mi-hauteur d'eau a également été indiquée en pointillés gris horizontaux.

Le jet sortant de l'éjecteur continue tout droit jusqu'à rencontrer le bajoyer opposé. À partir de là, le jet remonte vers la surface libre. On peut également observer, sur l'axe de symétrie vertical du sas et dans la partie supérieure du matelas d'eau, un champ de vitesses indiquant le retour de l'eau en direction du bajoyer fonctionnel. Globalement, on voit qu'un effet giratoire se crée dans le sas.

À la Figure 4-40, on aperçoit le champ de vitesse 60s après l'ouverture. La hauteur d'eau est de 42 cm. On aperçoit que le phénomène giratoire reste semblable. Pour rappel, aucune prise de mesure n'a pu être faite au-dessus de 24 cm comme expliqué précédemment. Aucune information n'est disponible pour savoir ce qui se passe entre la hauteur de 24 cm et la surface libre. Nous pouvons cependant supposer que le retour de l'eau a bien lieu mais plus haut, proche de la surface libre. On peut également apercevoir un champ de vitesse dirigé vers le bas le long du bajoyer fonctionnel indiquant que l'effet giratoire se poursuit.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

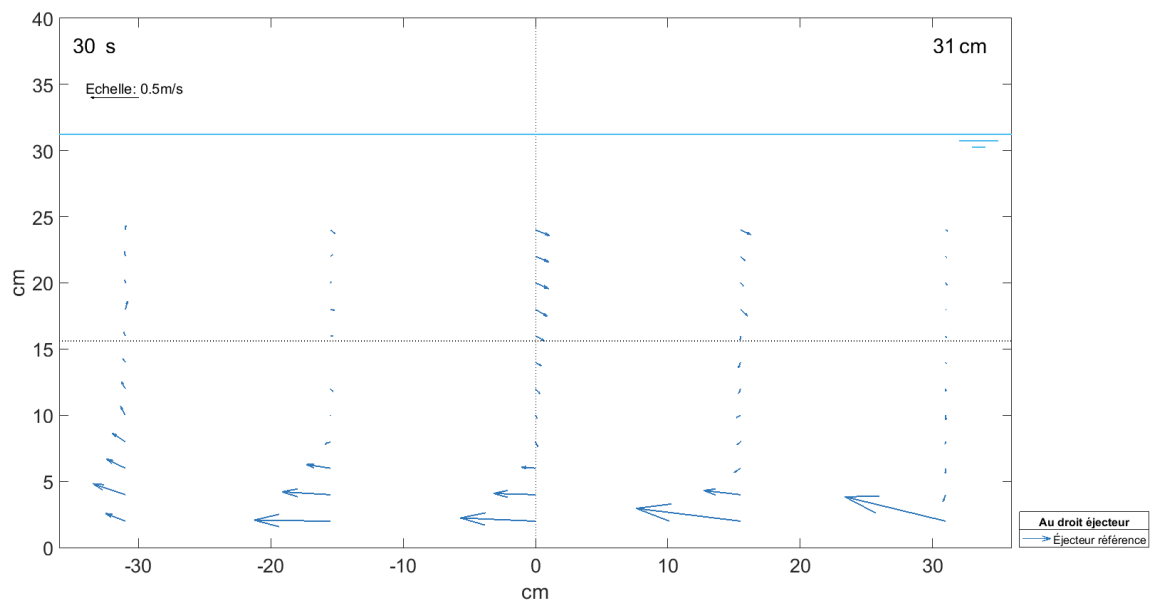


Figure 4-41: Champ de vitesses au droit de l'éjecteur de référence – 30s après ouverture

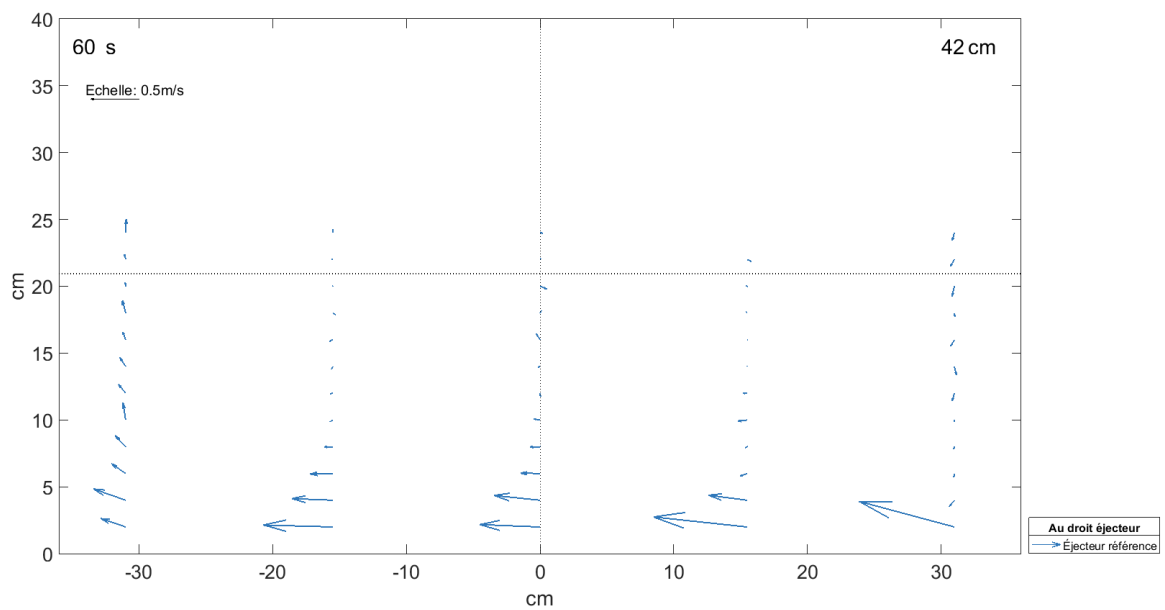


Figure 4-40: Champ de vitesses au droit de l'éjecteur de référence – 60s après ouverture

2^{ème} configuration :

Sortie : Comparaison éjecteur de référence et éjecteur réduit

Positionnement : Au droit de l'éjecteur

Le deuxième cas de figure permet de comparer l'intensité du champ de vitesses pour deux tailles d'éjecteurs différentes. Cette comparaison se fait pour le même débit d'entrée comme expliqué en introduction de cette section.

À la Figure 4-42 , on observe les champs de vitesse 30s après l'ouverture de la vanne. On peut voir que l'intensité du champ de vitesse est plus importante avec les éjecteurs réduits qu'avec les éjecteurs de référence. On peut aussi remarquer que le comportement de l'eau est totalement identique. L'effet giratoire de l'eau est bien visible.

On peut observer, à la Figure 4-43, le champ de vitesses 90s après l'ouverture de la vanne. L'intensité est plus importante pour l'éjecteur réduit mais le comportement de l'eau entre les deux types d'éjecteurs est toujours identique. Après 90s, on observe que l'intensité du jet a diminué et que le phénomène giratoire s'est amenuisé. Cependant, le retour de l'eau dans la partie supérieure du matelas d'eau ne peut pas être observé pour les raisons évoquées précédemment.

La conclusion que l'on peut tirer de cette deuxième configuration est que la taille des éjecteurs n'influencera pas le comportement global de l'eau mais seulement l'intensité du phénomène giratoire.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

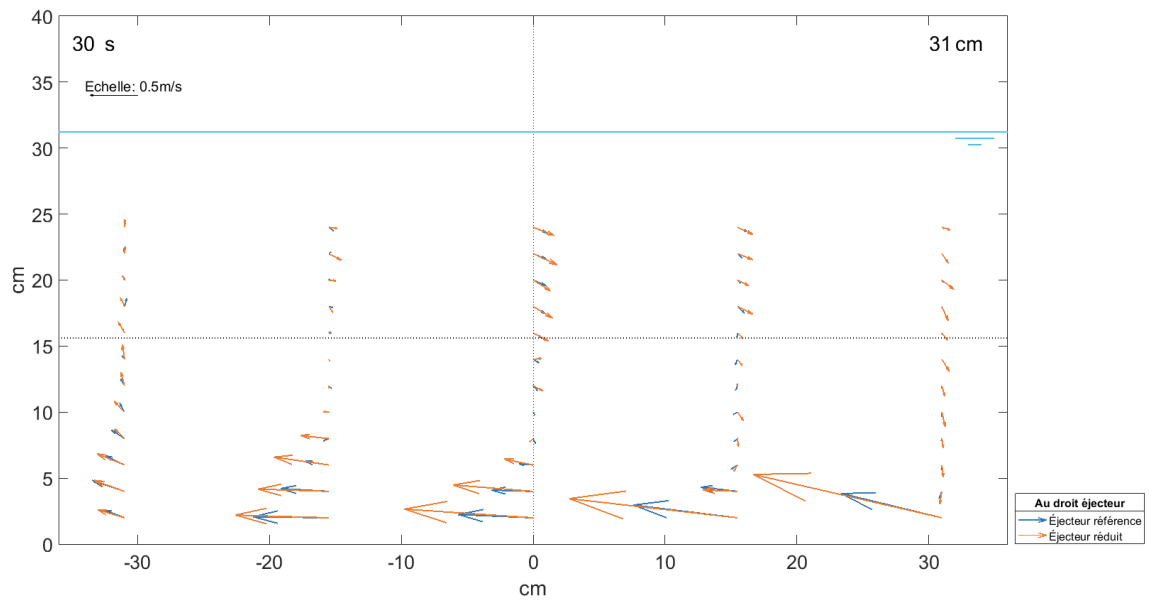


Figure 4-42: Champs de vitesses : éjecteur de référence/réduit - Au droit de l'éjecteur - 30s après ouverture

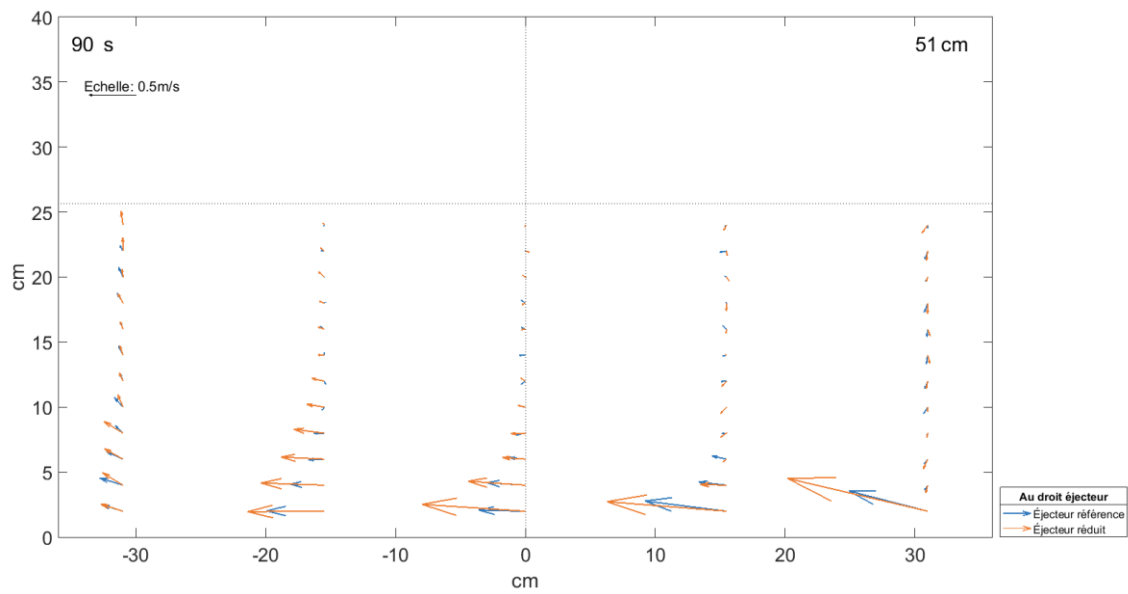


Figure 4-43: Champs de vitesses : éjecteur de référence/réduit - Au droit de l'éjecteur - 90s après ouverture

3^{ème} configuration :

Sortie : Comparaison éjecteur de référence et éjecteur réduit

Positionnement : Entre éjecteurs

Dans cette configuration, les prises de vitesses sont placées entre deux sorties d'éjecteurs. Ce cas permet d'étudier la diffusion latérale du jet.

La Figure 4-44 est une représentation du champ de vitesses 20s après l'ouverture de la vanne. Un champ de vitesses est observé sur le bajoyer opposé à l'ouverture. Ce champ résulte de la diffusion du jet sortant de l'éjecteur.

Le champ de vitesse entre éjecteurs et 60s après l'ouverture est visible à la Figure 4-45. Deux phénomènes sont visibles sur cette figure.

Premièrement, le champ de vitesses visible sur le bajoyer gauche (flèche bleu) provient de la diffusion du jet sortant de l'éjecteur.

Deuxièmement, le courant de retour (flèche jaune) descendant le long du bajoyer droit est bien développé et provient de l'effet d'entraînement de la masse d'eau en rotation.

L'analyse de cette troisième configuration permet de montrer la diffusion latérale du jet et qu'un effet d'entraînement accentue l'effet giratoire présent dans le sas.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

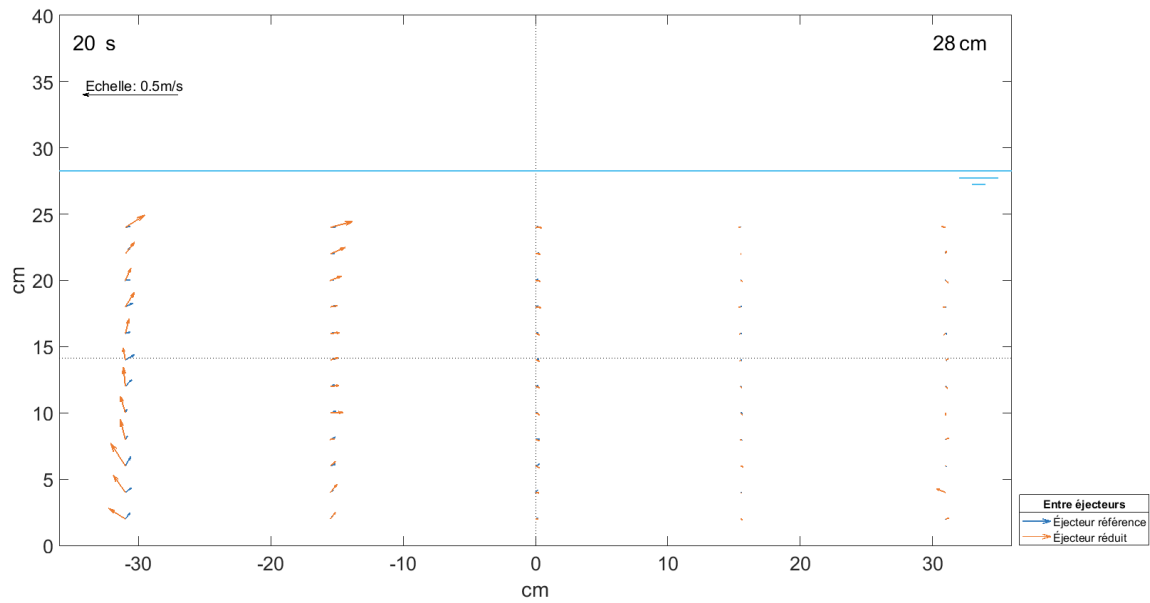


Figure 4-44: Champs de vitesses : éjecteur de référence/réduit - Entre éjecteurs - 20s après ouverture

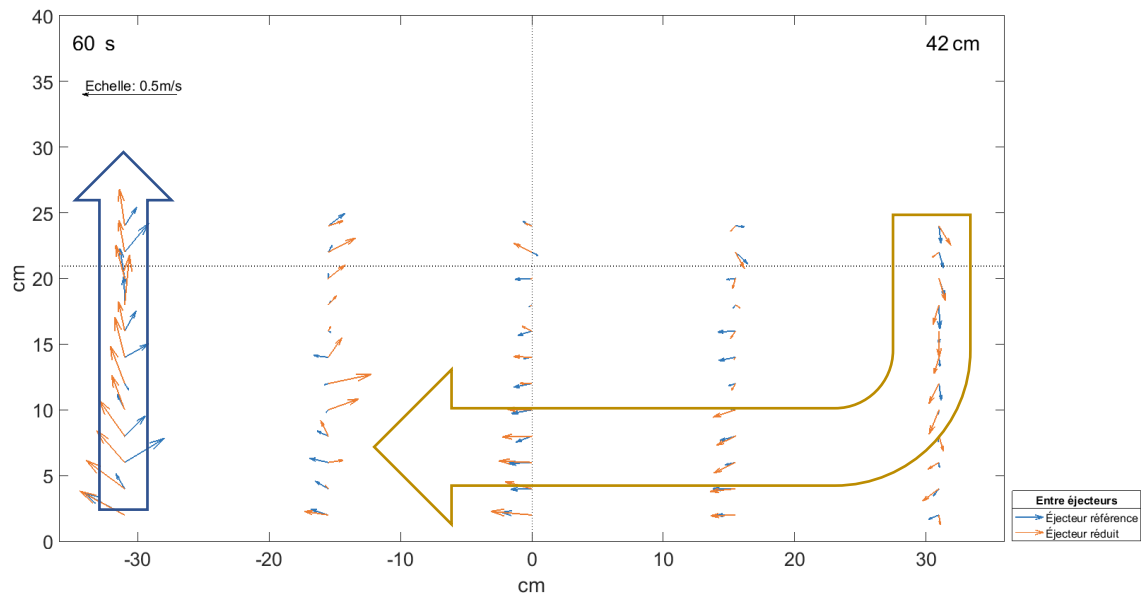


Figure 4-45: Champs de vitesses : éjecteur de référence/réduit - Entre éjecteurs - 60s après ouverture

4^{ème} configuration:

Sortie : Éjecteur de référence

Positionnement : Comparaison au droit et entre éjecteurs

Ce cas de figure permet de comparer le champ de vitesse au même moment entre et au droit des éjecteurs.

La Figure 4-46 montre la configuration avec éjecteurs de référence, 20 secondes après l'ouverture de la vanne. La Figure 4-47 montre celle 60 secondes après l'ouverture de la vanne.

De la Figure 4-46 à la Figure 4-47, on observe un certain décalage temporel avant que n'apparaissent entre éjecteurs les champs de vitesses et donc le phénomène giratoire. C'est le résultat de la diffusion lente du jet latéralement.

Une autre conclusion que l'on peut tirer de l'étude de ces cas de figure est qu'au droit des éjecteurs, les vitesses apparaissent surtout à proximité des parois. L'effet giratoire se passe donc surtout le long des parois du sas. Entre éjecteurs en revanche, les champs de vitesses sont plus uniformes sur toute la hauteur d'eau et l'effet giratoire perturbe tout le matelas d'eau.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

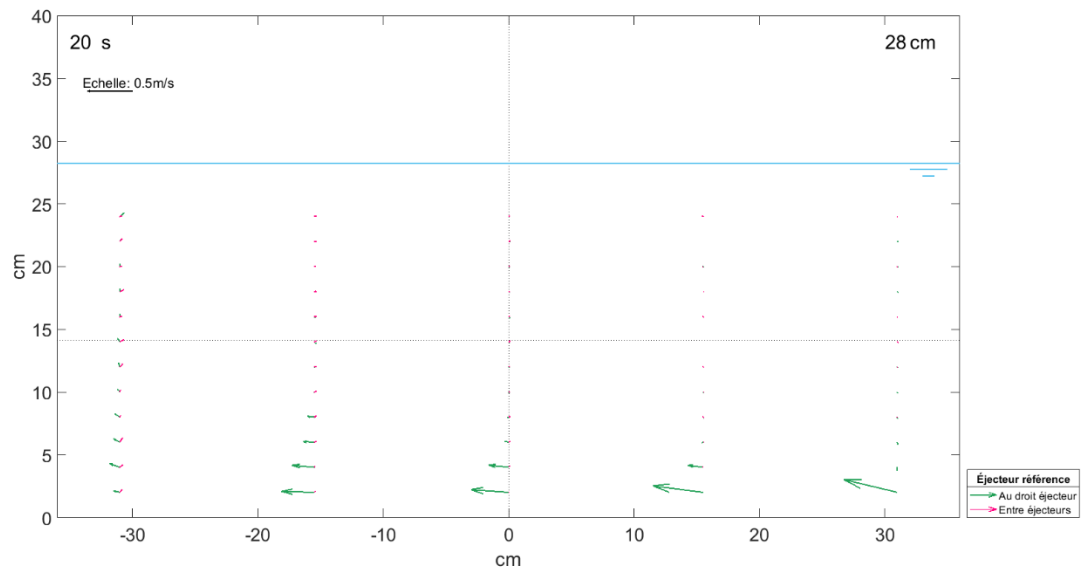


Figure 4-46: Champs de vitesses : éjecteur de référence – Au droit/Entre éjecteurs - 20s après ouverture

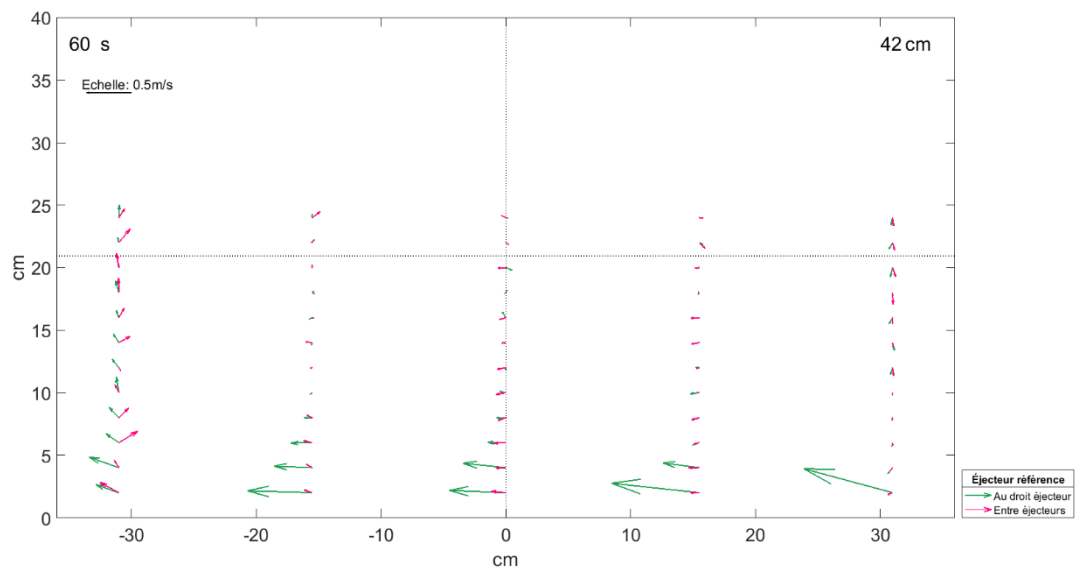


Figure 4-47: Champs de vitesses : éjecteur de référence – Au droit/Entre éjecteurs - 60s après ouverture

5^{ème} configuration:*Sortie : Éjecteur réduit**Positionnement : Comparaison au droit et entre éjecteurs*

Les observations faites pour la configuration 4 restent valables pour le cas des éjecteurs réduits. Cependant, on peut à nouveau observer que l'intensité des phénomènes de rotation et de diffusion est plus importante (Figure 4-48 et Figure 4-49).

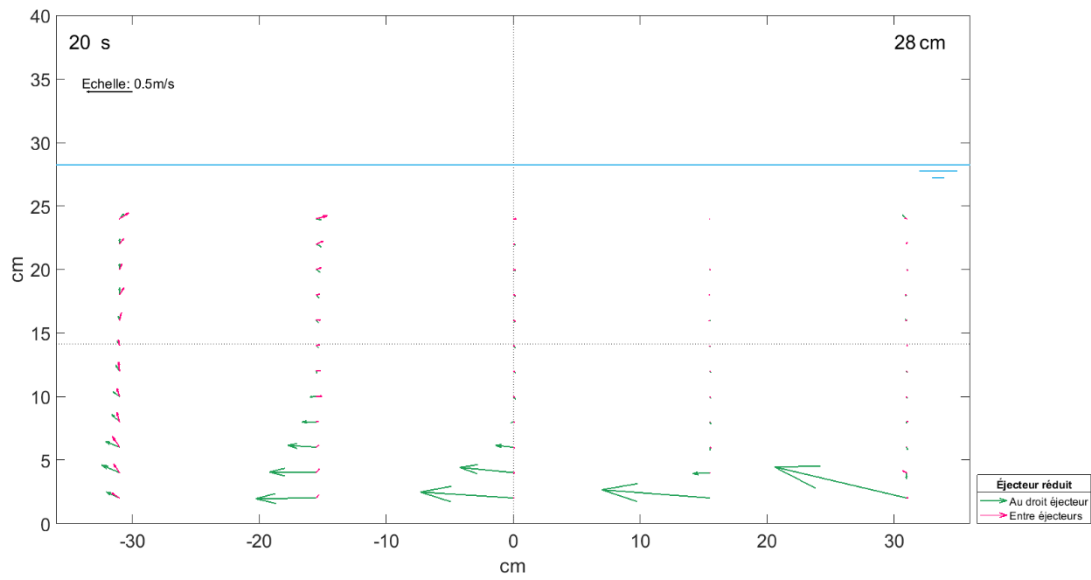


Figure 4-48: Champs de vitesses : éjecteur réduit – Au droit/Entre éjecteurs - 20s après ouverture

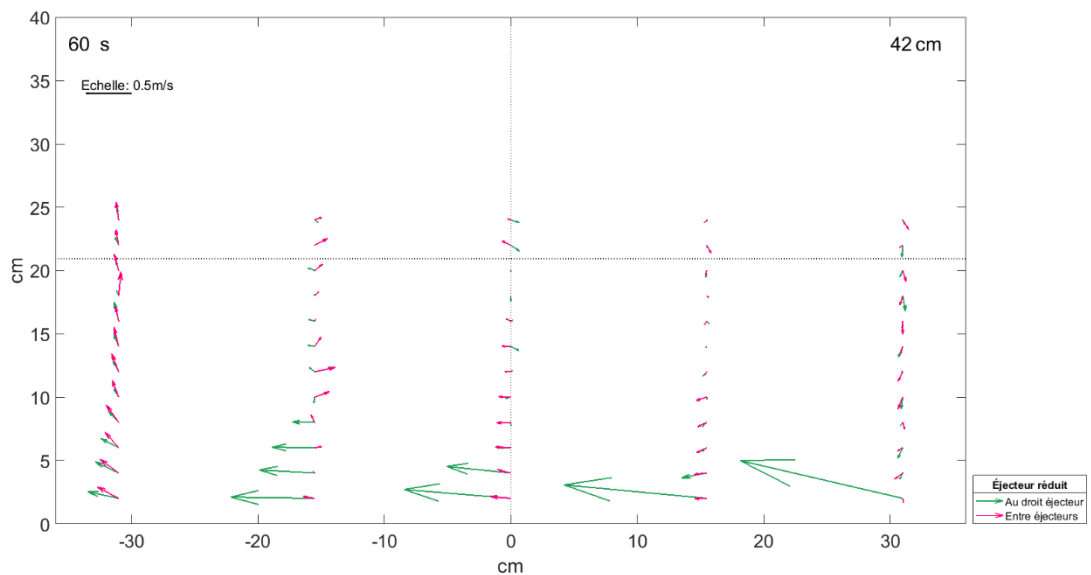


Figure 4-49: Champs de vitesses : éjecteur réduit – Au droit/Entre éjecteurs - 60s après ouverture

4.6.1 Intégration des vitesses

Dans le but de quantifier l'effet d'entraînement de la masse d'eau en rotation dans le sas lors d'un remplissage en mode dégradé, une intégration des champs de vitesses a été réalisée, afin d'obtenir le débit passant au travers une section donnée.

Les débits calculés sont représentés à la Figure 4-50. Le débit Q_3 n'a pas pu être calculé en raison du manque de données de vitesses au-delà de la hauteur $h = 24\text{cm}$.

$$Q_1 = \int_0^Z v_x(z).L. dz \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$Q_2 = \int_0^{B/2} v_y(b).L. db \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

$$Q_4 = \int_0^{B/2} v_y(b).L. db \quad [\text{m}^3/\text{s}]$$

Où :

$v_x(z)$: la vitesse transversale de l'eau, issue des mesures

$v_y(b)$: la vitesse verticale de l'eau, issue des mesures

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

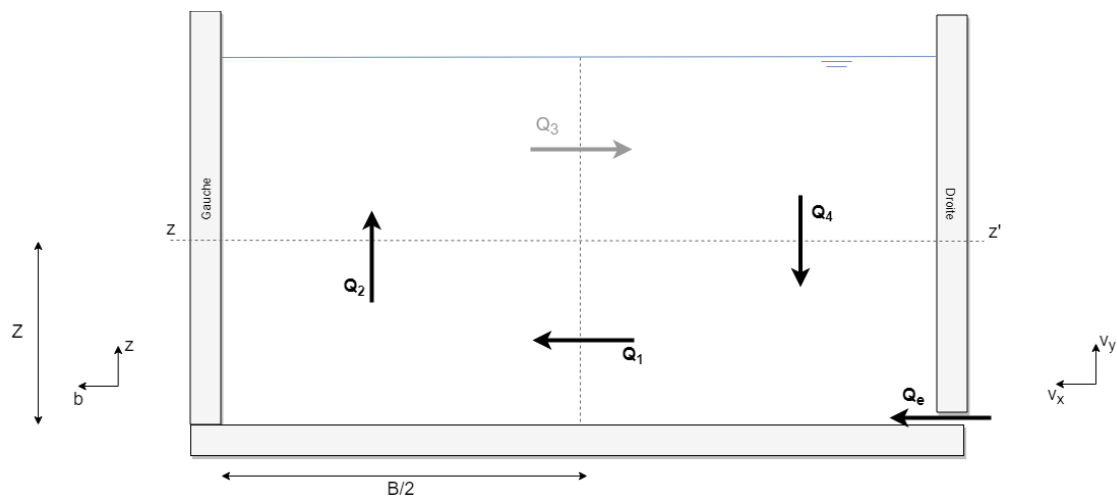


Figure 4-50: Débits Q_1 à Q_4 calculés au travers des sections correspondantes

Afin de déterminer ces débits il a fallu :

- 1) Déterminer L_d et L_e (Figure 4-51) : les largeurs relatives à ce qu'il se passe *au droit* et *entre* éjecteurs respectivement.

$$L = L_d + L_e$$

Pour cela, il a fallu estimer l'angle de diffusion du jet dans le plan horizontal. Sur base de l'article W. Hager sur les écoulements divergents à surface libre [23], nous avons pu faire l'hypothèse d'un angle de diffusion 10° tel que représenté sur la Figure 4-51.

$$L_d = 2 * \frac{B}{2} * \text{tg}(10^\circ)$$

$$L_e = L - L_d$$

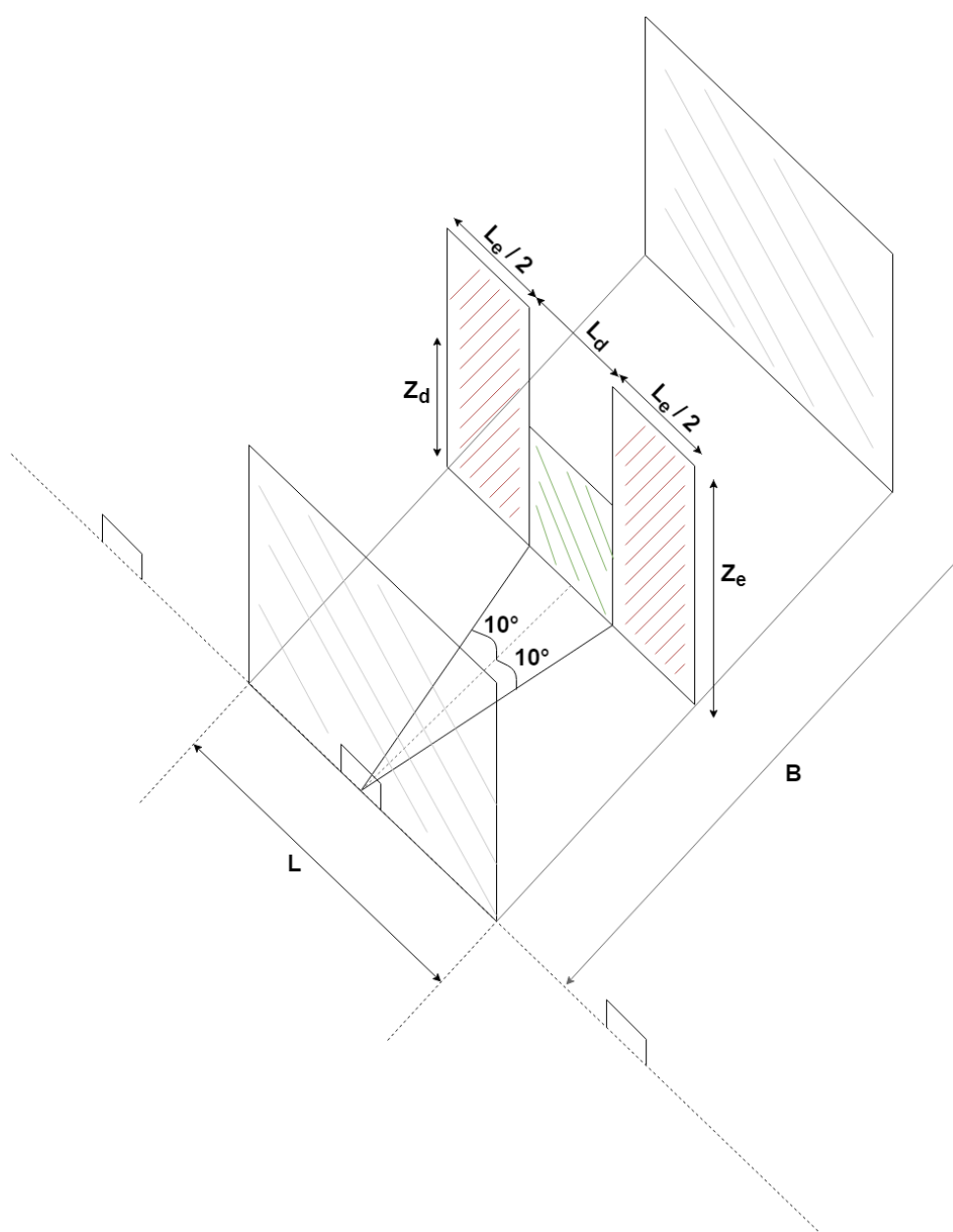


Figure 4-51: Section d'intégration relative au débit Q1

- 2) Déterminer Z_d et Z_e (Figure 4-51) : les centres du gire *au droit* et *entre* éjecteurs. Une première intuition, en observant les Figure 4-52 et Figure 4-53, serait de dire que les centres de gire sont situés à $Z_d = 0,25.h$ au droit des éjecteurs (Figure 4-52) et à $Z_e = 0,5.h$ entre les éjecteurs (Figure 4-53). Ces hauteurs sont apparemment indépendantes de la taille des éjecteurs.

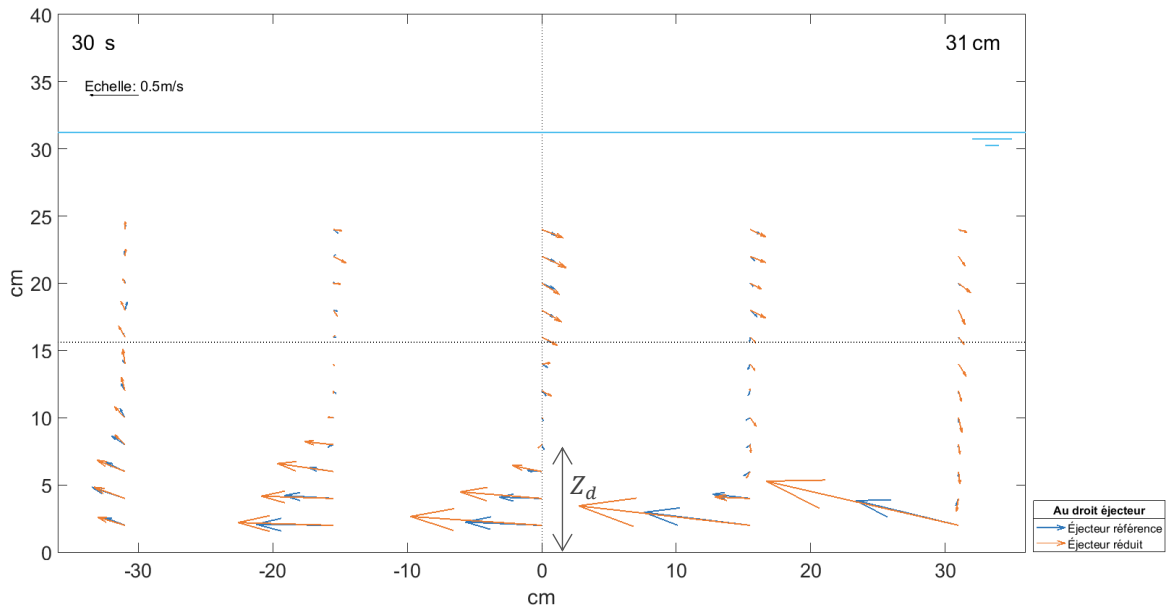


Figure 4-52: Champs de vitesses au droit des éjecteurs pour les deux types de sortie

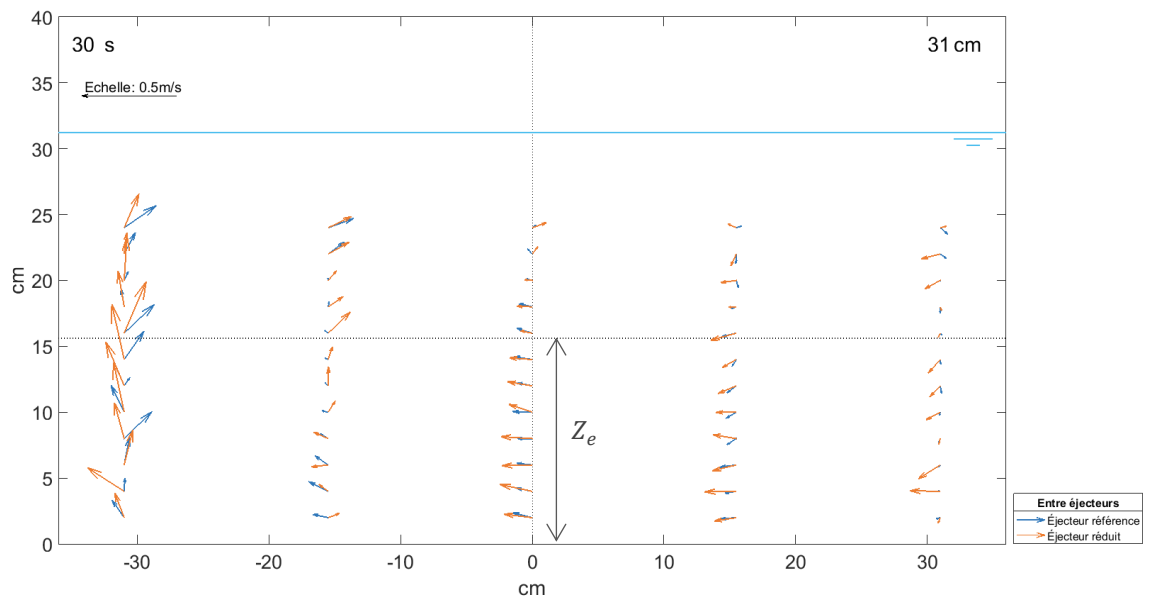


Figure 4-53: Champs de vitesses entre éjecteurs pour les deux types de sortie

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Les Figure 4-54, Figure 4-55, Figure 4-56 et Figure 4-57 nous confirment ces hypothèses. Elles illustrent ce qu'il se passe sur un axe vertical à mi-distance des deux bajoyers. Elles représentent d'une part, la mi-hauteur d'eau (représentée par les points losanges), à différents temps du remplissage et d'autre part, le profil de vitesses transversales v_x en fonction de la hauteur z pour ces mêmes temps de remplissage (en traits continus).

On peut confirmer que les centres de gire sont situés approximativement à $Z_d = 0,25 \cdot h$ au droit des éjecteurs (Figure 4-54 et Figure 4-55) et à $Z_e = 0,5 \cdot h$ entre les éjecteurs (Figure 4-56 et Figure 4-57).

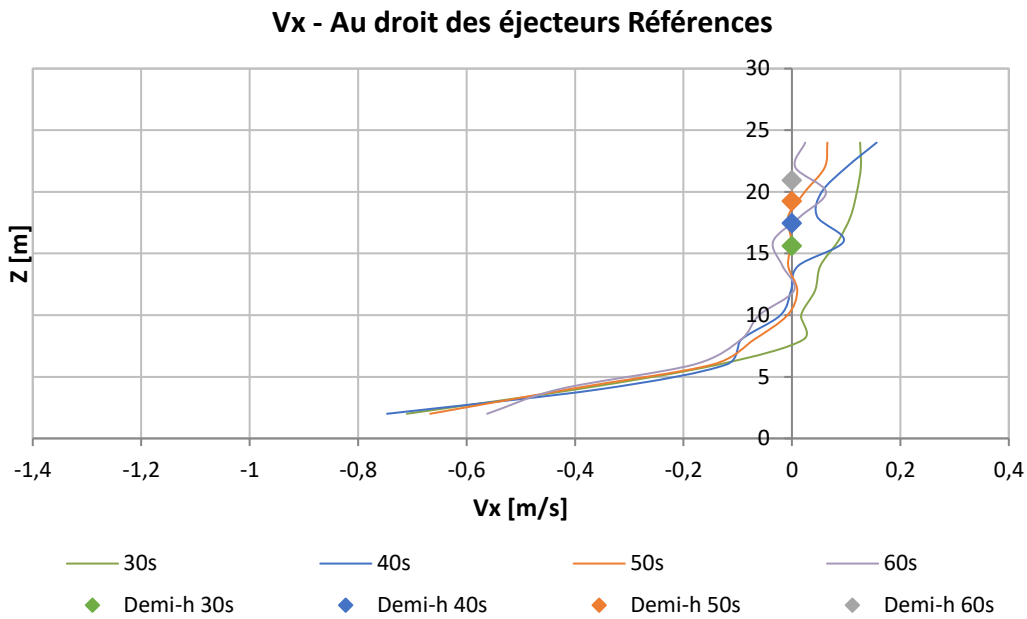


Figure 4-54: Profil de vitesses transversales - Au droit des éjecteurs de référence

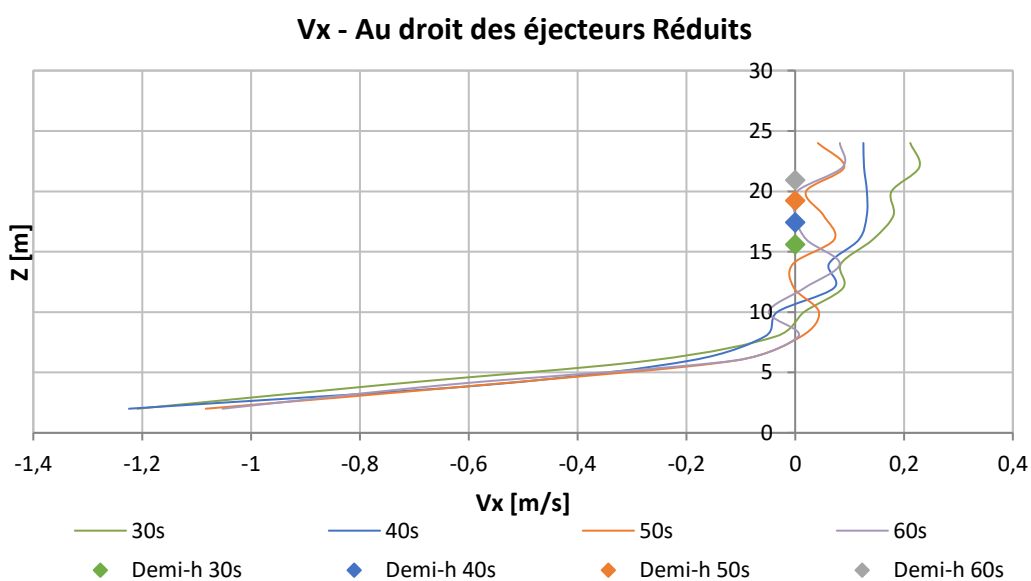


Figure 4-55: Profil de vitesses transversales - Au droit des éjecteurs réduits

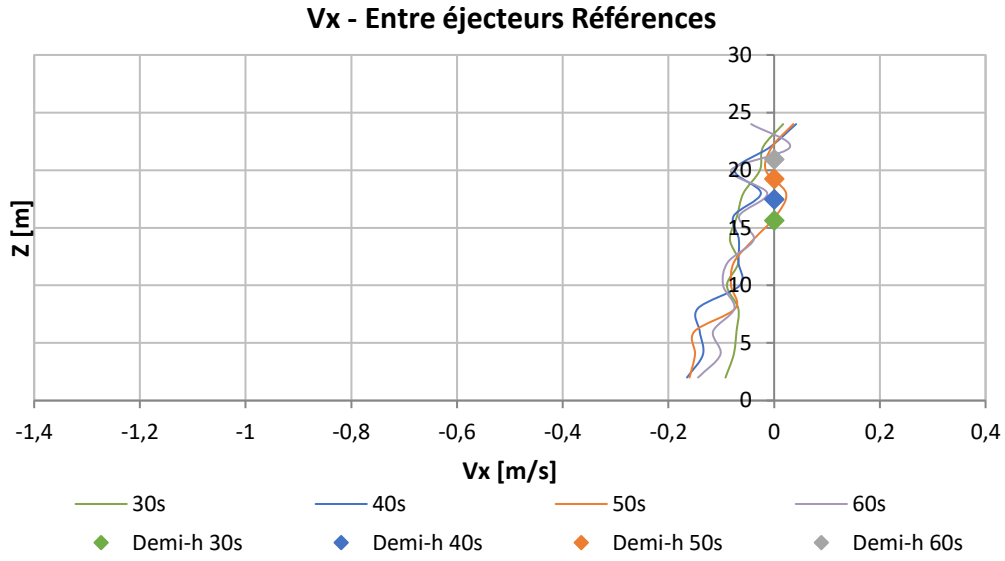


Figure 4-56: Profil de vitesses transversales - Entre éjecteurs de référence

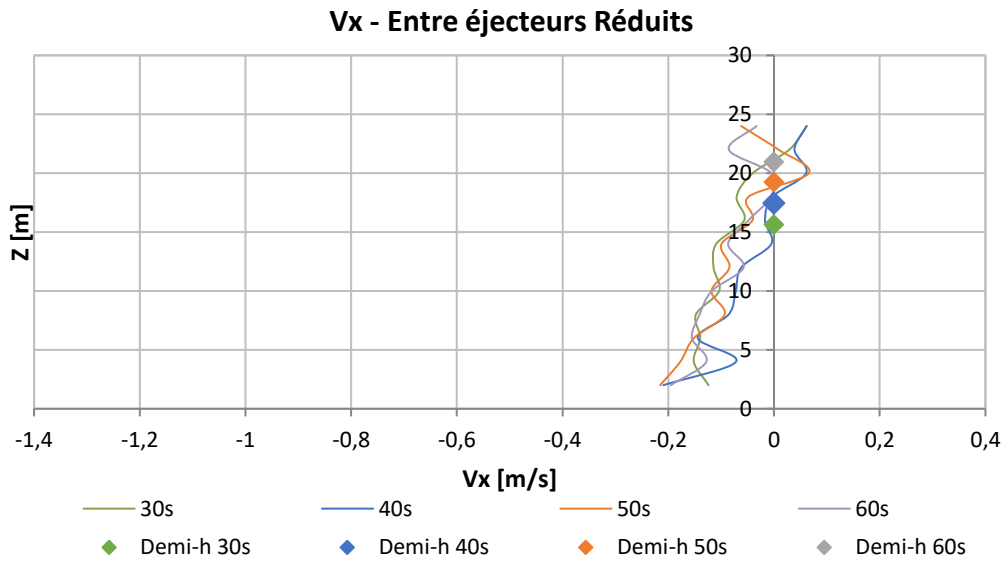


Figure 4-57: Profil de vitesses transversales - Entre éjecteurs réduits

3) Réaliser les intégrations :

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

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

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

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Le résultat des intégrations fournissant les débits Q_1 , Q_2 et Q_4 est visible aux Figure 4-58 et Figure 4-59. Le débit Q_e représente le débit à la sortie d'un éjecteur, calculé à partir du débit total, lui-même calculé à partir de l'évolution du niveau d'eau dans le sas $\frac{dh}{dt}$ [m/s] et de sa surface S [m²]:

$$Q_e = \frac{Q_{tot}}{20} \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad \text{avec} \quad Q_{tot} = S \cdot \frac{dh}{dt} \left[\frac{m^3}{s} \right]$$

Une synthèse des valeurs maximales des débits Q_e , Q_1 , Q_2 et Q_4 est reprise dans le Tableau 4-4.

Les vitesses prises en compte dans le cas des éjecteurs réduits sont les vitesses adaptées (multipliées par le facteur de l'homothétie $f = 1,5$) pour correspondre à un hydrogramme de remplissage similaire à celui du cas des éjecteurs de référence. Cette adaptation impliquant également un décalage des vitesses mesurées, il n'a pas été possible de représenter les débits au-delà de $t = 270s$ pour le cas d'éjecteurs réduits.

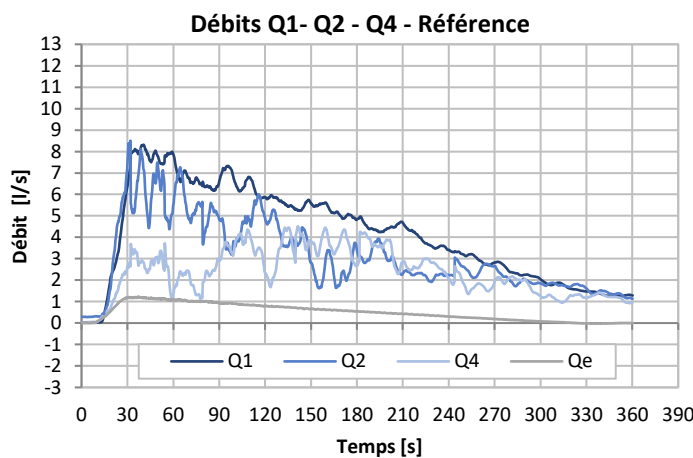


Figure 4-58: Débits calculés - Éjecteurs de référence

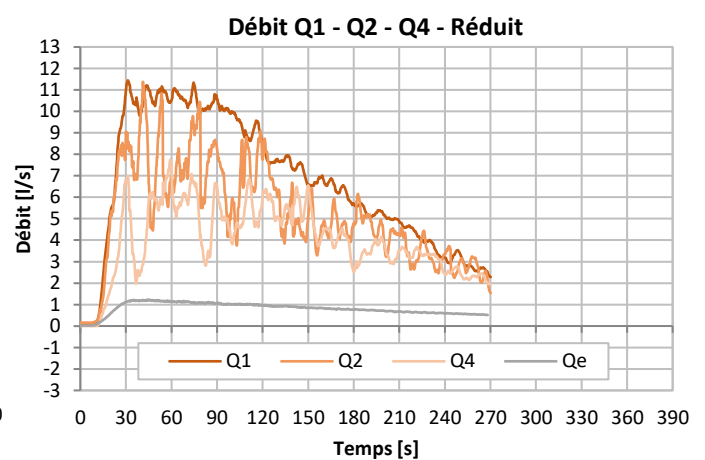


Figure 4-59: Débits calculés - Éjecteurs réduits

Débits maximaux	Éjecteurs de Référence	Éjecteurs réduits
Q_e [l/s]	1,2	1,2
Q_1 [l/s]	8,3	11,5
Q_2 [l/s]	8,5	11,4
Q_4 [l/s]	4,5	7,8

Tableau 4-4: Synthèse des valeurs maximales des débits

Cette représentation graphique et ces chiffres illustrent un effet élevé d'entraînement de la masse d'eau. Le débit Q_e sortant de la section de l'éjecteur évolue de la manière suivante : sur une section comprise entre deux éjecteurs, le débit augmente fortement entre l'éjecteur et la section 1, reste stable jusqu'à la section 2 et diminue à la section 4. En effet, une partie du débit entre la section 2 et 4 sert à faire monter le niveau de l'eau.

Sur les six graphes de la Figure 4-60, sont représentés en vert et rouge la part du débit associée aux vitesses *au droit* et *entre éjecteurs* respectivement.

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

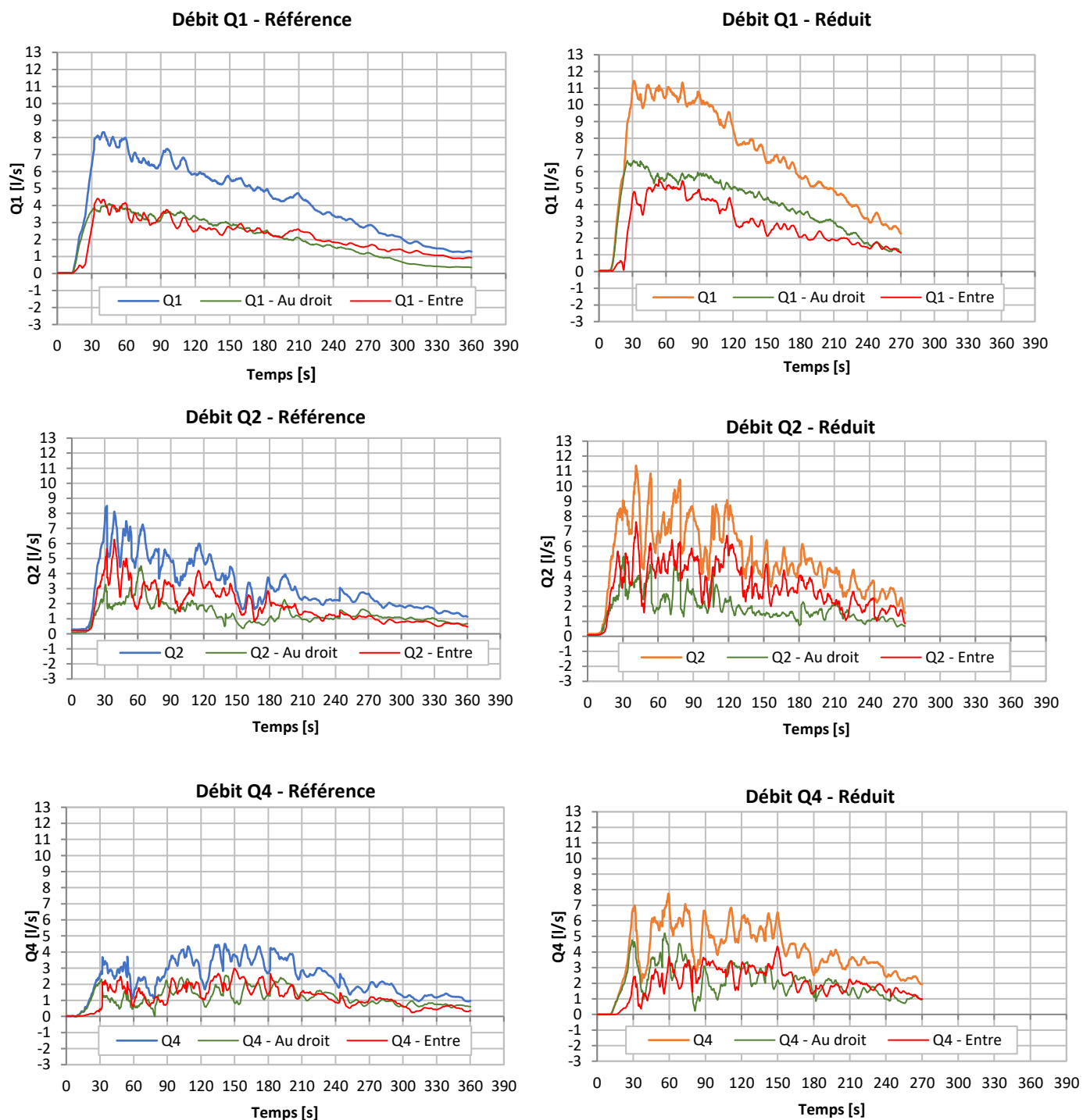


Figure 4-60: Débits Q1, Q2 et Q4 calculés par intégration des vitesses - Au droit et entre éjecteurs - Éjecteurs de référence et réduits

En observant l'évolution du débit entre éjecteurs (courbe rouge), on constate que celui-ci, d'abord équivalent au débit au droit des éjecteurs (à la section 1), prend ensuite une part plus importante à la section 2 pour rediminuer en proportion à la section 4. Cette constatation montre l'effet d'épanouissement en éventail du jet lorsque celui-ci remonte le long du bajoyer.

4.6.2 Modèle conceptuel et comparaison

Afin d'évaluer un débit analytique comparable aux débits évalués par la méthode précédente, un modèle conceptuel de la situation a été réalisé (Figure 4-61) :

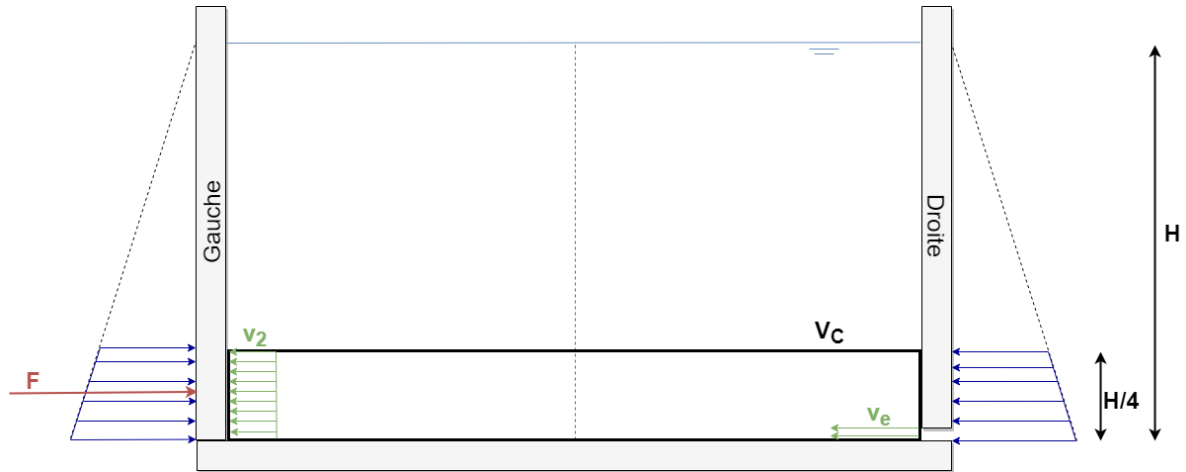


Figure 4-61: Modèle conceptuel

La vitesse v_e est connue (calculée à partir de Q_e introduit dans la section précédente) et on cherche dans un premier temps à déterminer la force F de l'eau sur le bajoyer, ou la réaction du bajoyer sur le volume de contrôle V_c . En particulier, on s'interroge sur la capacité de cette force (transformée en différence de pression) à générer le gire de l'eau au sein du sas.

Avant de décrire les équations utilisées, il est important de préciser certaines hypothèses :

- La hauteur du centre de rotation du gire et donc du volume de contrôle est prise égale à un quart de la hauteur d'eau. Cette hypothèse est établie sur base des observations expérimentales au droit d'un éjecteur.
- La force F de l'eau sur le bajoyer induit une différence de pression entre les deux bajoyers, supposée purement hydrostatique.

On peut écrire les équations de conservation suivantes :

Équation de continuité :

$$v_e \cdot A_e = v_2 \cdot A_2$$

Où :

$A_e = b \cdot h_e$ avec b la largeur de l'éjecteur et h_e la hauteur de l'éjecteur

$A_2 = b \cdot \frac{H}{4}$ avec b la largeur du volume de contrôle (égale à la largeur de l'éjecteur)

Équation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\rho_w(Q_2 \cdot v_2 - Q_e \cdot v_e) = \sum F$$

$$\rho_w(A_2 \cdot v_2^2 - Q_e \cdot v_e) = \sum F$$

En supposant que la force F est purement hydrostatique, par hypothèse :

$$F = \frac{h^2 \cdot b \cdot \gamma_w}{2} [N]$$

Où $h [m]$ est la différence de hauteur d'eau, $b [m]$ la largeur du volume de contrôle et $\gamma_w [N/m^3]$ le poids volumique de l'eau ($9810 N/m^3$)

On obtient :

$$h = \sqrt{\frac{2 \cdot F}{b \cdot \gamma_w}}$$

Cette pente d'eau générée aura tendance à vouloir se stabiliser à l'horizontale par un mouvement de rotation. En supposant le point de rotation du plan d'eau à mi-largeur du sas, on peut définir un certain volume d'eau $V [m^3]$ qui passera d'un côté à l'autre de ce point (Figure 4-62) :

$$V = \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2} \cdot \frac{B}{2} \cdot b$$

Où : B est la largeur du sas et b est la largeur du volume de contrôle (égale à la largeur de l'éjecteur).

On peut ainsi déterminer un débit $Q [m^3/s]$:

$$Q = \frac{V}{\Delta t}$$

En supposant que le niveau d'eau se stabilise entre chaque prise de mesure, on a $\Delta t = 0,2 s$ (égale à la période d'acquisition des mesures de vitesses).

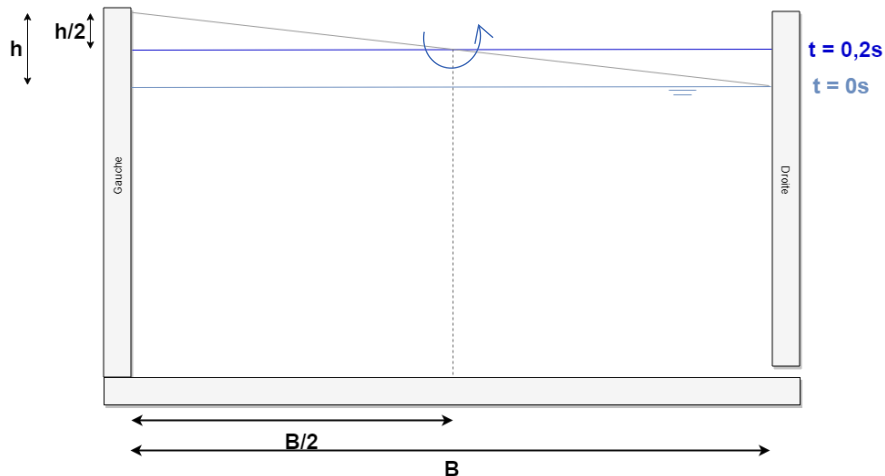


Figure 4-62 : Modèle conceptuel : inclinaison puis rotation du plan d'eau

Le débit Q ainsi défini représente un débit Q_3 théorique, que l'on peut comparer avec les débits Q_2 et Q_4 présentés à la section précédente (déterminés par intégration des vitesses mesurées expérimentalement).

Avant de réaliser la comparaison, il faut ramener les débits Q_2 et Q_4 sur une tranche de largeur égale à la largeur du volume de contrôle. Pour ce faire, on multiplie le débit par le rapport des largeurs. Deux approches sont envisagées : on peut considérer les débits Q_2 et Q_4 totaux ou bien, on peut considérer les débits Q_2 et Q_4 *entre* les éjecteurs. Les résultats sont représentés aux Figure 4-63 et Figure 4-64 pour le cas des éjecteurs de référence et aux Figure 4-65 et Figure 4-66 pour le cas des éjecteurs réduits.

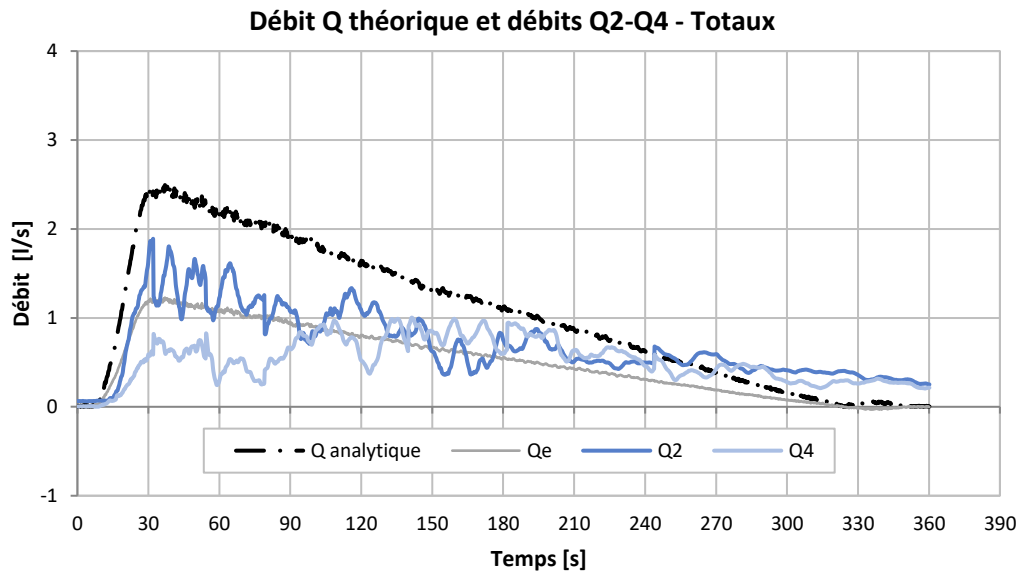


Figure 4-63: Débit théorique comparé aux débits calculés par intégration des vitesses - Débits totaux

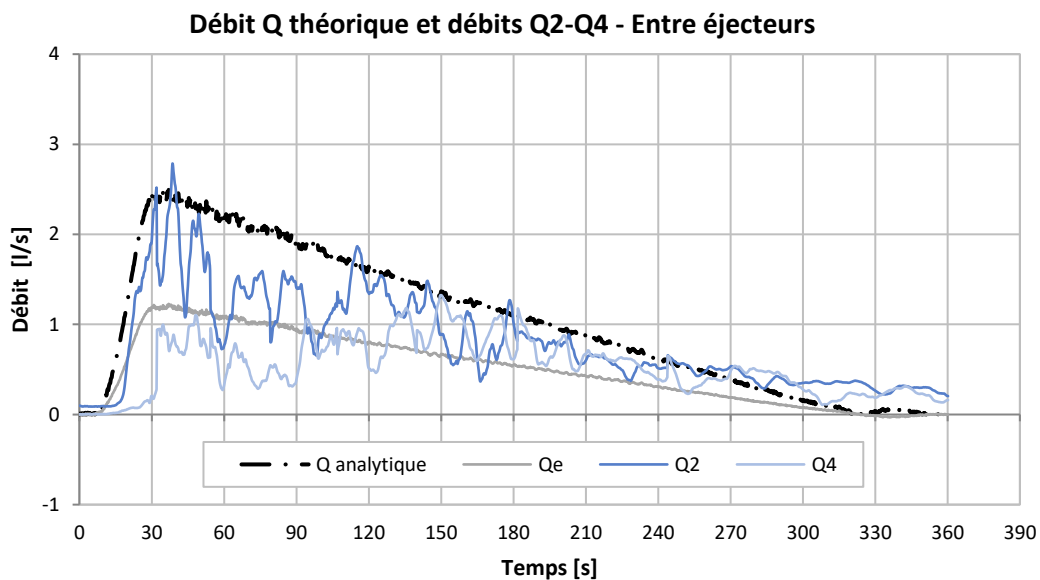


Figure 4-64: Débit théorique comparé aux débits calculés par intégration des vitesses - Débits entre éjecteurs

Idéalement, on s'attendrait à ce que le débit analytique, reflétant un potentiel Q_3 se situe entre les courbes de débits Q_2 et Q_4 . Au vu de ces résultats, cela n'est pas le cas et montre donc une faiblesse du modèle conceptuel. En revanche, on peut observer que le débit analytique reflète assez bien le débit Q_2 pour l'approche consistant à considérer le débit *entre* éjecteurs. Ces observations sont également valables pour le cas des éjecteurs réduits (Figure 4-65 et Figure 4-66).

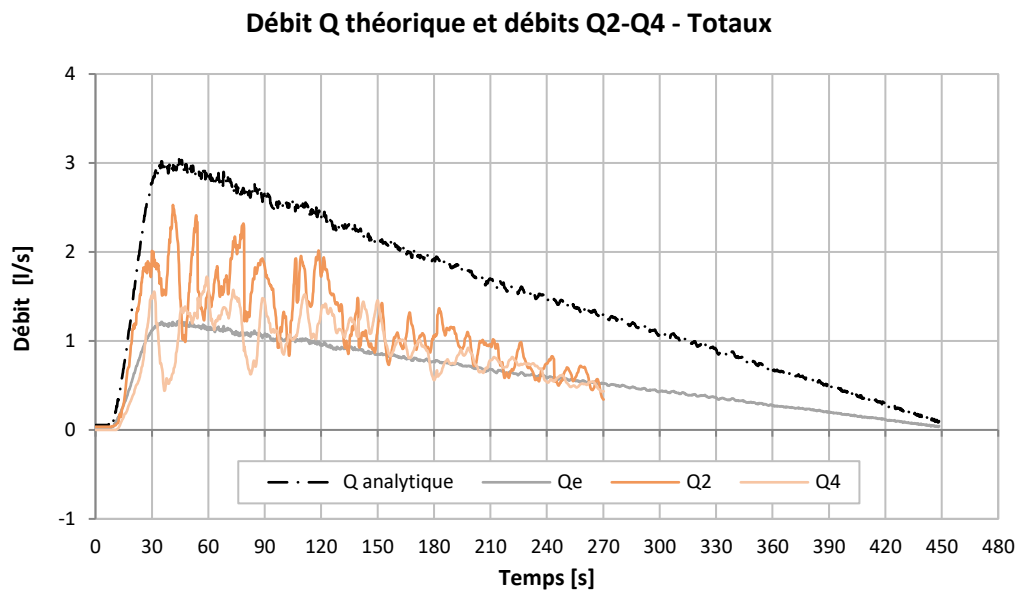


Figure 4-65: Débit théorique comparé aux débits calculés par intégration des vitesses – Débits totaux

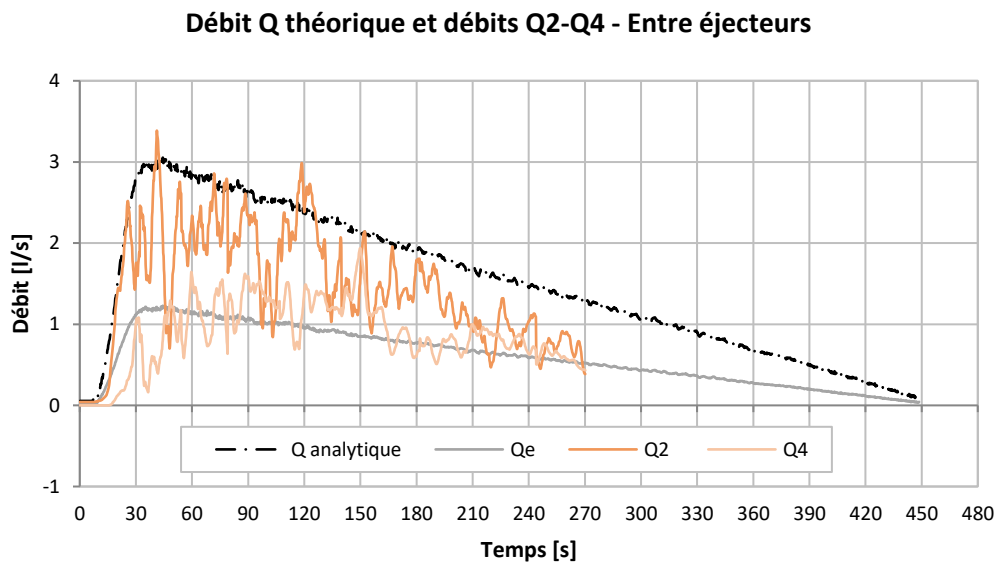


Figure 4-66: Débit théorique comparé aux débits calculés par intégration des vitesses - Débits entre éjecteurs

4.7 Influence de différents paramètres

La configuration de référence qui a été étudiée jusqu'à présent, pour un remplissage en mode dégradé, est celle d'un sas dont :

- Les éjecteurs ont une taille dite de référence (8 cm x 1 cm)
- La vanne fonctionnelle est commandée avec une loi d'ouverture linéaire en 30s
- La barge est positionnée transversalement au centre du sas (11cm de part et d'autre, entre la barge et le bajoyer)

Ou de manière codifiée : REF – 30s – Barge centrée.

Dans cette section, nous allons faire varier l'un de ces paramètres (Loi d'ouverture – Taille des éjecteurs – Position transversale de la barge) tout en gardant les autres fixes afin d'étudier l'influence de celui-ci sur l'effort d'amarrage principalement, mais également sur l'hydrogramme, la pente d'eau et le roulis. L'objectif est de déterminer quels paramètres permettent de diminuer le plus efficacement les efforts d'amarrage transversaux tout en respectant les critères de dimensionnement de l'écluse (par exemple une durée de sasement à ne pas dépasser).

4.7.1 Loi d'ouverture de la vanne

On commence par étudier l'influence de la loi d'ouverture de la vanne. Comme expliqué en début de ce travail, le choix a été porté sur des lois d'ouvertures linéaires uniquement mais dont le temps d'ouverture varie : $T_v = 30s$; $T_v = 60s$; $T_v = 90s$.

Pour rappel, un temps d'ouverture $T_v = 30s$ signifie que l'angle de la vanne passe de 0° à 90° en 30s.

Les résultats présentés dans cette partie consacrée à l'influence des lois d'ouvertures de vanne sont relatifs à la configuration suivante :

- **REF – Barge centrée**

Les résultats concernant les autres configurations sont disponibles à l'annexe 10.4 :

- REF – barge bajoyer éjecteur
- REF – barge bajoyer opposé
- RED – barge centrée
- RED – barge bajoyer éjecteur
- RED – barge bajoyer opposé

Le code RED indique une taille d'éjecteurs réduits (4 cm x 1 cm) tandis que le code « barge bajoyer éjecteur » indique que la barge est amarrée du côté de l'éjecteur fonctionnel. Enfin, le code « barge bajoyer opposé » indique que la barge se trouve du côté de l'éjecteur consigné. La distance séparant la barge du bajoyer le plus proche est de 4cm sur le modèle réduit, ce qui correspond à une distance de 1m sur site.

Influence sur l'hydrogramme

Les limnigrammes et hydrogrammes pour les différentes lois d'ouverture sont représentés respectivement aux Figure 4-67 et Figure 4-68.

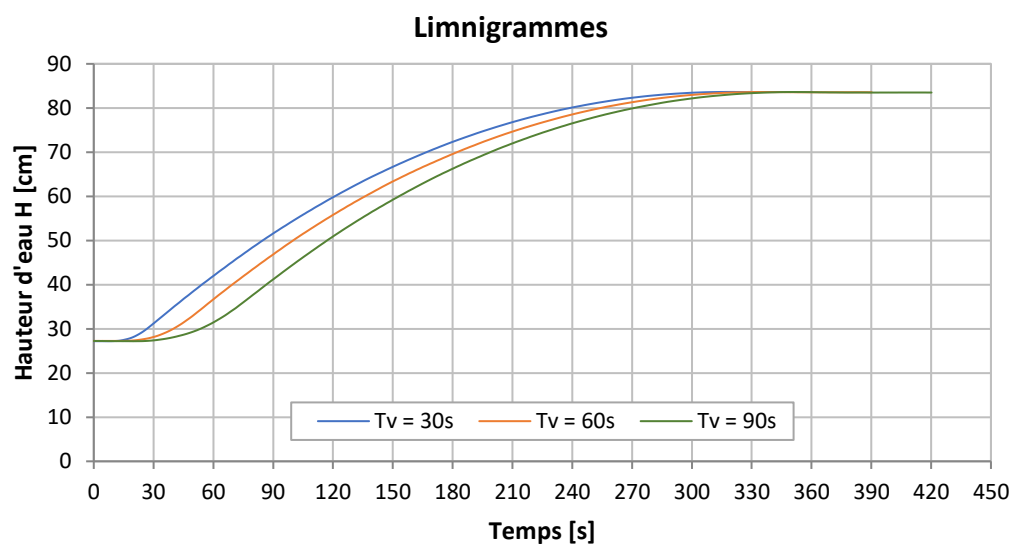


Figure 4-67: Limnigrammes pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée

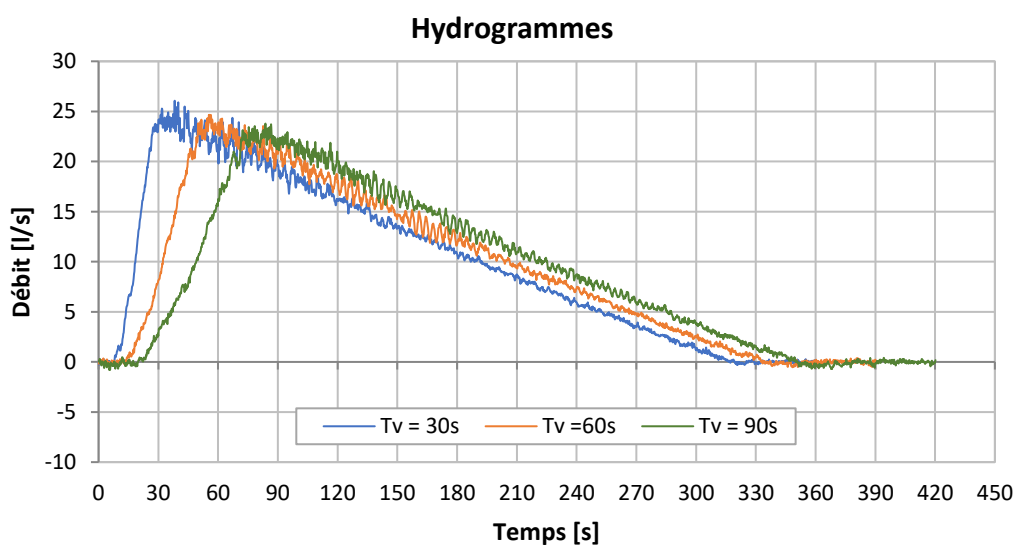


Figure 4-68: Hydrogrammes pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée

De cette représentation graphique, on peut tirer le Tableau 4-5 reprenant les débits maximaux observés ainsi que les durées de remplissage pour les différentes lois d'ouverture de la vanne :

Temps d'ouverture	Débit maximal [l/s]	Durée de remplissage [s]
30 s	25,9	321
60 s	24,8	335
90 s	24,6	356

Tableau 4-5: Synthèse des débits et durées de remplissage pour les trois lois d'ouverture de vanne

On peut aboutir à plusieurs constatations :

- Tandis que la loi d'ouverture de vanne augmente, le débit maximal diminue. Pour un même système de remplissage, un débit qui diminue implique une agitation moindre dans le sas. Cependant, cela implique également une durée de remplissage plus longue, comme l'indique le Tableau 4-5. En passant de la loi d'ouverture en 30s à la loi d'ouverture en 60s, le temps de remplissage est augmenté de 4%. En passant de $T_v = 30s$ à $T_v = 90s$, il est augmenté de 11%. On observe cependant que la durée de sasement n'augmente pas autant que le temps d'ouverture de la vanne (+100% et +200%).
- En observant le temps correspondant au débit maximal, pour chacune des lois d'ouverture, on constate que pour la loi d'ouverture en 30s, ce pic de débit a lieu légèrement après le moment d'ouverture totale de la vanne (voire pile au moment d'ouverture totale de la vanne si l'on ne tient pas compte du bruit) tandis que pour les lois 60s et 90s, ce pic de débit arrive avant l'ouverture totale de la vanne.

Afin d'expliquer ces phénomènes, on rappelle que le moteur de l'écoulement et donc du débit, est la différence de niveaux d'eau entre le bief amont et le sas. À angle d'ouverture de vanne fixé, plus cette différence est élevée, plus le débit est important. A contrario, la perte de charge à la vanne est un frein à l'écoulement. Plus l'angle d'ouverture de la vanne est faible (proche de la position fermée), plus la perte de charge est importante et donc moindre est le débit.

Sur base de cela, on peut expliquer la raison pour laquelle le pic de débit diminue (et a lieu avant l'ouverture totale) lorsque le temps d'ouverture de vanne augmente : pour un temps d'ouverture de vanne rapide (30s), la perte de charge à la vanne diminue rapidement et la différence de niveaux d'eau reste élevée en début de remplissage. Le temps $t = 30s$ est alors le temps optimal pour un débit maximal. Pour un temps d'ouverture de vanne plus grand, le niveau d'eau dans le sas est déjà plus élevé au moment de l'ouverture de vanne totale, ce qui implique une différence de niveaux d'eau plus faible et donc un débit plus faible. Le temps optimal pour un débit maximal se situe donc un peu avant, lorsque le niveau d'eau dans le sas est plus faible. La valeur de ce débit maximal est alors inférieure puisque la vanne n'est pas totalement ouverte.

Influence sur la force transversale

La Figure 4-69 reprend, pour les différentes lois d'ouverture de vanne, la force d'amarrage transversale totale ($F_T = F_{T1} + F_{T2}$) mesurée au laboratoire.

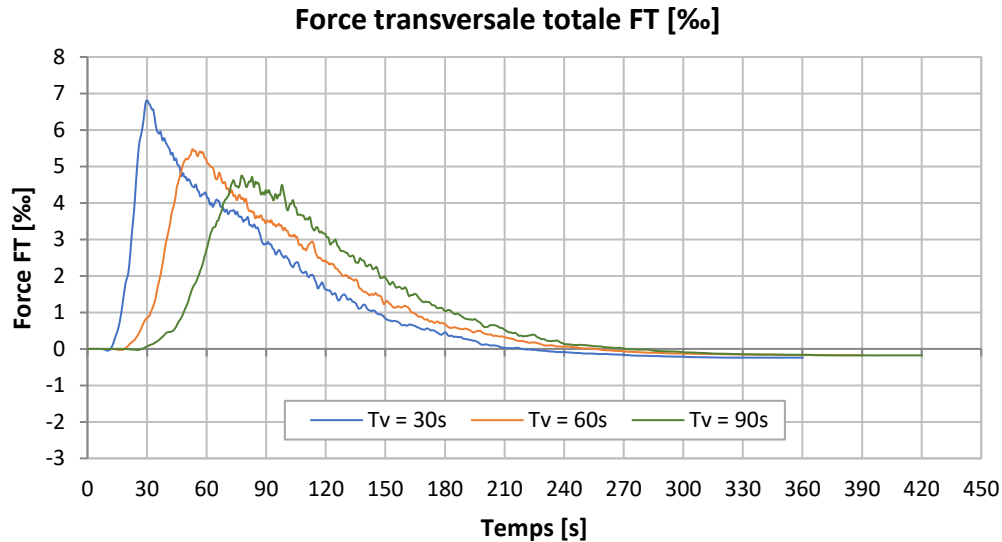


Figure 4-69: Force d'amarrage transversale pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée

Comme établi précédemment, le débit dans le sas, et donc l'agitation, diminue lorsque le temps d'ouverture de la vanne augmente. La force d'amarrage dépendant de cette agitation, l'observation que la force d'amarrage diminue également est donc cohérente. La force maximale a lieu en même temps que le débit maximal.

En passant de la loi d'ouverture en 30s à la loi d'ouverture en 60s, la force d'amarrage a diminué de 20%. En passant de $T_v = 30s$ à $T_v = 90s$, elle a diminué de 30%.

Le Tableau 4-6 résume la diminution favorable de l'effort d'amarrage transversal suite à l'allongement du temps d'ouverture de vanne, en comparaison avec l'augmentation défavorable du temps de remplissage.

	De $T_v = 30s$ à $T_v = 60s$	De $T_v = 30s$ à $T_v = 90s$
Force d'amarrage	-20 %	-30%
Temps de remplissage	+ 4%	+11%

Tableau 4-6: Effet de l'augmentation du temps d'ouverture de la vanne

On remarque qu'il est intéressant de passer à une loi d'ouverture plus lente étant donné que la diminution d'effort d'amarrage est plus importante que l'augmentation de la durée du remplissage.

Influence sur la pente d'eau

Les figures suivantes illustrent l'influence des lois d'ouverture de vanne sur la pente d'eau transversale, pour le cas d'un sas sans barge (Figure 4-70) et pour le cas d'un sas avec barge (Figure 4-71).

Les pentes d'eau figurées sont le résultat de prises de pression positionnées *au droit* des éjecteurs. Les résultats des prises de pression positionnées *entre* éjecteurs pour cette configuration (REF – Barge centrée) et pour d'autres sont disponibles à l'annexe 10.4.

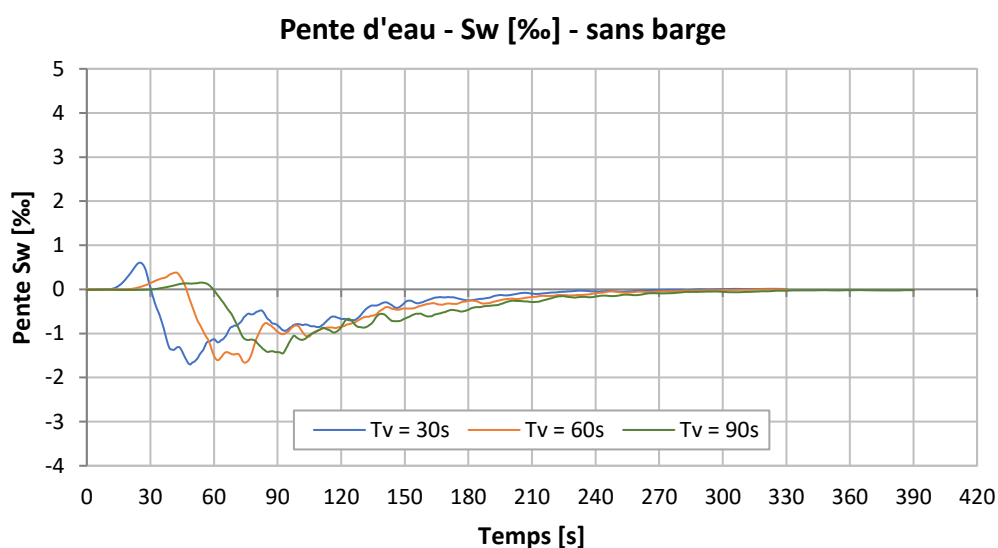


Figure 4-70: Pente d'eau transversale pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-sans barge

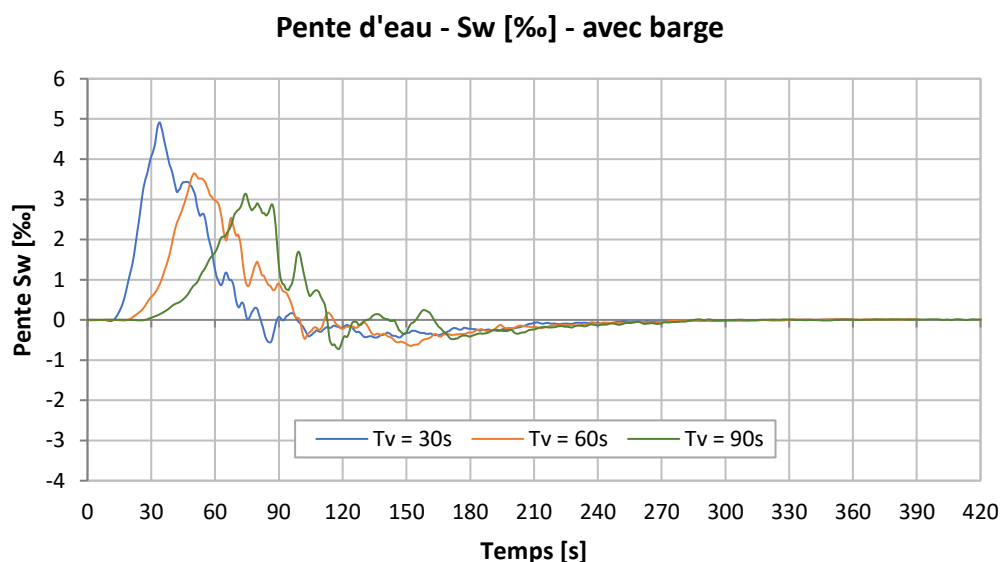


Figure 4-71: Pente d'eau transversale pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Tout d'abord, on observe toujours un comportement du plan d'eau différent, voire inversé, entre les configurations avec barge et sans la barge. Sans présence de la barge, en début de remplissage, la pente d'eau est légèrement positive (le niveau d'eau de la rive gauche est plus élevé que celui de la rive droite) avant de passer majoritairement dans le négatif. En présence de la barge, la pente est majoritairement positive avant de passer légèrement en négatif. Comme constaté en première partie de ce chapitre, les ordres de grandeurs des maxima absolus sont également différents (autour de 1,5 ‰ sans la barge et 3 à 5 ‰ avec la barge). La pente d'eau avec barge semble mieux épouser la tendance de la force d'amarrage.

Ensuite, on constate que l'influence de la loi d'ouverture de vanne sur la pente d'eau coïncide avec ce que l'on a pu observer pour la force transversale : plus la loi d'ouverture augmente, plus la pente d'eau diminue. Pour la configuration avec barge, la diminution de pente est reprise dans le Tableau 4-7 :

	De $T_v = 30s$ à $T_v = 60s$	De $T_v = 30s$ à $T_v = 90s$
Pente d'eau avec barge	-27 %	-37 %

Tableau 4-7: Effet du temps d'ouverture de la vanne sur la pente d'eau transversale

Influence sur le roulis

Les mesures adimensionnalisées du roulis prises à l'aide des capteurs à cordes sont représentées à la Figure 4-72, pour les différents temps d'ouverture de vanne.

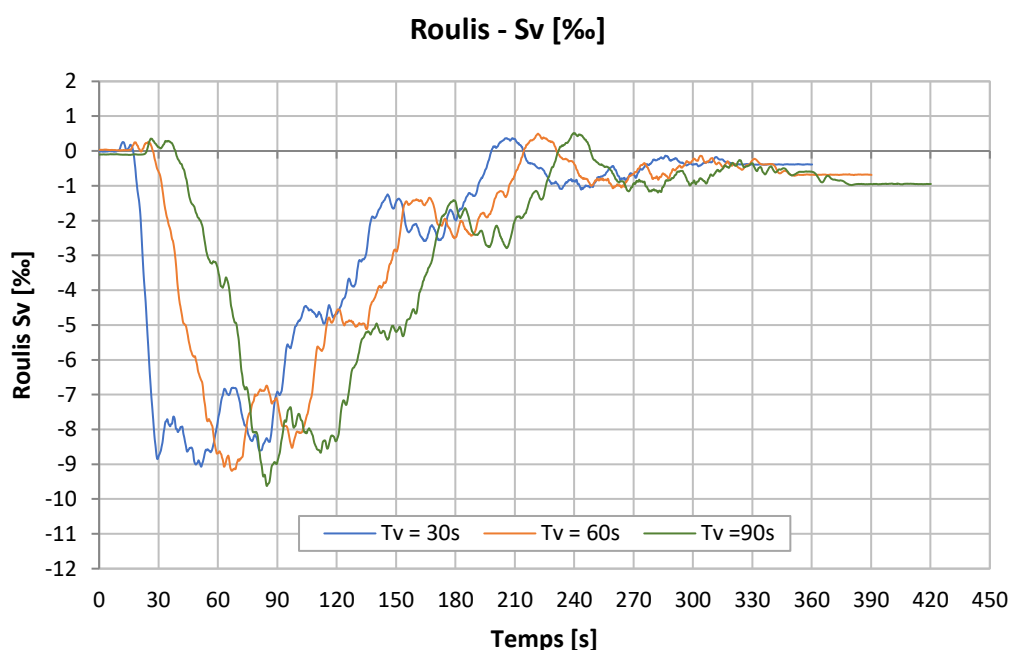


Figure 4-72: Pente de roulis pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée

On note que, selon ces mesures, le roulis ne semble pas être influencé par la loi d'ouverture de la vanne. Cela ne coïncide pas avec les observations précédentes sur la force transversale et sur la pente d'eau. Pour les trois temps d'ouverture de vanne, la valeur maximale du roulis ainsi que sa décroissance restent stables au cours du remplissage. Cela pourrait indiquer un blocage mécanique au niveau des axes de la barge ou un effet parasite auquel il faudra être attentif dans une prochaine étude.

4.7.2 Taille des éjecteurs

On peut à présent étudier l'influence de la taille des éjecteurs sur l'hydrogramme, la force d'amarrage, la pente d'eau et le roulis.

Les deux tailles d'éjecteurs envisagées sont : 8cm x 1cm (éjecteurs de référence) et 4cm x 1cm (éjecteurs réduits).

Les résultats présentés dans cette partie consacrée à l'influence de la taille des éjecteurs sont relatifs à la configuration suivante :

- **30s – Barge centrée**

Les résultats concernant les configurations qui suivent sont disponibles à l'annexe 10.4 :

- 30s – Barge bajoyer éjecteur
- 30s – Barge bajoyer opposé

Influence sur l'hydrogramme

Les limnigrammes et hydrogrammes pour des éjecteurs de tailles différentes sont représentés à la Figure 4-73 et à la Figure 4-74.

De cette représentation graphique, on peut tirer le Tableau 4-8 reprenant les débits maximaux observés ainsi que les temps de remplissage variant en fonction de la taille des éjecteurs :

Type d'éjecteur	Débit maximum [l/s]	Durée de remplissage [s]
Référence	24,6	324
Réduit	16,6	481

Tableau 4-8: Synthèse des débits et durées de remplissage pour les deux tailles d'éjecteurs

Pour une loi d'ouverture de vanne identique (en 30s), on peut noter une forte diminution du débit maximal lorsque le remplissage se fait par des éjecteurs réduits plutôt que par les éjecteurs de référence. Tandis que la taille des éjecteurs est réduite de moitié, le débit maximal est réduit de 33 %. En effet, la perte de charge à l'entrée du sas n'est pas proportionnelle à la diminution de section.

En passant d'une taille d'éjecteurs de référence à une taille d'éjecteurs réduits (tout autre paramètre restant égal), la durée de remplissage augmente de 48% (contre 4 et 11% en jouant sur les lois d'ouverture de vanne). On peut d'ores et déjà affirmer que la configuration avec éjecteurs réduits est très défavorable sur la durée de sassement, si aucun autre changement n'est réalisé. En pratique, la modification de la taille des éjecteurs s'accompagne d'une modification du reste de la géométrie et/ou de la loi d'ouverture afin de garder un temps de sassement similaire.

Limnigrammes

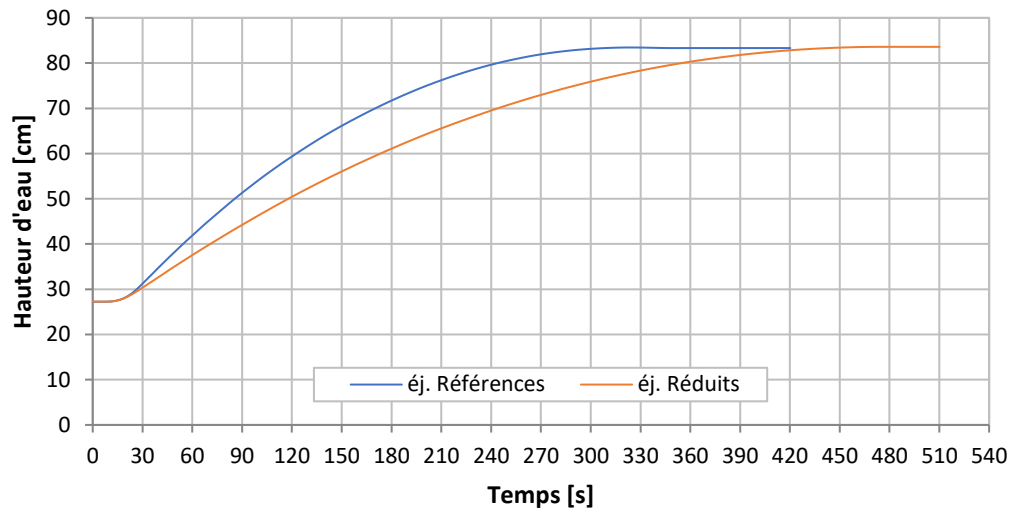


Figure 4-73: Limnigrammes pour les deux tailles d'éjecteurs – 30s-barge centrée

Hydrogrammes

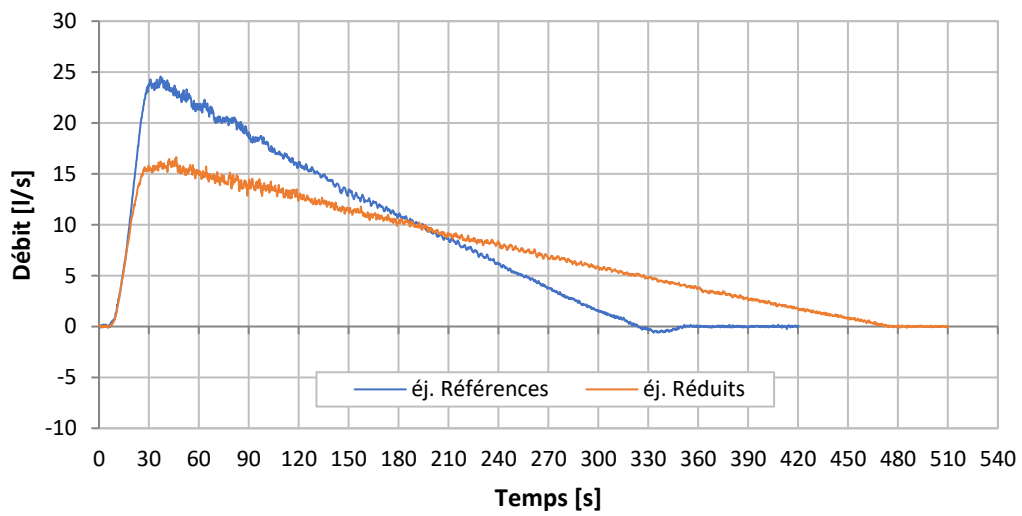


Figure 4-74: Hydrogrammes pour les deux tailles d'éjecteurs – 30s-barge centrée

Influence sur la force transversale

La Figure 4-75 représente, pour les deux tailles d'éjecteurs, la force d'amarrage transversale totale ($F_T = F_{T1} + F_{T2}$).

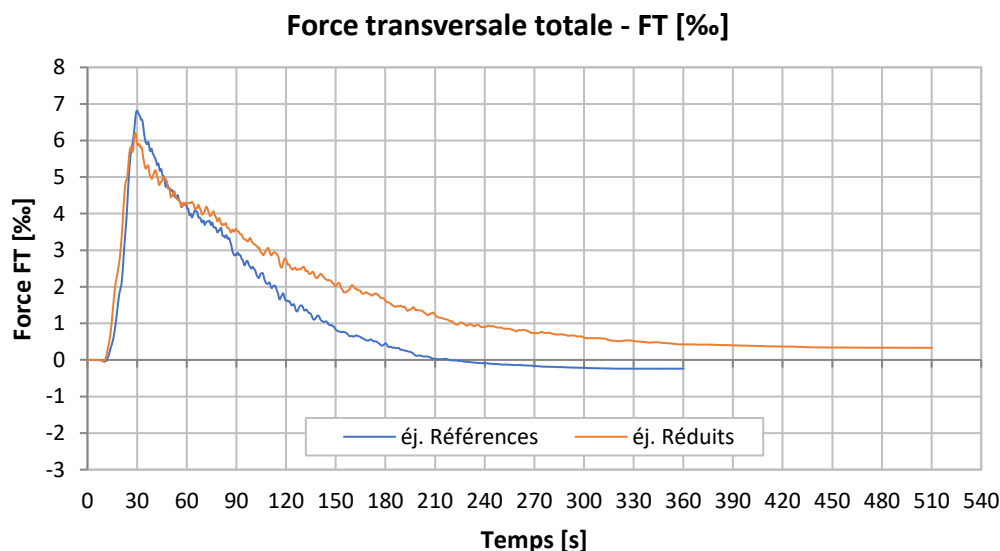


Figure 4-75: Force d'amarrage transversale pour les deux tailles d'éjecteurs - 30s-barge centrée

Il est intéressant de constater que, malgré une réduction significative du débit de 33% avec les éjecteurs réduits (et donc potentiellement une réduction de l'agitation dans le sas), la force d'amarrage transversale maximale observée n'est pas significativement inférieure à celle constatée pour des éjecteurs de référence. Cette observation permet de confirmer les résultats des prises de vitesses, à savoir qu'il y a un effet d'entraînement de l'eau qui est d'autant plus grand que la taille de l'éjecteur est petite. Cet effet d'entraînement influe visiblement sur la force d'amarrage. Il y a donc une composante hydrodynamique non négligeable à prendre en compte dans l'évaluation de la force d'amarrage lors d'un remplissage en mode dégradé.

Le Tableau 4-9 résume la diminution non fortement favorable de l'effort d'amarrage transversal suite au passage à une taille d'éjecteurs réduite, en comparaison avec l'augmentation très défavorable du temps de remplissage.

	De taille Référence à taille Réduite
Force d'amarrage	-9 %
Temps de remplissage	+ 48%

Tableau 4-9: Effet du passage d'éjecteur de référence à éjecteur réduit

Réciproquement, on peut donc affirmer, au vu de ces résultats, qu'un agrandissement de la taille des éjecteurs est favorable pour l'effort d'amarrage transversal.

Influence sur la pente d'eau

Les figures suivantes illustrent l'influence de la taille des éjecteurs sur la pente d'eau transversale, pour le cas d'un sas sans barge (Figure 4-76) et pour le cas d'un sas avec barge (Figure 4-77).

Les résultats des prises de pression positionnées *entre* éjecteurs pour cette configuration (30s – Barge centrée) sont disponibles à l'annexe 10.4.

Sans la présence de la barge, la réduction de la taille des éjecteurs a un effet légèrement défavorable sur la pente d'eau positive et favorable sur la pente d'eau négative.

En présence de la barge, les observations concernant l'influence de la taille des éjecteurs sont similaires à celles faites pour la force transversale, avec une diminution de la pente d'eau maximale de 10%.

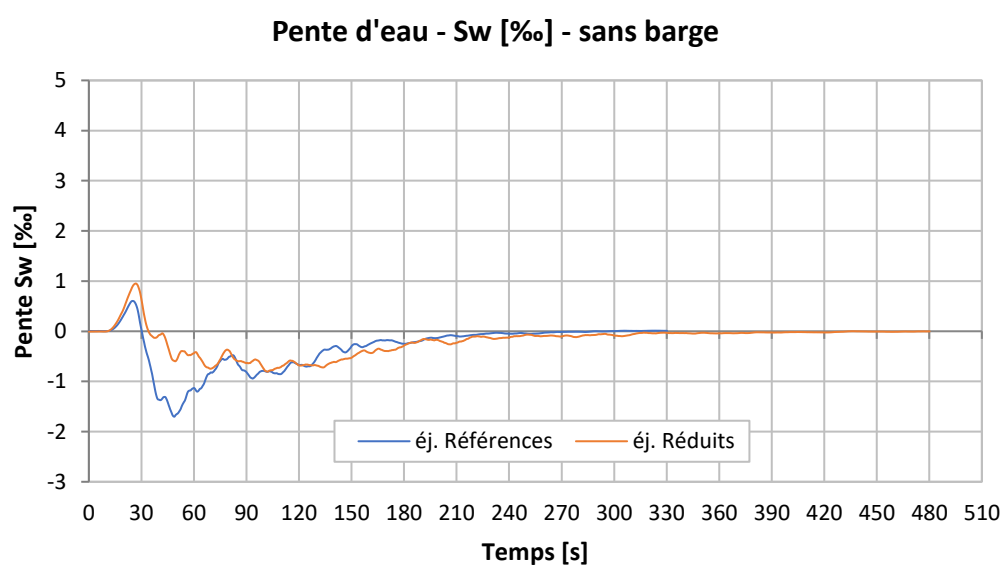


Figure 4-76: Pente d'eau transversale pour les deux tailles d'éjecteurs - 30s-sans barge

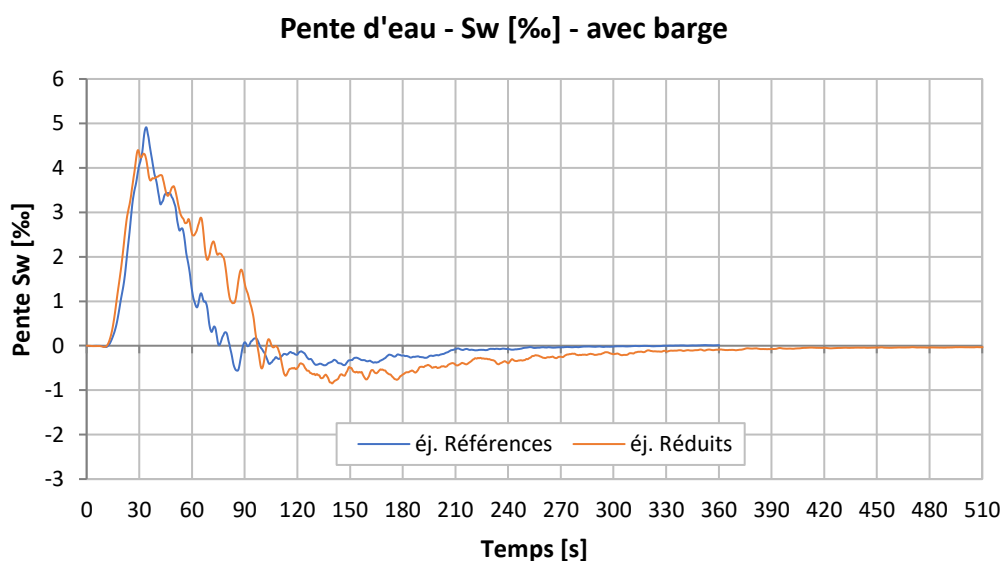


Figure 4-77: Pente d'eau transversale pour les deux tailles d'éjecteurs - 30s-barge centrée

Influence sur le roulis

La Figure 4-78 représente le roulis de la barge, pour les différentes tailles d'éjecteurs. Les résultats sont cohérents avec ce qui a été observé précédemment. La réduction de la section des éjecteurs induit une réduction du roulis de 17%.

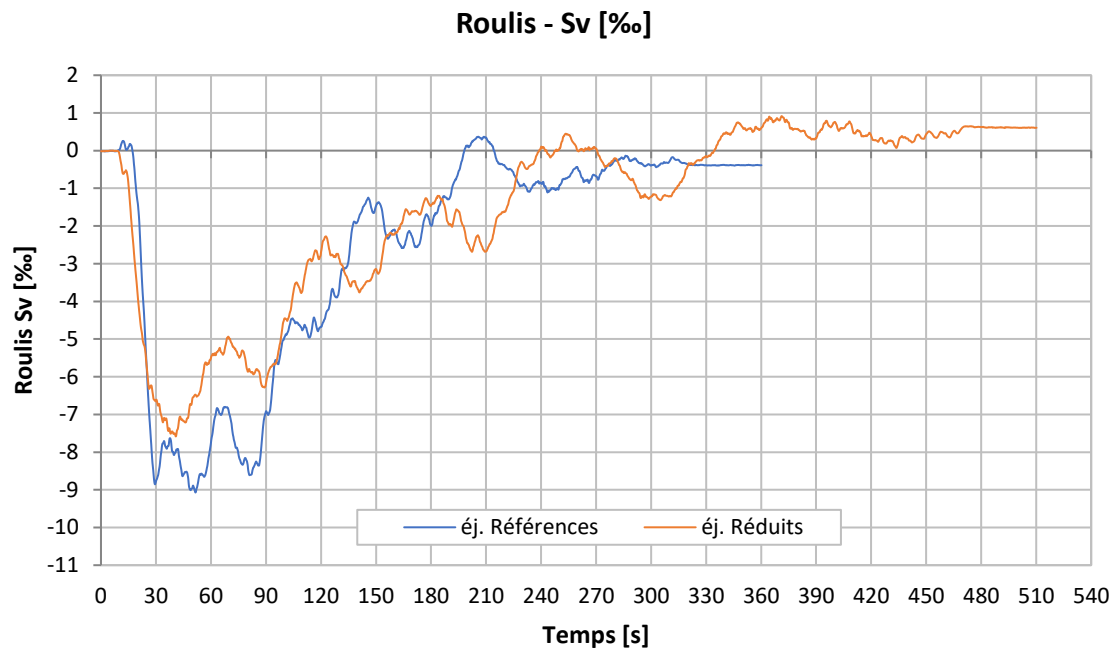


Figure 4-78: Pente de roulis pour les deux tailles d'éjecteurs - 30s-barge centrée

4.7.3 Position transversale de la barge

Le dernier paramètre dont on étudie l'influence dans ce travail est la position transversale de la barge dans le sas.

Les trois positions envisagées sont : la barge centrée, la barge décentrée du côté de l'éjecteur fonctionnel et la barge décentrée du côté de l'éjecteur opposé.

Les résultats présentés dans cette partie consacrée à l'influence de la position de la barge sont relatifs à la configuration suivante :

- **30s – REF**

Les résultats concernant la configuration suivante sont disponibles à l'annexe 10.4 :

- 30s – RED

Influence sur l'hydrogramme

La position de la barge dans le sas n'influençant pas l'hydrogramme de remplissage, le lecteur pourra se référer aux Figure 4-73 et Figure 4-74 pour retrouver les hydrogrammes et limnigrammes relatifs à un remplissage barge centrée et loi d'ouverture de vanne en 30s.

Influence sur la force transversale

La force d'amarrage transversale totale ($F_T = F_{T1} + F_{T2}$) est représentée pour les différentes positions de la barge à la Figure 4-79.

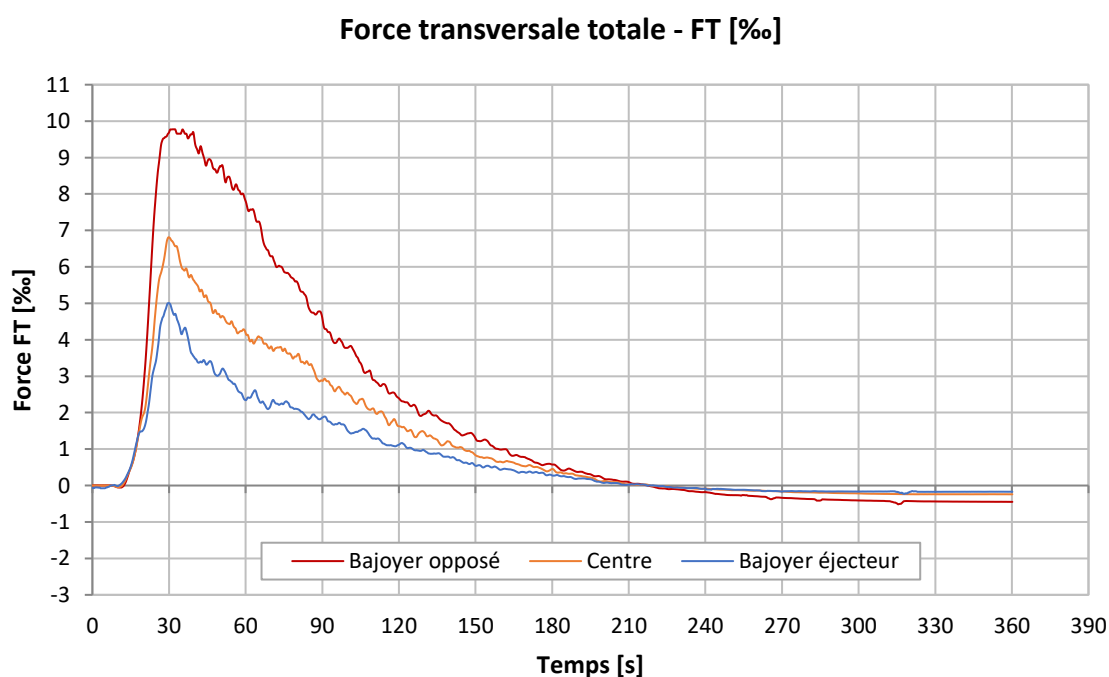


Figure 4-79: Force d'amarrage transversale pour les trois positions de barge - REF-30s

4. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX

Il est intéressant de constater à quel point il est défavorable de placer la barge sur le bajoyer opposé à l'éjection lors d'un remplissage en mode dégradé (courbe rouge). Ces résultats valident les recommandations faites par le SPW à propos du remplissage en mode dégradé, indiquant aux bateliers de s'amarrer du côté du bajoyer fonctionnel (courbe bleue).

Il faut également noter que, dans le cas de la barge placée du côté opposé à l'éjection, le capteur de force amont mesurant F_{T1} était saturé. La valeur maximale de la force totale F_T (courbe rouge) est donc en réalité encore davantage supérieure.

Selon les présents résultats, la force transversale d'amarrage est diminuée de 28% si l'on décentre la barge du côté de l'éjection et augmentée de minimum 42% si l'on décentre la barge du côté opposé.

	De centrée à bajoyer fonctionnel	De centrée à bajoyer opposé	De bajoyer fonctionnel à bajoyer opposé
Force d'amarrage	-28 %	+42% min	+ 96 % min
Temps de remplissage	+ 0 %	+ 0%	+0%

Tableau 4-10: Influence de la position de la barge

Ces résultats sont expliqués par le fait que la barge située sur le bajoyer opposé est beaucoup plus exposée au jet remontant, qui possède encore une énergie cinétique importante (Figure 4-80). Cela se fait ressentir sur la composante hydrodynamique de l'effort d'amarrage. D'autre part, l'eau vient s'accumuler entre le bajoyer opposé et la barge, ce qui a comme conséquence d'augmenter fortement la pente d'eau et donc l'effort d'amarrage.

L'augmentation de pente est d'ailleurs visible plus loin sur la Figure 4-80 où on aperçoit que la pente est 3 fois plus importante lorsque la barge est accostée sur le bajoyer opposé que lorsqu'elle est accostée sur le bajoyer éjecteur.

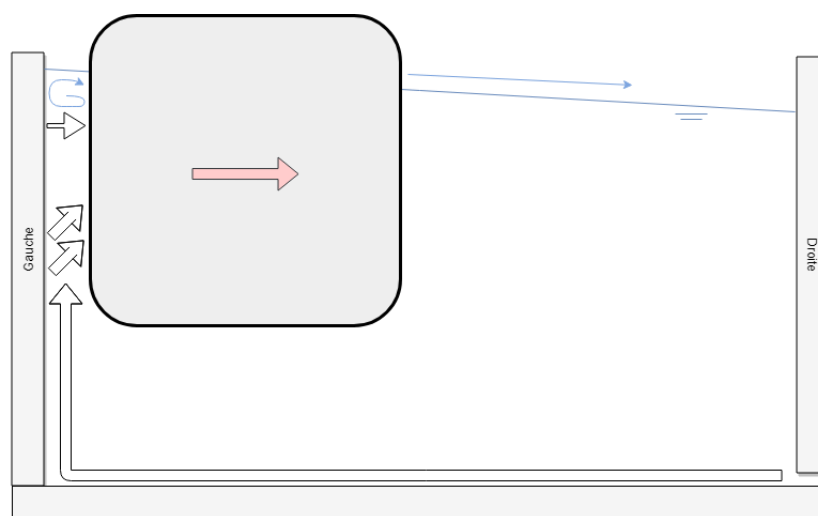


Figure 4-80: Mouvements en place lorsqu'une barge est accostée sur le bajoyer opposé à l'ouverture

Influence sur la pente d'eau

On retrouve, à la Figure 4-81, les pentes d'eau dans le sas en fonction de la position de la barge. En pointillés, on note également l'ordre de grandeur de la pente d'eau sans la barge.

Les résultats indiquent une diminution de la pente d'eau de 36% lorsque la barge est décentrée du côté de l'éjection et une augmentation de 80% lorsque la barge est décentrée du côté opposé.

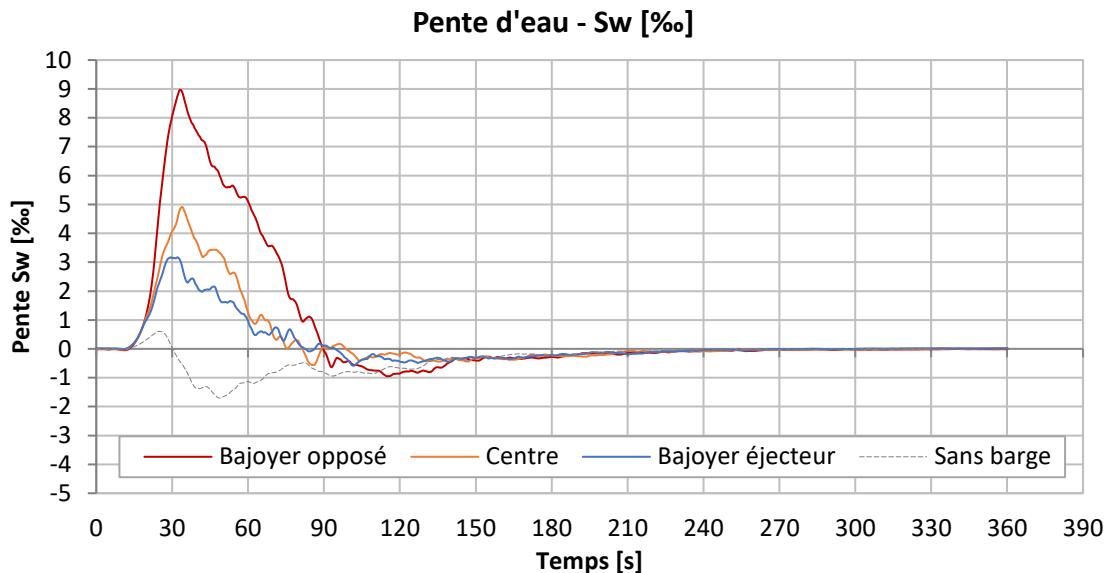


Figure 4-81: Pente d'eau transversale pour les trois positions de barge - REF-30s

Influence sur le roulis

La pente de roulis est illustrée à la Figure 4-82, pour les différentes positions transversales de la barge dans le sas.

On constate que, le fait de positionner la barge sur le bajoyer fonctionnel diminue la pente de roulis. En revanche, on s'attendrait à observer une augmentation plus significative du roulis lorsque la barge est placée du côté opposé (de la même manière que pour la force et la pente). L'hypothèse d'un blocage mécanique à partir d'un certain angle de roulis se confirme au vu de ces résultats.

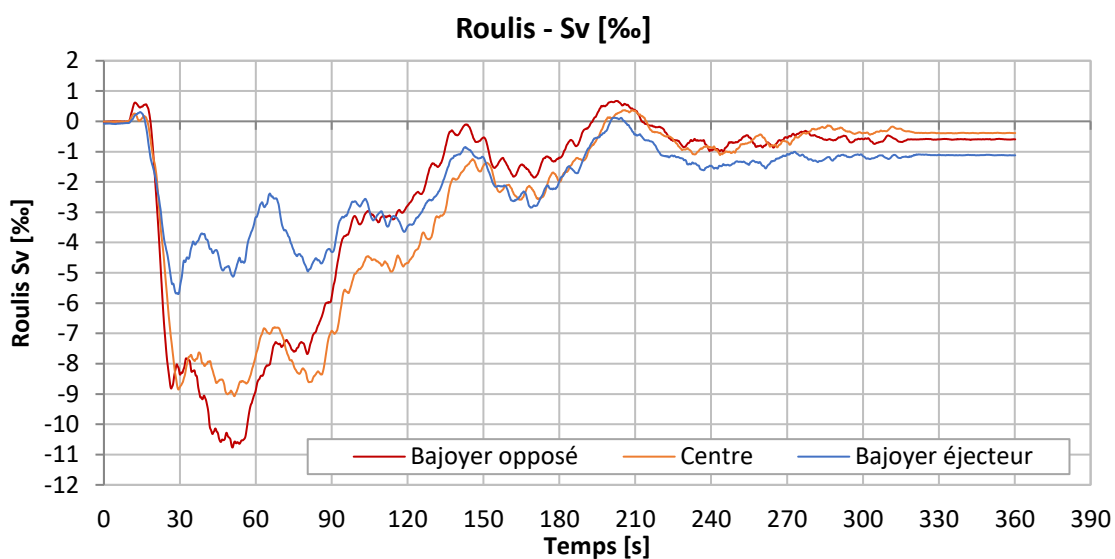


Figure 4-82: Pente de roulis pour les trois positions de barge – REF-30s

4.7.4 Synthèse

L'influence des différents paramètres étudiés sur l'effort d'amarrage et sur le temps de remplissage est reprise dans les tableaux récapitulatifs : Tableau 4-11, Tableau 4-12 et Tableau 4-13.

Loi d'ouverture	De $T_v = 30s$ à $T_v = 60s$	De $T_v = 30s$ à $T_v = 90s$
Force d'amarrage	-20 %	-30%
Temps de remplissage	+ 4%	+11%

Tableau 4-11: Synthèse : Influence de la loi d'ouverture de vanne sur la force d'amarrage et le temps de remplissage

Taille des éjecteurs	De taille Référence à taille Réduite
Force d'amarrage	-9 %
Temps de remplissage	+ 48%

Tableau 4-12: Synthèse : Influence de la taille des éjecteurs sur la force d'amarrage et le temps de remplissage

Position de la barge	De centrée à bajoyer fonctionnel	De centrée à bajoyer opposé	De bajoyer fonctionnel à bajoyer opposé
Force d'amarrage	-28 %	+42% min	+ 96 % min
Temps de remplissage	+ 0 %	+ 0%	+0%

Tableau 4-13: Synthèse : Influence de la position transversale de la barge sur la force d'amarrage et le temps de remplissage

5 PERSPECTIVES

Ce travail a permis d'améliorer la compréhension des phénomènes hydrauliques présents lors du remplissage d'une écluse à aqueducs larrons en mode dégradé. Lors de nos essais, certaines questions supplémentaires se sont posées et des perspectives pour continuer à améliorer cette étude ont été envisagées :

- ❖ Comparer les résultats obtenus en laboratoire avec ceux obtenus sur site. La recherche des lois de similitude des grandeurs mesurées permettra de comparer les données et de vérifier que les phénomènes sont similaires. Cela permettra aussi d'assurer que les solutions trouvées dans le cadre de ce travail sont applicables sur site.
- ❖ Comparer les résultats du modèle réduit avec les résultats d'un éventuel modèle numérique (existant ou à réaliser).
- ❖ 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 vitesses 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 vitesses 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'ouvertures et l'intensité du phénomène giratoire.
- ❖ Améliorer le modèle conceptuel des champs de vitesses 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.

6 CONCLUSION

La réalisation de ce travail a permis de mieux comprendre les phénomènes observés sur le site de la quatrième écluse de Lanaye, lors d'un remplissage en mode dégradé par aqueducs-larrons.

Des pentes d'eau transversales de l'ordre 6‰ avaient été observées sur site, engendrant le déplacement de bateaux en direction du bajoyer fonctionnel et menaçant dangereusement la sécurité de ceux-ci et de l'ouvrage.

Afin d'éviter ces déplacements transversaux, les bateaux doivent être correctement amarrés aux bajoyers. Cependant, les efforts dans les amarres ne peuvent pas dépasser un certain seuil de sécurité, établi à 0,5‰ en Belgique, pour tout type de bateaux.

Ce travail visait plusieurs objectifs :

- **Valider expérimentalement l'importance des efforts d'amarrage transversaux en mode dégradé par rapport aux efforts longitudinaux de manière générale.**

Des mesures de forces d'amarrage bidirectionnelles ont été réalisées en mode dégradé et ont montré que la force d'amarrage transversale totale, de 7‰, était 23 fois plus élevée que la force d'amarrage longitudinale, pour une configuration de référence : loi d'ouverture de vanne linéaire en 30s, taille d'éjecteurs de référence et barge centrée transversalement. Elle est également 14 fois plus élevée que le seuil de sécurité établi en Belgique.

Une comparaison avec les travaux de fin d'étude de T. Heinz [12], de P.A. Reding [19] et de R. Magotteaux [15] a montré que la force d'amarrage transversale totale en mode dégradé par aqueducs-larrons est 4,5 fois plus élevée que la force d'amarrage longitudinale en remplissage symétrique par contournement des têtes, pour une configuration de référence.

Il s'agit donc bien d'un phénomène particulièrement important, mettant en danger la sécurité et cela corrobore les observations faites sur le site de Lanaye.

- **Établir le lien entre pentes d'eau et efforts d'amarrage transversaux.**

Tout d'abord, une nouvelle méthode de prises de pression différentielle a été introduite dans le cadre de ce travail afin d'obtenir la mesure de la pente d'eau transversale dans le sas et de pouvoir la comparer à l'effort d'amarrage transversal mesuré.

Dans le cadre des travaux de fin d'étude précédents, s'intéressant principalement aux efforts d'amarrage en remplissage par contournement des têtes, une correspondance quasi parfaite avait été observée entre la pente d'eau et l'effort longitudinal, tous deux adimensionnalisés et exprimés en ‰. Cette observation mettait en évidence le caractère quasi purement hydrostatique de la force d'amarrage.

En remplissage dégradé par aqueducs-larrons, cette correspondance n'a pas pu être observée. La force d'amarrage mesurée est supérieure aux pentes d'eau (avec et sans barge), mettant

en évidence une composante hydrodynamique non négligeable de la force d'amarrage, en plus de la composante hydrostatique.

La force d'amarrage mesurée est 1,4 fois plus élevée que la pente d'eau mesurée en présence de la barge et 14 fois plus élevée que la pente d'eau mesurée sans la barge. Ces valeurs sont valables, en moyenne, pour toutes les configurations.

Sur terrain, il n'est donc pas suffisant de mesurer la pente d'eau pour évaluer l'effort d'amarrage transversal en mode dégradé. La pente d'eau mesurée sans la barge sous-estime fortement l'effort d'amarrage tandis que la pente d'eau mesurée en présence de la barge la sous-estime légèrement.

La pente de roulis a également été étudiée et comparée à l'effort d'amarrage. Celle-ci surestime l'effort d'amarrage d'un facteur qu'il est difficile de déterminer étant donné le constat d'un blocage mécanique à partir d'une certaine pente de roulis.

- **Décrire l'écoulement en travers du sas lors d'un remplissage en mode dégradé.**

L'analyse des champs de vitesses mesurés au laboratoire a permis de schématiser le comportement de l'eau lors d'un remplissage en mode dégradé. Ces mesures ont été réalisées sans la présence de la barge. Un effet giratoire a clairement pu être démontré. Le jet d'eau, sortant de l'éjecteur fonctionnel se dirige en direction du bajoyer opposé, remonte le long de celui-ci avant de revenir vers le bajoyer éjecteur dans la partie supérieure du matelas d'eau et de redescendre enfin le long de ce dernier.

Un effet de diffusion latérale du jet a également pu être mis en évidence grâce à des mesures au droit et entre éjecteurs. L'effet giratoire a également été observé, avec un certain décalage temporel, sur une section située entre éjecteurs.

L'intégration des champs de vitesses a permis de mettre en évidence un effet d'entraînement prolongeant la rotation de la masse d'eau. Le débit sortant de l'éjecteur augmente au fur et à mesure de la rotation. En fin de cycle, lors de la descente le long du bajoyer fonctionnel, le débit diminue étant donné qu'une partie du débit a servi à faire monter le niveau de l'eau au sein du sas.

La présence d'une barge au sein du sas impacte ces recirculations. Il en résulte des effets hydrodynamiques non négligeables qui se répercutent sur l'effort d'amarrage. Suivant le gabarit de la barge et suivant sa position transversale dans le sas, les efforts transversaux sont plus ou moins importants. Il est important de retenir que les résultats de ce travail s'appliquent à une barge de gabarit Vb et que la largeur du modèle de l'écluse de Lanaye correspond à une largeur de 18m contre 25m sur l'écluse réelle.

- **Étudier l'influence de la loi d'ouverture de vanne sur les efforts d'amarrage.**

Trois lois d'ouverture ont été étudiées : linéaires en 30s, 60s et 90s. Les résultats ont démontré qu'un temps d'ouverture plus long permettait de diminuer les efforts d'amarrage. Le passage d'une ouverture de 30s à 90s permet de diminuer les efforts d'amarrage transversaux de 30% tandis que la durée de remplissage n'est augmentée que de 10%.

- **Étudier l'influence de la position de la barge sur les efforts d'amarrage.**

Trois positions de barge ont été testées : la position centrée, la position amarrée sur le bajoyer fonctionnel et la position amarrée au bajoyer opposé. La position amarrée sur le bajoyer fonctionnel est la plus sécuritaire concernant l'effort d'amarrage transversal. La position amarrée au bajoyer opposé est la plus critique. Entre les deux, l'effort d'amarrage est multiplié par deux.

- **Étudier l'influence de la taille des éjecteurs sur le comportement de l'écoulement.**

Deux tailles d'éjecteurs ont été testées : une taille de référence, étant à l'échelle de l'écluse de Lanaye et une taille réduite de moitié.

Des mesures de champs de vitesses ont d'abord été réalisées afin d'observer l'influence de la taille des éjecteurs sur le comportement de l'eau. L'effet giratoire ainsi que l'effet d'entraînement de la masse d'eau ont été observés dans les deux cas mais l'intensité de ces phénomènes est plus importante avec les éjecteurs réduits qu'avec les éjecteurs de référence. Cela signifie qu'il est défavorable pour l'effort d'amarrage de réduire la section des éjecteurs et réciproquement, qu'il est favorable de l'augmenter.

Cette observation permet d'expliquer l'une des raisons pour lesquelles les pentes d'eau observées sur le site de Lanaye sont plus importantes que celles sur le site d'Ivoz-Ramet. En effet, la taille des éjecteurs à Lanaye est deux fois plus petite qu'à Ivoz-Ramet, impliquant des recirculations et donc des pentes d'eau plus importantes.

Ces résultats ont été confirmés par l'analyse des mesures de force d'amarrage pour les deux tailles d'éjecteurs, avec une même loi d'ouverture. Alors que la réduction de moitié de la taille des éjecteurs fait diminuer le débit de 30%, et donc potentiellement l'agitation du sas, l'effort d'amarrage observé ne diminue que de 10%. Si le dimensionnement de l'écluse reste inchangé, le temps de sassement est quant à lui rallongé de 50%. Il est donc globalement défavorable de réduire la taille des éjecteurs.

Nous pouvons conclure que la configuration la plus sécuritaire lors d'un remplissage en mode dégradé est d'utiliser une loi d'ouverture de vanne la plus lente possible qui permettent également de respecter le critère sur le temps de remplissage maximum. La barge doit également impérativement s'amarrer au bajoyer fonctionnel.

Lors de la conception d'une nouvelle écluse, une solution pour diminuer les efforts d'amarrage transversaux serait de concevoir des éjecteurs de taille plus importante.

7 BIBLIOGRAPHIE

- [1] **Bousmar, D.** *Hydrocap 3 : Automatisation des mesures sur modèle hydraulique*. Rapport de stage, MET : Direction des Recherches Hydrauliques, 2008.
- [2] **Bousmar, D.** *Cours LGCIV 2013: Hydraulic structures, bridges and roads*. École polytechnique de Louvain, 2018.
- [3] **Christiaens, D.** *Evaluation of the mooring forces on a vessel in a navigation lock. Draft version*. École Polytechnique de Louvain, 2015.
- [4] **Deltares.** *Instrument, Programmable electromagnetic liquid velocity meter*. <https://www.deltares.nl/app/uploads/2016/04/Programmable-electromagnetic-liquid-velocity-meter.pdf> , 4 juin 2019.
- [5] **Deluzarche, C.** *Futura-Sciences, Transport et CO₂ : quelle part des émissions*. <https://www.futura-sciences.com/planete/questions-reponses/pollution-transport-co2-part-emissions-1017/>, 9 juin 2019.
- [6] **Direction des Recherches hydrauliques.** *Quatrième écluse de Lanaye, Mesures hydrauliques in situ*. Rapport final. MOD.019/ 6. Mars 2016.
- [7] **Direction des Recherches hydrauliques.** *Nouvelle écluse d'Ivoz-Ramet, Mesures hydrauliques in situ préalables à la mise en service*. Rapport final. MOD.045. Juin 2016.
- [8] **Direction des Recherches hydrauliques.** *Vidéo surveillance de la quatrième écluse de Lanaye*. 13 Juin 2016.
- [9] **Directorate Genaral of Public Works, Civil Engineering Division.** *Design of Locks*. Utrecht , 2000.
- [10] **ECOCONSO.** *Le transport aérien*. 2007, http://www.ecoconso.be/IMG/pdf/fc102_transport_aerien.pdf, 08 juin 2019.
- [11] **FORUM INTERNATIONAL DES TRANSPORTS,** *Key Transport Statistics 2017* .2018, <https://www.itf-oecd.org/sites/default/files/docs/key-transport-statistics-2018.pdf>, 02 juin 2019.
- [12] **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 aqueduc larron*. École Polytechnique de Louvain, 2013.
- [13] **Les carnets d'ICI.** *Généralités sur les barrages*. 11 septembre 2017. http://carnetsdici.com/thema/B/barrages/_generalites.html, 16 août 2019.
- [14] **Loncle, F.** *Rapport sur le projet de loi autorisant la ratification de la convention de Budapest relative au contrat de transport de marchandises en navigation intérieure (CMNI)*, 2007. <http://www.assemblee-nationale.fr/12/rapports/r3668.asp>, 08 juin 2019.

- [15] **Magotteaux, R.** *Travail de fin d'étude : Efforts d'amarrage dans un sas d'écluse: évaluation expérimentale.* École Polytechnique de Louvain, 2014.
- [16] **PIANC.** *Innovation in lock design.* Report 106, 2009.
- [17] **PIANC.** *Ship behavior in locks and lock approaches.* Report 155, 2015.
- [18] **PIANC.** *Rapport final de la commission internationale pour l'étude des écluses.* PIANC, Bruxelles, Belgique, 1986.
- [19] **Reding, P.-A.** *Travail de fin d'étude : Efforts d'amarrage dans un sas d'écluse: évaluation expérimentale.* École Polytechnique de Louvain, 2013.
- [20] **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 vois hydrauliques. Mai 2018.
- [21] **UCL Pôle Genie civil et Environnement.** *Ecluse 225m x 25m d'Ampsin-Neuville, Assistance à l'étude par modélisation physique et numérique du système d'alimentation en eau du sas.* Rapport final MS 222/11/01. Septembre 2013.
- [22] **Voies hydrauliques,** Direction générale opérationnelle de la Mobilité et des Voies hydrauliques. <http://voies-hydrauliques.wallonie.be/opencms/opencms/fr>, 02 juin 2019.
- [23] **Von W. H.Hager.** *Flow Conditions in Pipe and Channel Enlargements.* 1990.
- [24] **Waroux, V.** *Le canal seine-Escaut,* 2017. <http://www.veroniquewaroux.info/canal-seine-escaut/>, 09 juin 2019.
- [25] **Wu, P.** *Mooring forces and vessel behaviour in locks - experience in China.* PIANC Workshop, 2015.
- [26] **YOKOGAWA.** *Instrument, EJA110E Differential Pressure Transmitter.* https://www.yokogawa.com/solutions/products-platforms/field-instruments/level-meters/level-transmitters/eja110e/#Downloads_downloads_743, 4 juin 2019.

8 TABLE DES FIGURES

Figure 1-1: Coûts du transport [14].....	1
Figure 1-2: Emissions de CO2 [5].....	1
Figure 1-3: Liaison Seine-Nord Europe [24].....	2
Figure 1-4: Barrage et écluse construite en parallèle [13]	3
Figure 1-5: Coupe longitudinale d'une écluse.....	3
Figure 1-6: Remplissage par les portes [3]	4
Figure 1-7: Exemple de remplissage par les portes [12].....	4
Figure 1-8: Contournement des têtes [3]	4
Figure 1-9: Remplissage par aqueducs et larrons [3]	5
Figure 1-10: Larrons sur l'écluse d'Ivoz-Ramet [22]	5
Figure 1-11: Remplissage par le radier [3]	5
Figure 1-12: Amarrage d'un bateau dans un sas d'écluse [3]	6
Figure 1-13: Bollard de surface [18]	6
Figure 1-14: Organeaux [18]	6
Figure 1-15: Remplissage dégradé [20].....	7
Figure 1-16: Remplissage normal [20]	7
Figure 1-17: Quatrième écluse de Lanaye [20].....	8
Figure 1-18: Remplissage par aqueducs et larrons [3]	8
Figure 1-19: Pente d'eau en mode dégradé à Lanaye [20].....	9
Figure 1-20: Loi d'ouverture A sur l'écluse de Lanaye [20]	9
Figure 1-21: Mode dégradé [20]	10
Figure 1-22: Photo du positionnement des bateaux à Lanaye [8].....	10
Figure 1-23: Photo de la situation après ouverture de la vanne [8]	11
Figure 1-24: Photo de la situation critique [8].....	11
Figure 1-25: Loi d'ouverture A et C à Lanaye [20]	12
Figure 1-26: Pente d'eau en mode dégradé à Lanaye [20].....	12
Figure 2-1: Les différentes composantes de l'effort d'amarrage [9]	16
Figure 2-2: Les différentes composantes de l'effort d'amarrage [9].....	16
Figure 2-3: Inclinaison du plan d'eau [15]	17
Figure 2-4: (a) Bateau de navigation intérieure (b) Bateau maritime (c) Bateau de plaisance [3]	18
Figure 2-5: Critère de sécurité : efforts d'amarrage longitudinaux aux Pays-Bas [9].....	18
Figure 2-6: Critère de sécurité : efforts d'amarrage latéraux et longitudinaux en Allemagne [17]	19
Figure 2-7: Critère de sécurité : efforts d'amarrage latéraux et longitudinaux en Chine [25]	19
Figure 3-1: Hall du laboratoire de la Direction des Recherches hydrauliques	20
Figure 3-2: Disposition type d'une écluse à aqueducs-larrons [15]	20
Figure 3-4: Photo du sas en présence de la barge.....	21
Figure 3-3: Photo du sas sans la présence de la barge.....	21
Figure 3-5: Dimensions principales du modèle réduit	22
Figure 3-6: Photo : éjecteur de référence	23
Figure 3-7: Photo : éjecteur réduit	23
Figure 3-8: Axes verticaux du système d'amarrage	24
Figure 3-9: Axe vertical traversant la barge	24
Figure 3-10: Système de fixation de l'axe vertical	24
Figure 3-11: Plateau muni des capteurs reliant la barge à l'axe vertical [15].....	25
Figure 3-12: Amarre élastique et avec jeu.....	25
Figure 3-13: Amarre rigide et sans jeu	25
Figure 3-14: Dispositifs de mesures.....	26
Figure 3-15: Capteur de niveau à ultrasons BAUMER	26
Figure 3-17: Principe de fonctionnement du capteur de pression différentielle [12]	27

Figure 3-16: Capteur de pression différentielle YOGOGAWA[26]	27
Figure 3-18: Tube à ouverture sur les côtés	27
Figure 3-19: Position des tubes sur une coupe longitudinale du sas	27
Figure 3-20: Capteur de position à corde ASM.....	28
Figure 3-21: Jauge de déformation TEDEA-HUNTLEIGH	28
Figure 3-22: Tête de sonde de vitesse PEMS	29
Figure 3-23: Sonde de vitesse PEMS.....	29
Figure 3-24: Lois d'ouverture linéaires en 30s,60s et 90s.....	30
Figure 3-25: Différentes lois d'ouverture de vannes [2]	30
Figure 3-26: Mesures de pentes d'eau entre éjecteurs	31
Figure 3-27: Mesures de pentes d'eau au droit des éjecteurs	31
Figure 3-28: Emplacements de prises de vitesses.....	31
Figure 3-29: Mesures de pentes d'eau, forces d'amarrage et roulis pour la barge amarrée au bajoyer gauche	32
Figure 3-30: Mesures de pentes d'eau, forces d'amarrage et roulis pour la barge centrée	32
Figure 3-31: Mesures de pentes d'eau, forces d'amarrage et roulis pour la barge amarrée au bajoyer droit	32
Figure 4-1: Remplissage dégradé	34
Figure 4-2: Convention de signes	34
Figure 4-3: Convention de signes	35
Figure 4-4: Remplissage - Hydrogramme et limnigramme - Mode dégradé - REF-30s-sans barge	37
Figure 4-5: Remplissage - Hydrogramme et limnigramme - Mode normal - REF-30s-sans barge	37
Figure 4-6: Coefficients de perte de charge de la combinaison vanne-coude sur le modèle de l'écluse d'Ampsin-Neuville [21]	38
Figure 4-7: Vidange - Hydrogramme et limnigramme - Mode dégradé - REF-30s-sans barge	39
Figure 4-8: Vidange - Hydrogramme et limnigramme - Mode normal - REF-30s-sans barge	39
Figure 4-9: Mode normal	41
Figure 4-10: Mode dégradé.....	41
Figure 4-11: Configuration des prises de mesure des pentes d'eau transversales	41
Figure 4-12: Pentes d'eau transversales - REF-30s-sans barge	42
Figure 4-13: Pente d'eau transversale moyenne - REF-30s-sans barge.....	42
Figure 4-14: Pentes d'eau transversales - REF-30s-barge centrée	43
Figure 4-15: Pente d'eau transversale moyenne - REF-30s-barge centrée.....	43
Figure 4-16: Pente d'eau transversale moyenne - Comparatif avec/sans barge – REF-30s	44
Figure 4-17: Prises de pression différentielle entre éjecteurs.....	44
Figure 4-18: Prises de pression différentielle au droit des éjecteurs	44
Figure 4-19 : Pente d'eau transversale moyenne – Comparatif au droit/entre éjecteurs – sans barge.....	45
Figure 4-20 : Pente d'eau transversale moyenne – Comparatif au droit/entre éjecteurs – avec barge	45
Figure 4-21: Pentes de roulis (amont et aval) - REF-30s-barge centrée	46
Figure 4-22: Pente de roulis aval.....	46
Figure 4-23: Configuration pour la mesure des efforts d'amarrage transversaux	47
Figure 4-24: Forces d'amarrage longitudinales et transversales - REF-30s-barge centrée	48
Figure 4-25: Force d'amarrage transversale totale - REF-30s-barge centrée	48
Figure 4-26: P.-A. Reding : Force longitudinale FL pour un remplissage par contournement des têtes - Tv=30s [19].....	49
Figure 4-27: R. Magotteaux : Force longitudinale FL pour un remplissage par contournement des têtes - Tv=30s [15].....	49
Figure 4-28: T.Heinz : Force longitudinale FL pour un remplissage par contournement des têtes -Tv=30s - Barge centrée [12]	49
Figure 4-29: Comparaison entre force d'amarrage et différentes pentes mesurées	50
Figure 4-30: Configuration des prises de vitesses dans un plan transversal du sas	52
Figure 4-31: Configuration des mesures de vitesses à 2cm du fond du sas	53
Figure 4-32: Composante transversale de la vitesse à 2cm du fond du sas – Éjecteur réduit.....	53
Figure 4-33: Composante transversale de la vitesse à 2cm du fond du sas – Éjecteur de référence	53
Figure 4-34: Vue en plan des prises de vitesses pour un éjecteur réduit.....	54

Figure 4-35: Vue en plan des prises de vitesses pour un éjecteur de référence	54
Figure 4-36: Limnigrammes - Éjecteurs de référence/réduits - Ouverture de vanne en 30s	54
Figure 4-37: Hydrogrammes - Éjecteurs de référence/réduits - Ouverture de vanne en 30s	55
Figure 4-38: Hydrogrammes (original et adapté) relatifs aux éjecteurs réduits	55
Figure 4-39: Facteur de l'homothétie des champs de vitesses	55
Figure 4-40: Champ de vitesses au droit de l'éjecteur de référence – 60s après ouverture	57
Figure 4-41: Champ de vitesses au droit de l'éjecteur de référence – 30s après ouverture	57
Figure 4-42: Champs de vitesses : éjecteur de référence/réduit - Au droit de l'éjecteur - 30s après ouverture	59
Figure 4-43: Champs de vitesses : éjecteur de référence/réduit - Au droit de l'éjecteur - 90s après ouverture	59
Figure 4-44: Champs de vitesses : éjecteur de référence/réduit - Entre éjecteurs - 20s après ouverture	61
Figure 4-45: Champs de vitesses : éjecteur de référence/réduit - Entre éjecteurs - 60s après ouverture	61
Figure 4-46: Champs de vitesses : éjecteur de référence – Au droit/Entre éjecteurs - 20s après ouverture	63
Figure 4-47: Champs de vitesses : éjecteur de référence – Au droit/Entre éjecteurs - 60s après ouverture	63
Figure 4-48: Champs de vitesses : éjecteur réduit – Au droit/Entre éjecteurs - 20s après ouverture.....	64
Figure 4-49: Champs de vitesses : éjecteur réduit – Au droit/Entre éjecteurs - 60s après ouverture.....	64
Figure 4-50: Débits Q1 à Q4 calculés au travers des sections correspondantes	65
Figure 4-51: Section d'intégration relative au débit Q1	66
Figure 4-52: Champs de vitesses au droit des éjecteurs pour les deux types de sortie	67
Figure 4-53: Champs de vitesses entre éjecteurs pour les deux types de sortie	67
Figure 4-54: Profil de vitesses transversales - Au droit des éjecteurs de référence.....	68
Figure 4-55: Profil de vitesses transversales - Au droit des éjecteurs réduits.....	68
Figure 4-56: Profil de vitesses transversales - Entre éjecteurs de référence	69
Figure 4-57: Profil de vitesses transversales - Entre éjecteurs réduits	69
Figure 4-58: Débits calculés - Éjecteurs de référence	70
Figure 4-59: Débits calculés - Éjecteurs réduits.....	70
Figure 4-60: Débits Q1, Q2 et Q4 calculés par intégration des vitesses - Au droit et entre éjecteurs - Éjecteurs de référence et réduits	71
Figure 4-61: Modèle conceptuel.....	72
Figure 4-62 : Modèle conceptuel : inclinaison puis rotation du plan d'eau.....	73
Figure 4-63: Débit théorique comparé aux débits calculés par intégration des vitesses - Débits totaux.....	74
Figure 4-64: Débit théorique comparé aux débits calculés par intégration des vitesses - Débits entre éjecteurs	74
Figure 4-65: Débit théorique comparé aux débits calculés par intégration des vitesses – Débits totaux	75
Figure 4-66: Débit théorique comparé aux débits calculés par intégration des vitesses - Débits entre éjecteurs	75
Figure 4-67: Limnigrammes pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée.....	77
Figure 4-68: Hydrogrammes pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée.....	77
Figure 4-69: Force d'amarrage transversale pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée.....	79
Figure 4-70: Pente d'eau transversale pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-sans barge.....	80
Figure 4-71: Pente d'eau transversale pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée	80
Figure 4-72: Pente de roulis pour les trois lois d'ouverture de vanne - REF-barge centrée	81
Figure 4-73: Limnigrammes pour les deux tailles d'éjecteurs – 30s-barge centrée	83
Figure 4-74: Hydrogrammes pour les deux tailles d'éjecteurs – 30s-barge centrée	83
Figure 4-75: Force d'amarrage transversale pour les deux tailles d'éjecteurs - 30s-barge centrée.....	84
Figure 4-76: Pente d'eau transversale pour les deux tailles d'éjecteurs - 30s-sans barge	85
Figure 4-77: Pente d'eau transversale pour les deux tailles d'éjecteurs - 30s-barge centrée	85
Figure 4-78: Pente de roulis pour les deux tailles d'éjecteurs - 30s-barge centrée	86
Figure 4-79: Force d'amarrage transversale pour les trois positions de barge - REF-30s	87
Figure 4-80: Mouvements en place lorsqu'une barge est accostée sur le bajoyer opposé à l'ouverture	88
Figure 4-81: Pente d'eau transversale pour les trois positions de barge - REF-30s.....	89
Figure 4-82: Pente de roulis pour les trois positions de barge – REF-30s.....	89
Figure 10-1: Répétabilité de la pente d'eau - au droit de l'éjecteur - sans barge.....	105
Figure 10-2: Répétabilité de la pente d'eau - au droit de l'éjecteur - sans barge.....	105
Figure 10-3: Répétabilité de la pente d'eau - entre éjecteurs - sans barge	106
Figure 10-4: Répétabilité de la pente d'eau - entre éjecteurs - sans barge	106

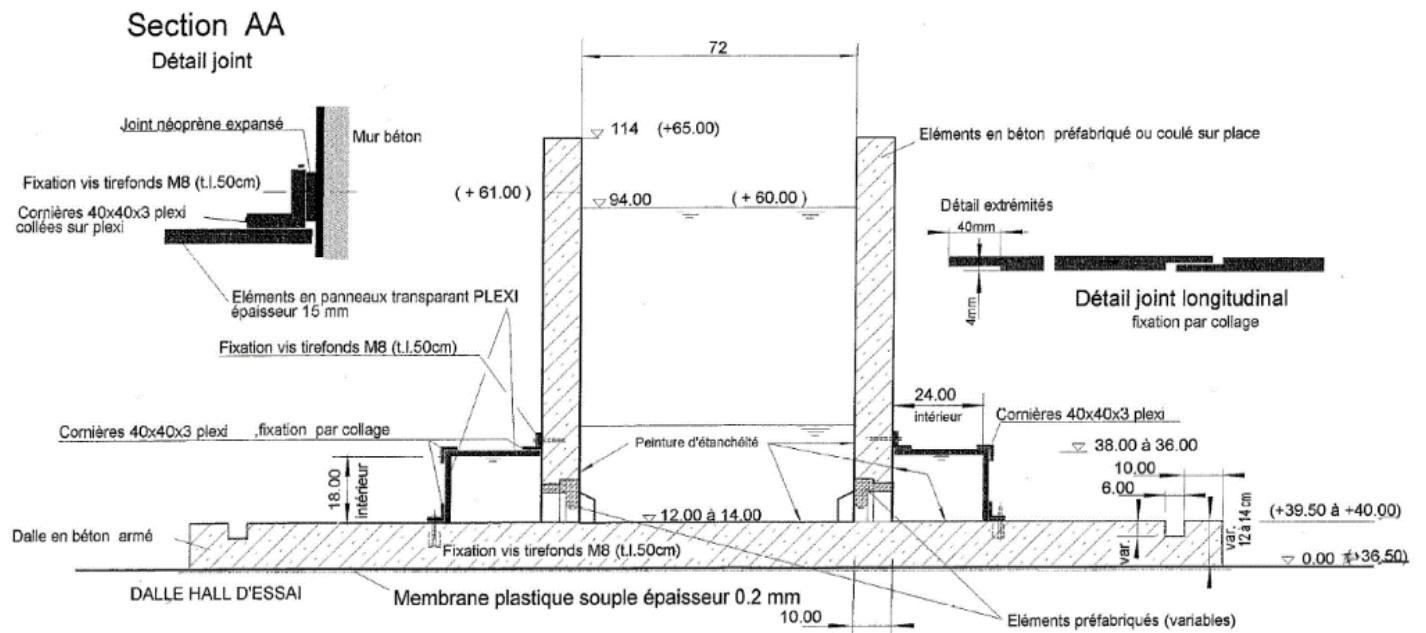
<i>Figure 10-5: Répétabilité de la pente d'eau - au droit de l'éjecteur - avec barge.....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 10-6: Répétabilité de la pente d'eau - au droit de l'éjecteur - avec barge.....</i>	<i>107</i>
<i>Figure 10-7: Répétabilité des forces d'amarrage transversales.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 10-8: Répétabilité de la pente de roulis.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 10-9: Répétabilité des mesures de niveau d'eau par capteurs ultrasons</i>	<i>109</i>
<i>Figure 10-10 Tube ouverture bas</i>	<i>110</i>
<i>Figure 10-11 Tube à ouvertures côtés.....</i>	<i>111</i>
<i>Figure 10-12 Configuration des tubes au droit (Test hydrostatique)</i>	<i>111</i>
<i>Figure 10-13 Résultats tubes à ouverture bas.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 10-14 Résultats tubes à ouvertures côtés</i>	<i>112</i>
<i>Figure 10-15: Configuration des tubes entre éjecteurs (Test hydrostatique).....</i>	<i>113</i>
<i>Figure 10-16 Au droit</i>	<i>113</i>
<i>Figure 10-17 Entre.....</i>	<i>114</i>

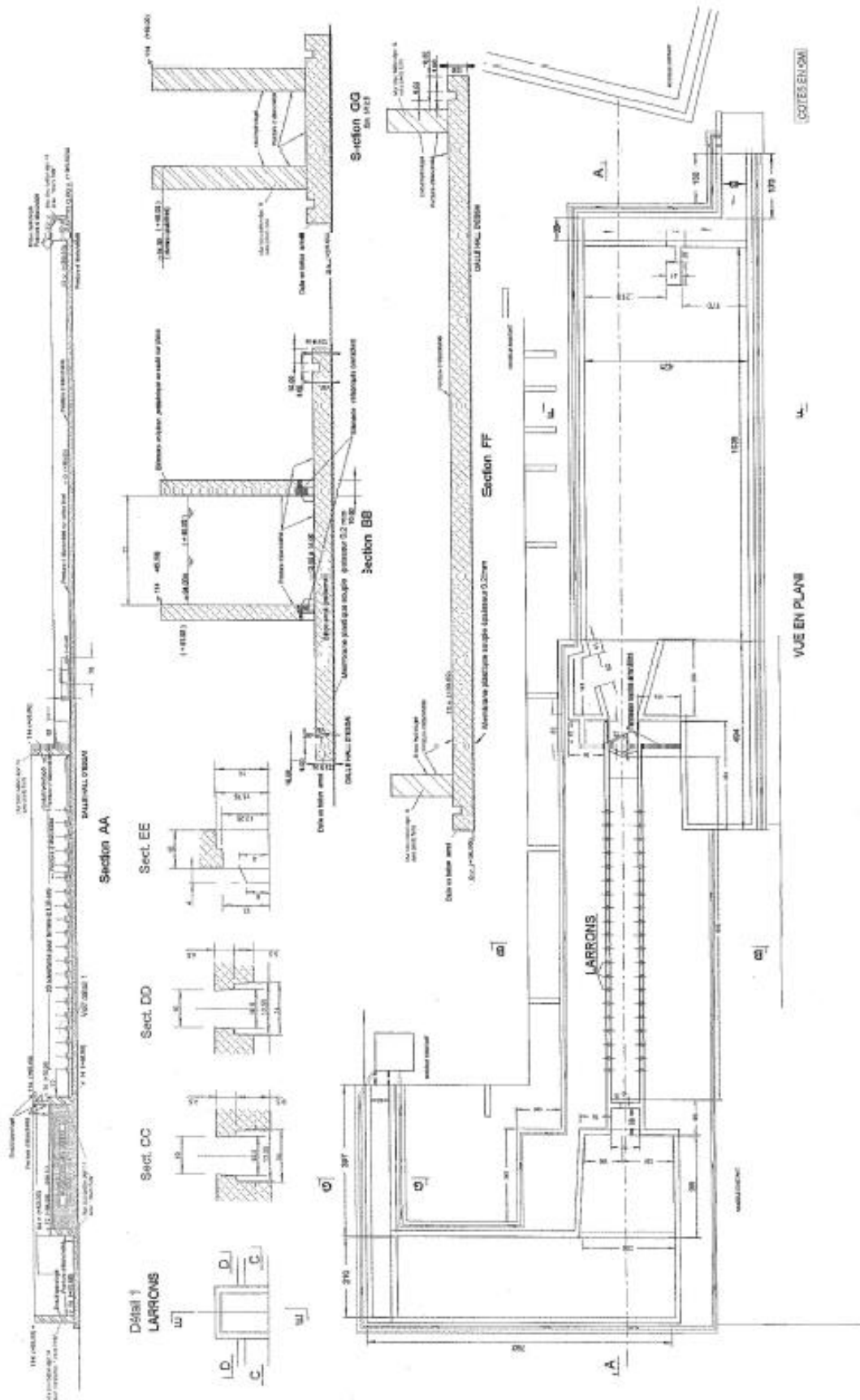
9 TABLE DES TABLEAUX

<i>Tableau 2-1: Critère de sécurité : efforts d'amarrage transversaux et longitudinaux en Allemagne</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 2-2: Critère de sécurité : efforts d'amarrage transversaux et longitudinaux en Chine.....</i>	<i>19</i>
<i>Tableau 3-1: Dimensions principales du modèle réduit</i>	<i>22</i>
<i>Tableau 3-2: Dimensions des éjecteurs</i>	<i>23</i>
<i>Tableau 4-1: Remplissage - Comparaison entre le mode dégradé et le mode normal</i>	<i>38</i>
<i>Tableau 4-2: Vidange - Comparaison entre le mode dégradé et le mode normal</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 4-3: Synthèse – Comparaison entre le mode dégradé et le mode normal</i>	<i>40</i>
<i>Tableau 4-4: Synthèse des valeurs maximales des débits</i>	<i>70</i>
<i>Tableau 4-5: Synthèse des débits et durées de remplissage pour les trois lois d'ouverture de vanne</i>	<i>77</i>
<i>Tableau 4-6: Effet de l'augmentation du temps d'ouverture de la vanne.....</i>	<i>79</i>
<i>Tableau 4-7: Effet du temps d'ouverture de la vanne sur la pente d'eau transversale.....</i>	<i>81</i>
<i>Tableau 4-8: Synthèse des débits et durées de remplissage pour les deux tailles d'éjecteurs</i>	<i>82</i>
<i>Tableau 4-9: Effet du passage d'éjecteur de référence à éjecteur réduit.....</i>	<i>84</i>
<i>Tableau 4-10: Influence de la position de la barge</i>	<i>88</i>
<i>Tableau 4-11: Synthèse : Influence de la loi d'ouverture de vanne sur la force d'amarrage et le temps de remplissage</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 4-12: Synthèse : Influence de la taille des éjecteurs sur la force d'amarrage et le temps de remplissage</i>	<i>90</i>
<i>Tableau 4-13: Synthèse : Influence de la position transversale de la barge sur la force d'amarrage et le temps de remplissage</i>	<i>90</i>

10 ANNEXES

10.1 Plans du modèle réduit





10.2 Répétabilité des mesures

Certains des essais réalisés ont été répétés plusieurs fois pour vérifier la répétabilité des différents dispositifs de mesure.

Ci-dessous, plusieurs exemples sont étudiés. La plupart des essais ont été répétés deux ou trois fois pour avoir une précision des résultats obtenus.

La vérification de la répétabilité est démontrée graphiquement. Sur les graphiques, deux résultats sont superposés. L'essai 1 est en trait plein et l'essai 2 en pointillés.

Capteurs de pression différentielle

La répétabilité des résultats obtenus via les capteurs de pression différentielle a été vérifiée sur plusieurs cas de figures différents.

Le 1^{er} cas de figure est le cas au droit de l'éjecteur et sans la présence de barge. Les résultats sont visibles aux Figure 10-1 et Figure 10-2.

Nous pouvons voir que la tendance est la même, un petit décalage a parfois lieu mais les valeurs limites sont très proches.

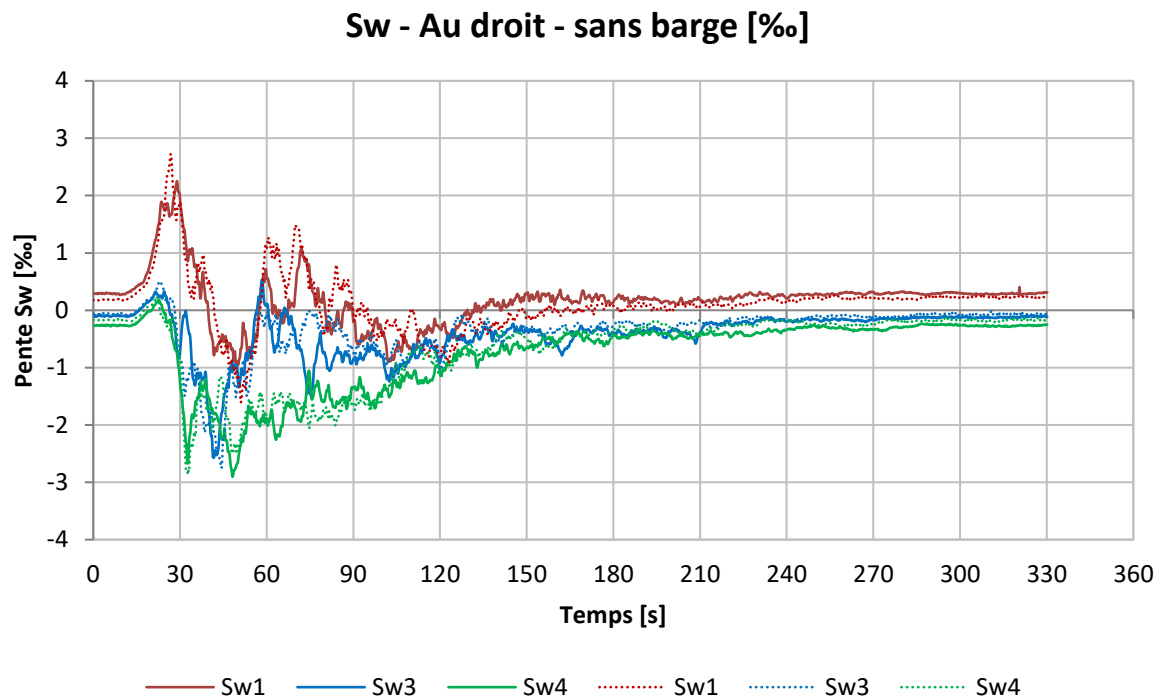


Figure 10-1: Répétabilité de la pente d'eau - au droit de l'éjecteur - sans barge

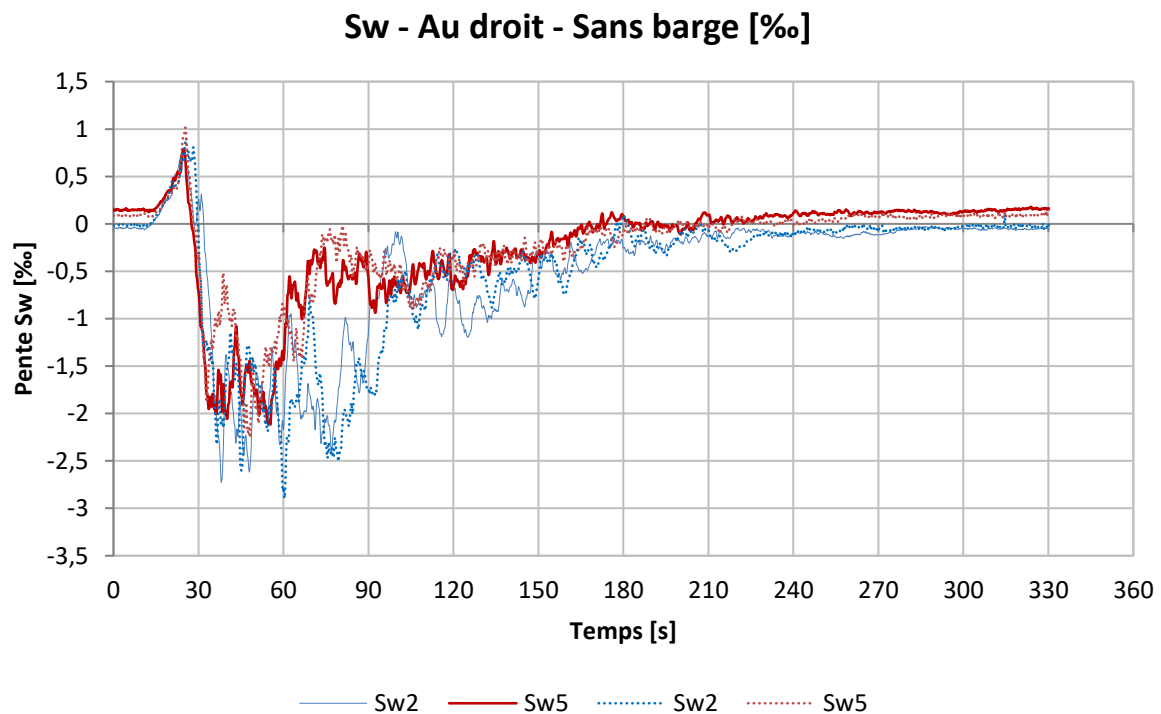


Figure 10-2: Répétabilité de la pente d'eau - au droit de l'éjecteur - sans barge

Le 2^{ème} cas de figure est la cas entre deux éjecteurs et sans la présence de barge. Les graphes sont visibles aux Figure 10-3 et Figure 10-4.

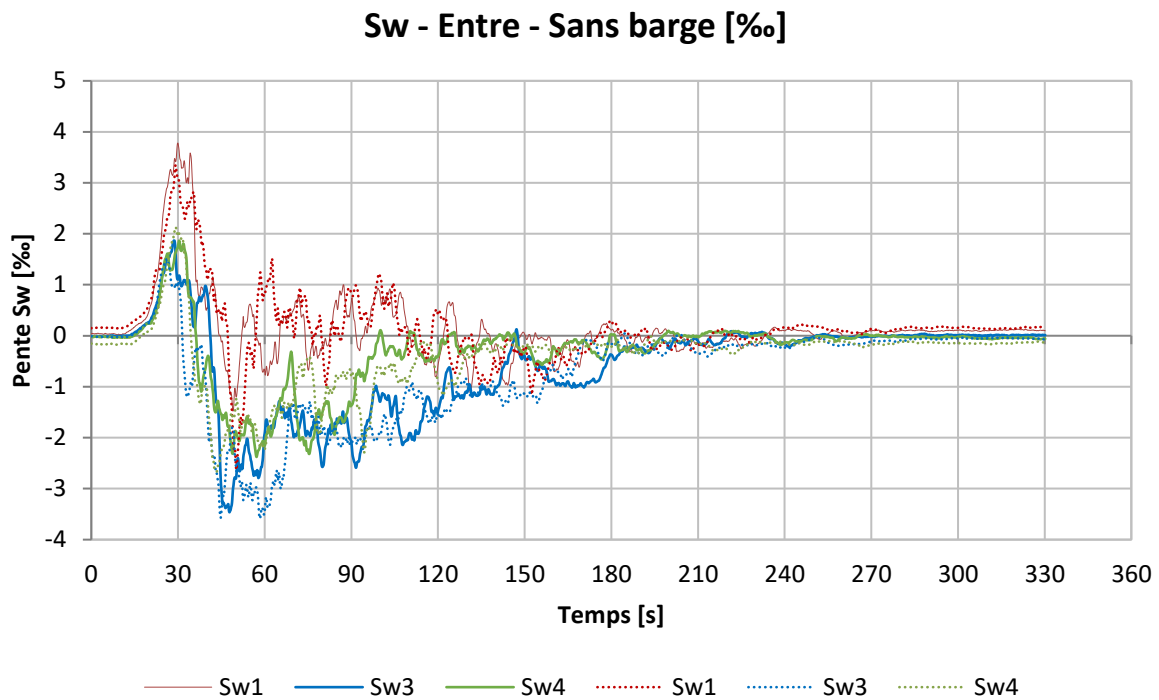


Figure 10-3: Répétabilité de la pente d'eau - entre éjecteurs - sans barge

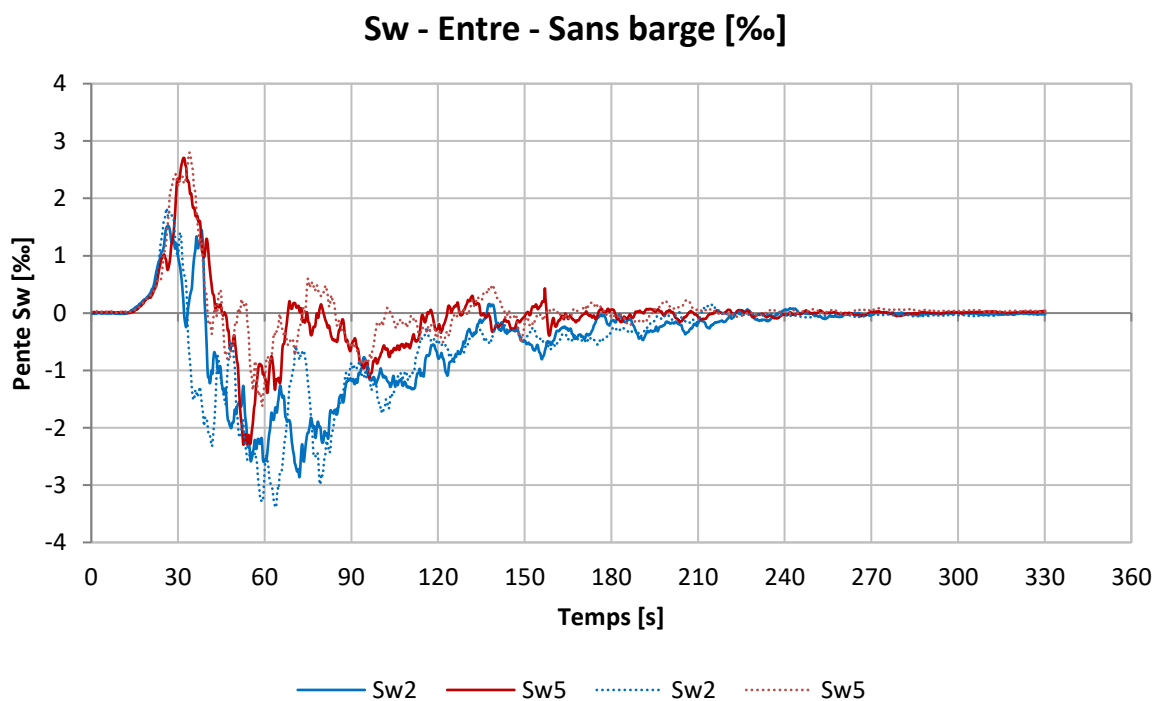


Figure 10-4: Répétabilité de la pente d'eau - entre éjecteurs - sans barge

Le 3^{ème} cas de figure est le cas au droit de l'éjecteur et avec la présence de barge. Les graphes sont visibles aux Figure 10-5 et Figure 10-6.

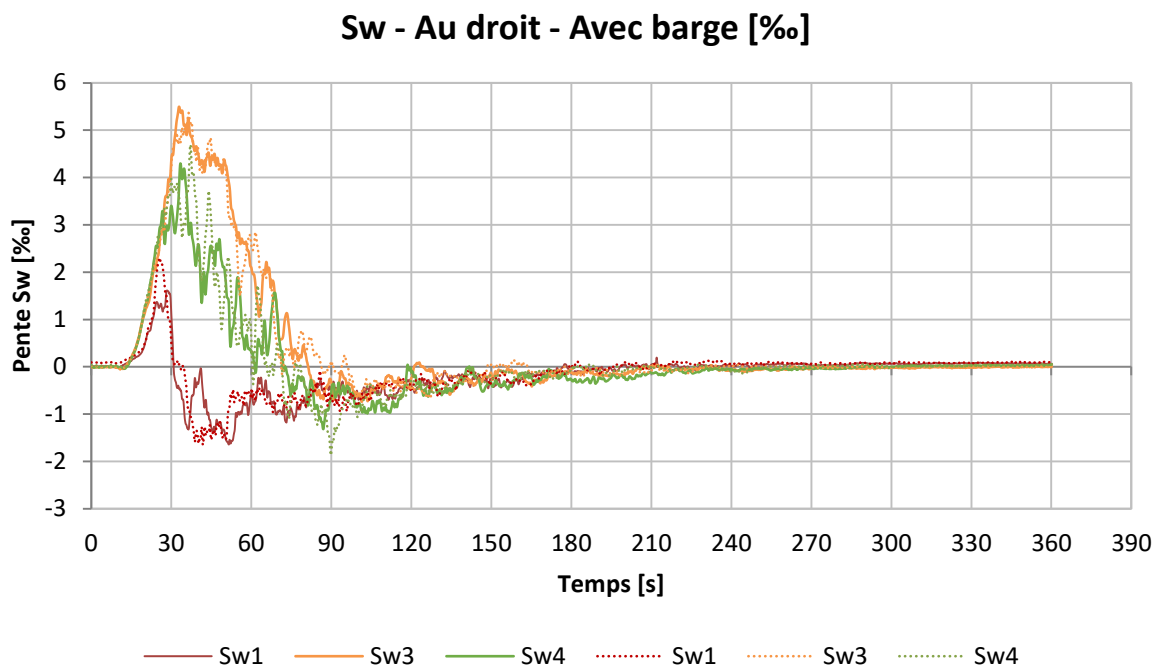


Figure 10-5: Répétabilité de la pente d'eau - au droit de l'éjecteur - avec barge

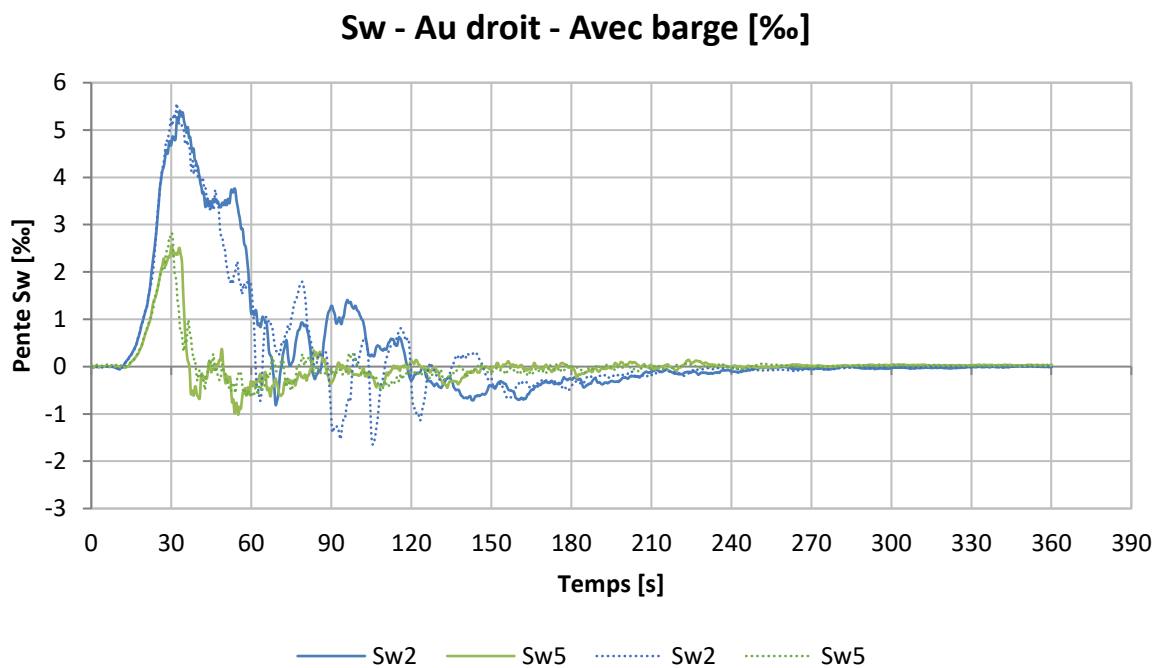


Figure 10-6: Répétabilité de la pente d'eau - au droit de l'éjecteur - avec barge

Jauge de déformation

La répétabilité des résultats obtenus via les jauges de déformation est visible à la Figure 10-7. Le résultat est que la répétabilité est quasi parfaite. Les deux courbes se chevauchent quasi sur toute la prise de mesures.

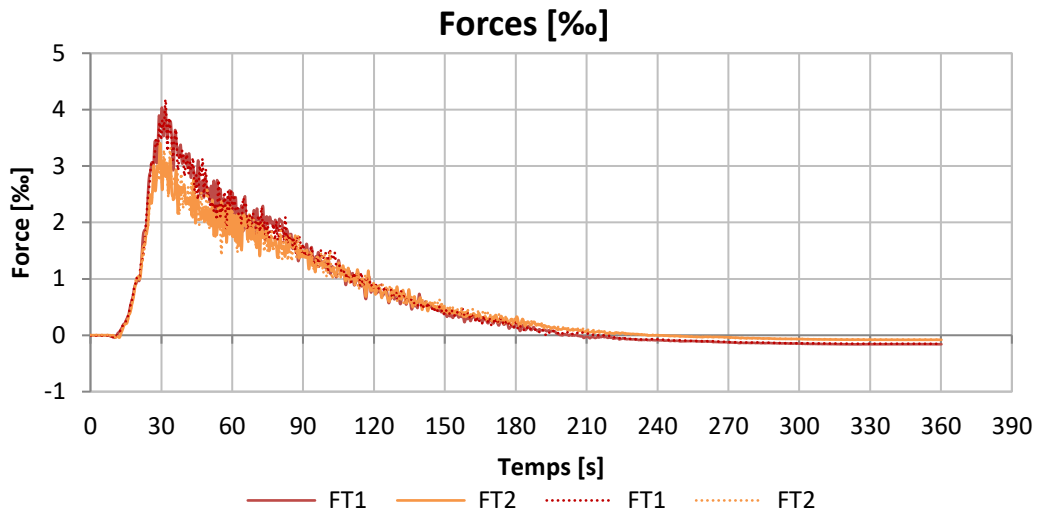


Figure 10-7: Répétabilité des forces d'amarrage transversales

Capteurs de position à cordes

La répétabilité des résultats obtenus via les capteurs de position à cordes est visible à la Figure 10-8. Le résultat est que la répétabilité est également quasi parfaite. Les deux courbes se chevauchent quasi sur toute la prise de mesures.

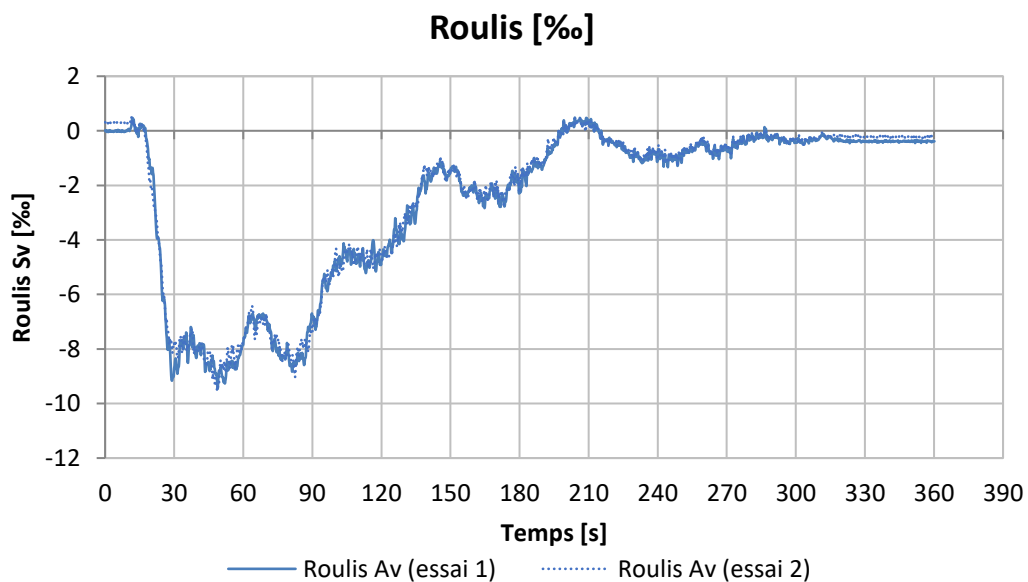


Figure 10-8: Répétabilité de la pente de roulis

Capteurs de niveau à ultrasons

La répétabilité des résultats obtenus via les capteurs de niveau à ultrasons sont repris dans un hydrogramme. Le graphe est visible à la Figure 10-9.

Le résultat est que la tendance est la même. Les courbes sont quasi les mêmes avec parfois certaines valeurs faussées.

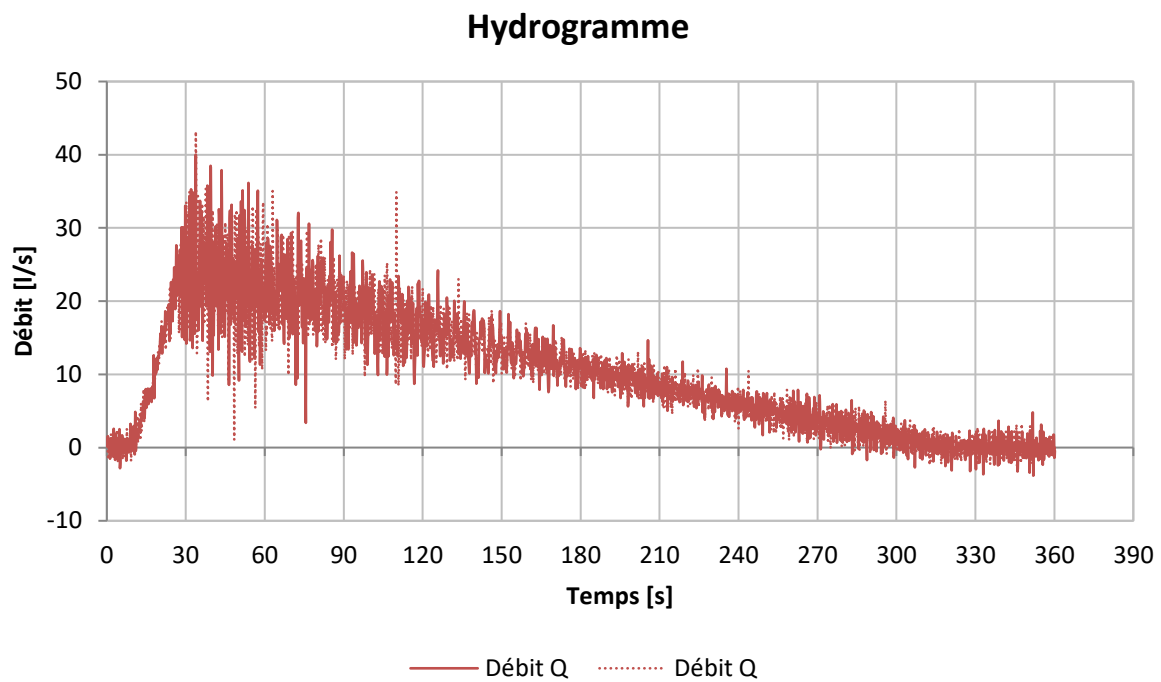


Figure 10-9: Répétabilité des mesures de niveau d'eau par capteurs ultrasons

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.

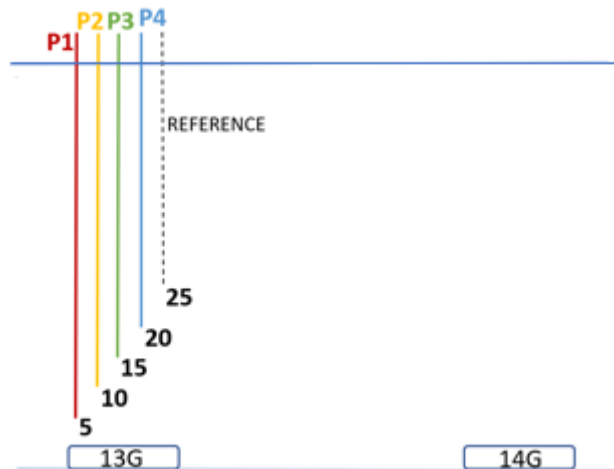


Figure 10-12 Configuration des tubes au droit (Test hydrostatique)

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.

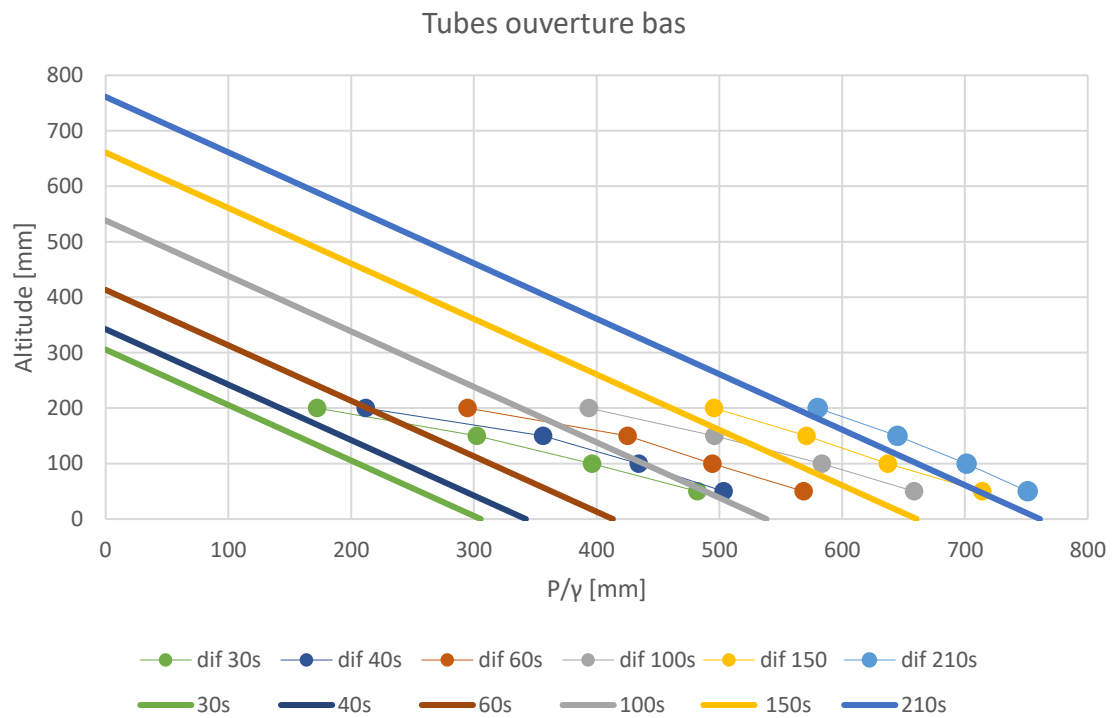


Figure 10-13 Résultats tubes à ouverture bas

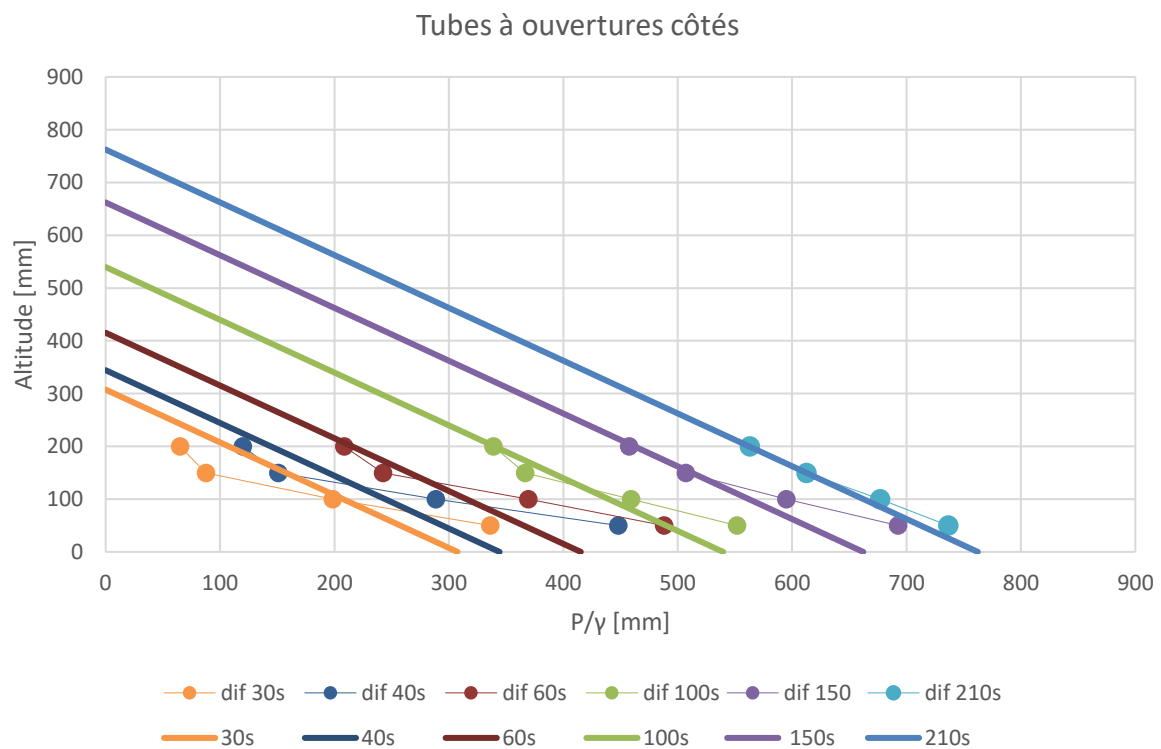


Figure 10-14 Résultats tubes à ouvertures côtés

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).

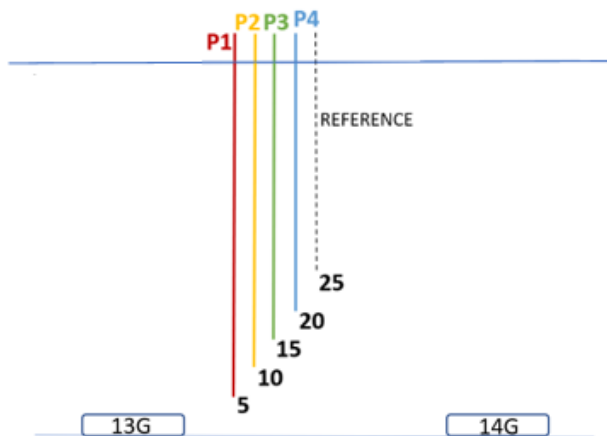
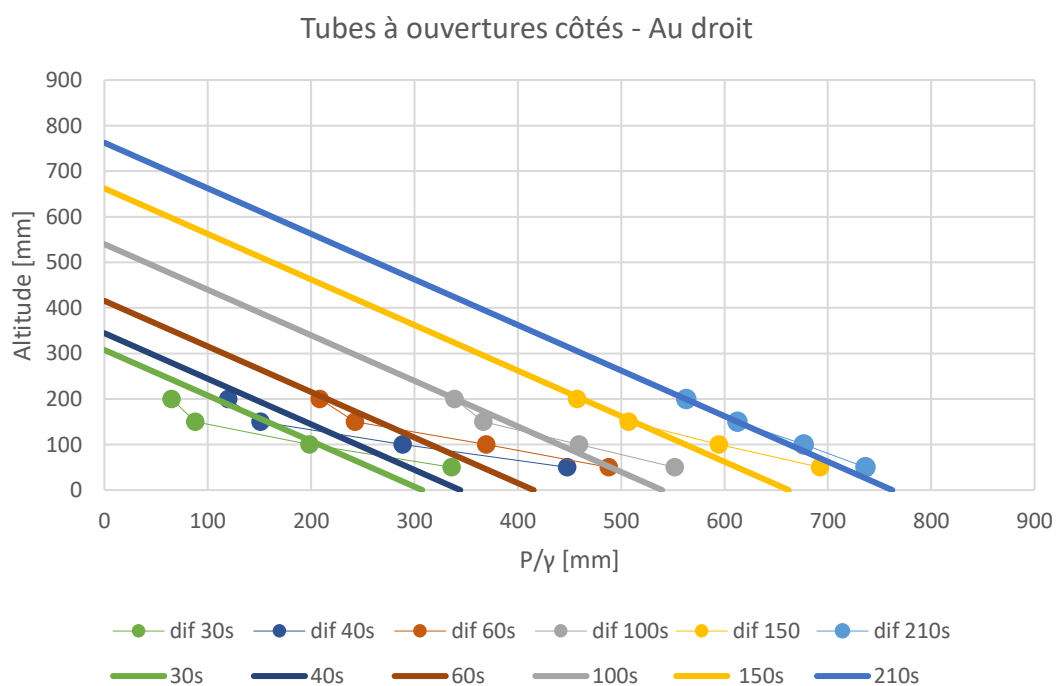


Figure 10-15: Configuration des tubes entre éjecteurs (Test hydrostatique)

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.



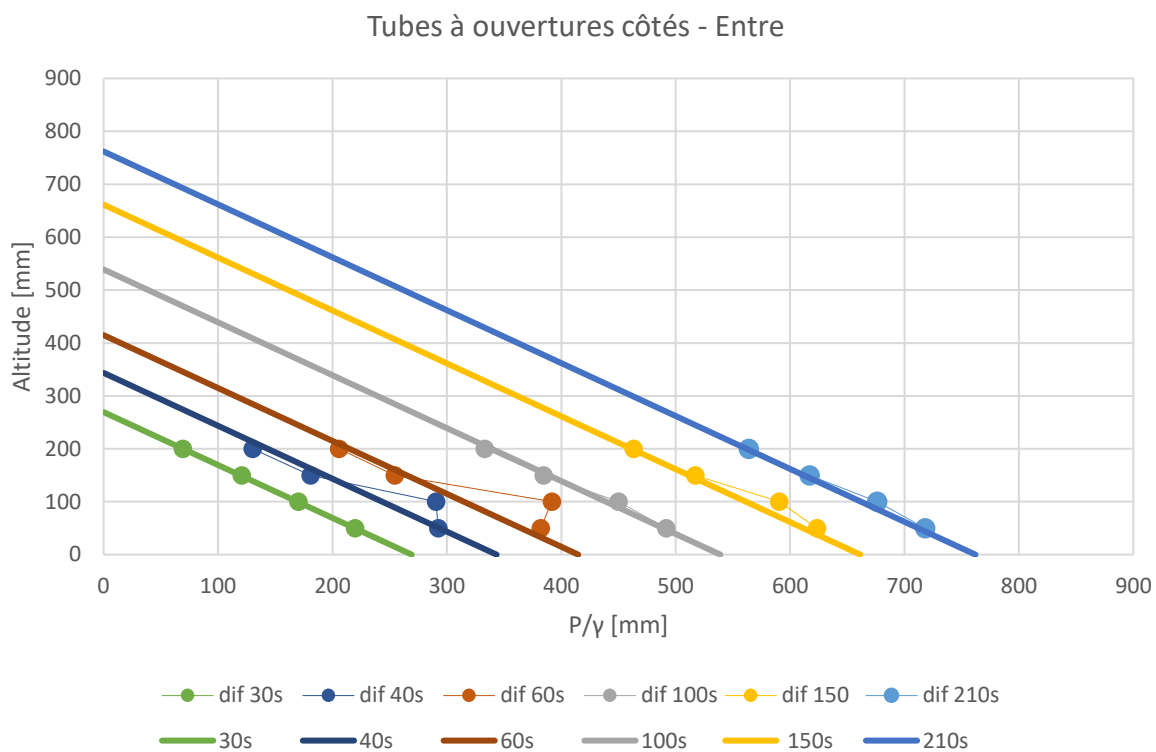


Figure 10-17 Entre

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**.

10.4 Influence de différents paramètres

1) Loi d'ouverture des vannes

- RED – barge centrée -> entre éjecteurs
- REF – barge bajorer éjecteur
- REF – barge bajorer opposé
- RED – barge centrée
- RED – barge bajorer éjecteur
- RED – barge bajorer opposé

2) Taille des éjecteurs

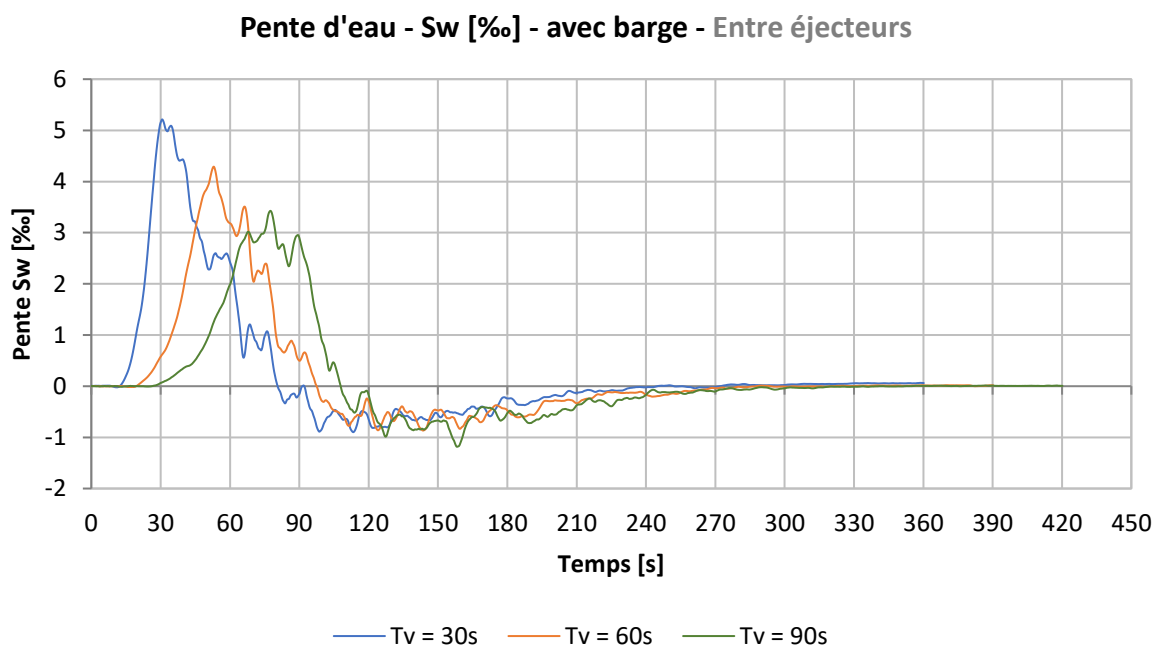
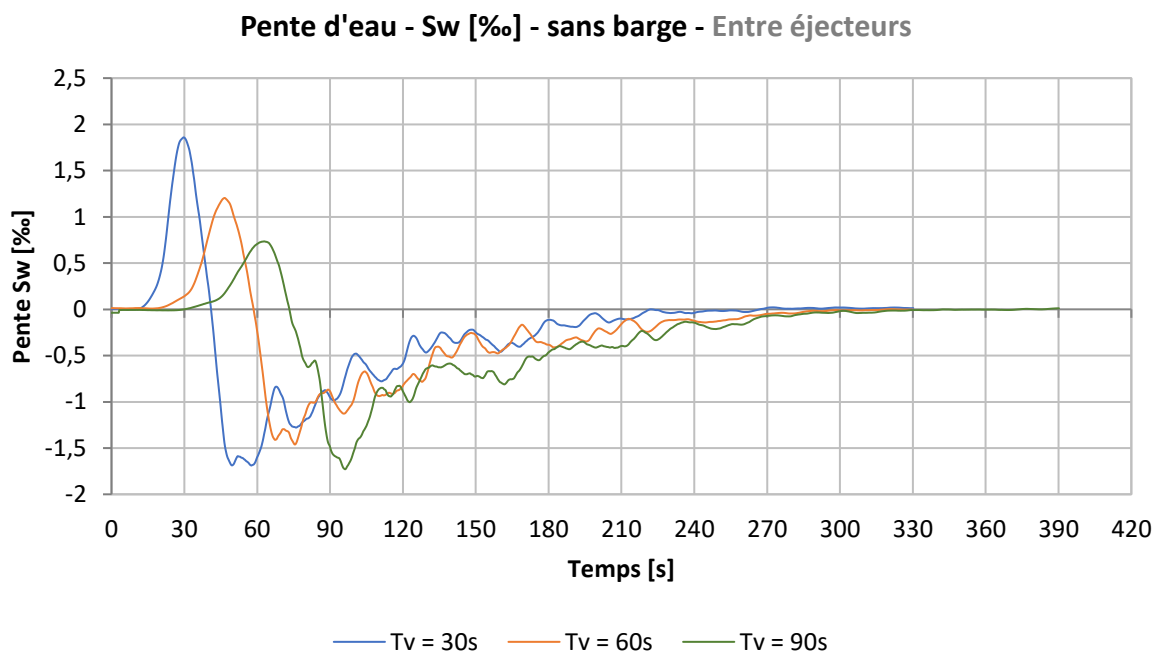
- 30s – barge centrée -> entre éjecteurs
- 30s – barge bajorer éjecteur
- 30s – barge bajorer opposé

3) Position transversale de la barge

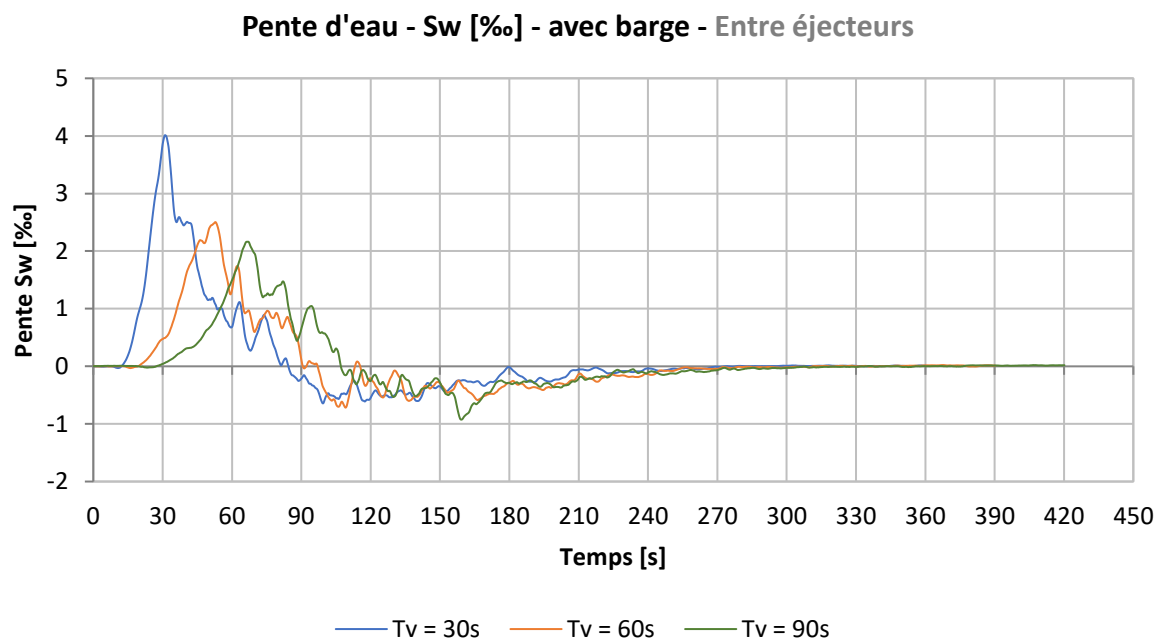
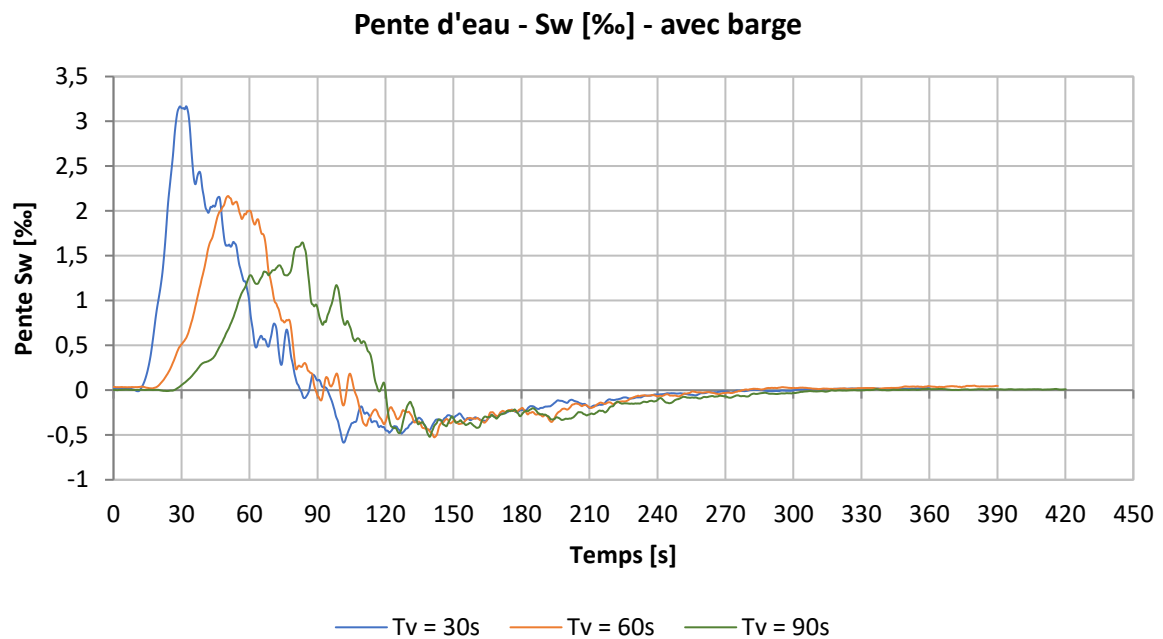
- 30s – REF -> Entre éjecteurs
- 30s – RED

10.4.1 Loi d'ouverture des vannes

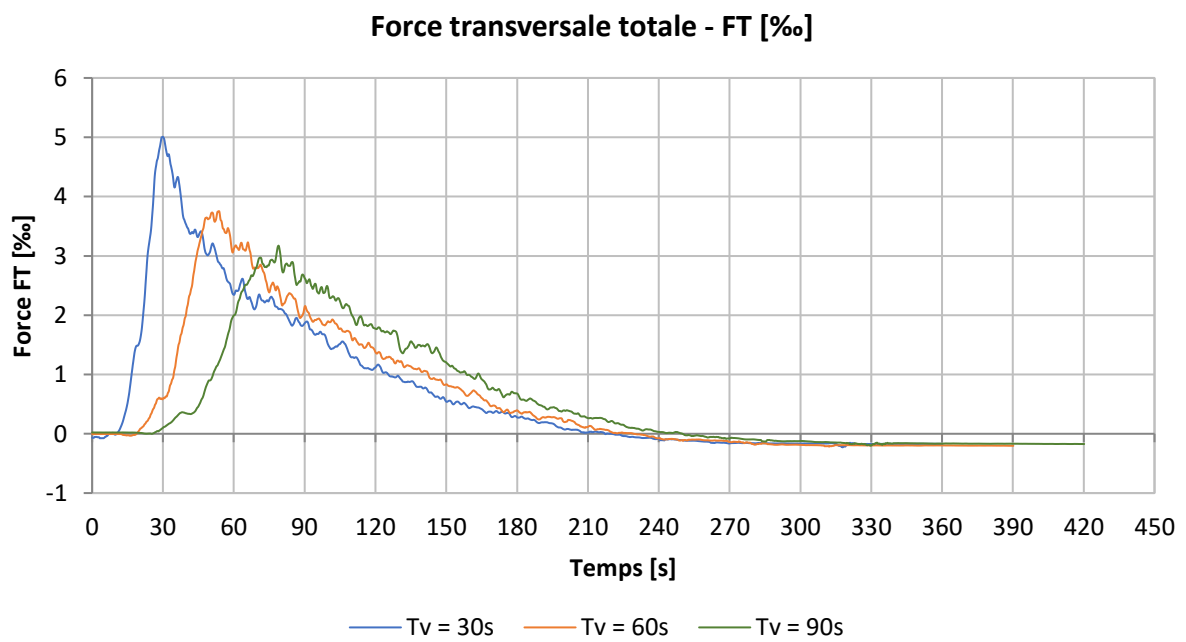
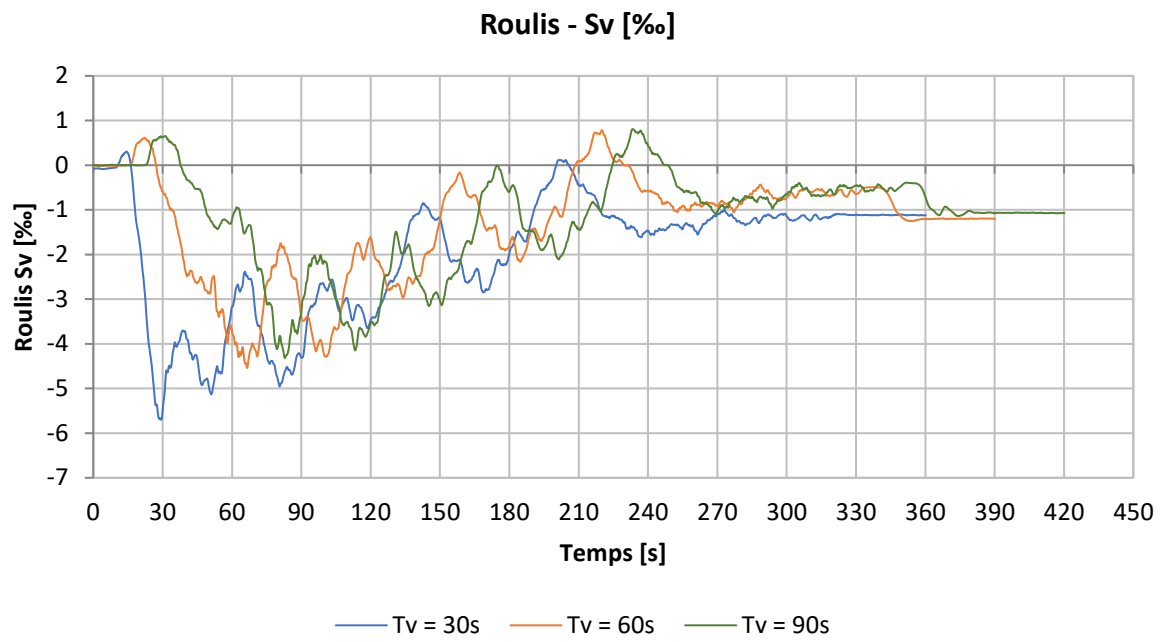
REF – barge centrée



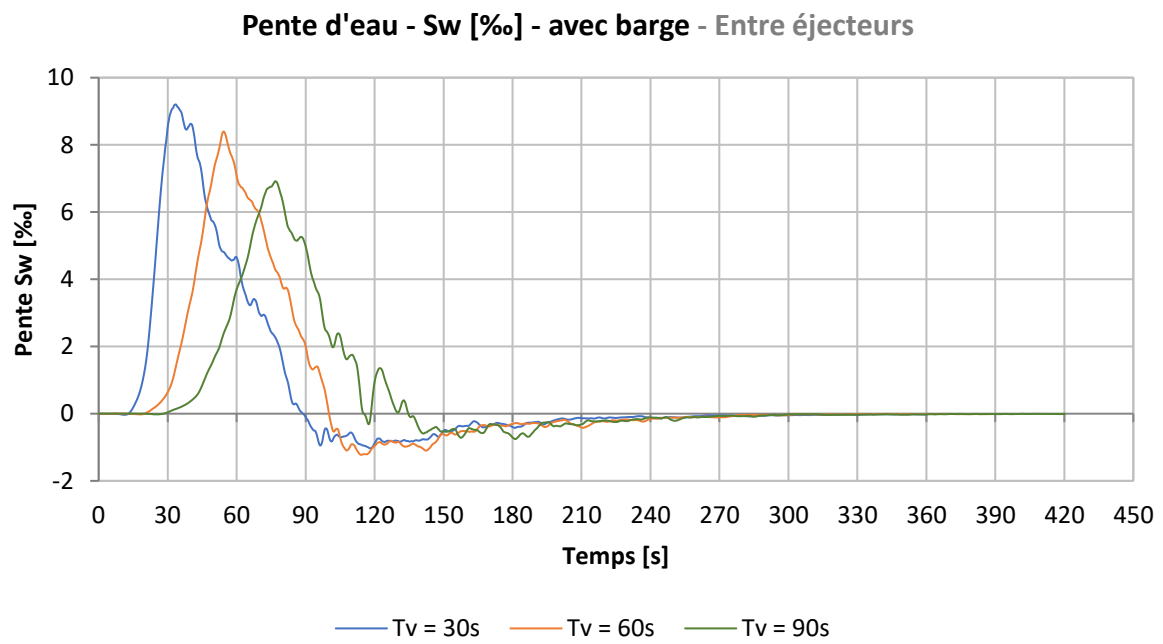
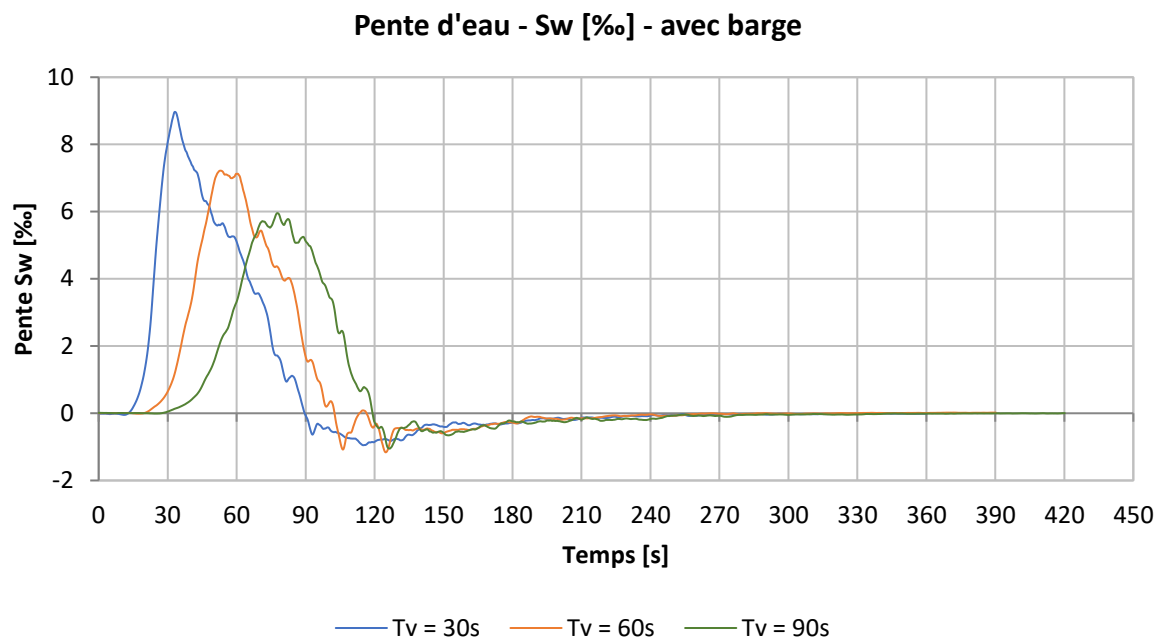
REF – barge bajoyer éjecteur



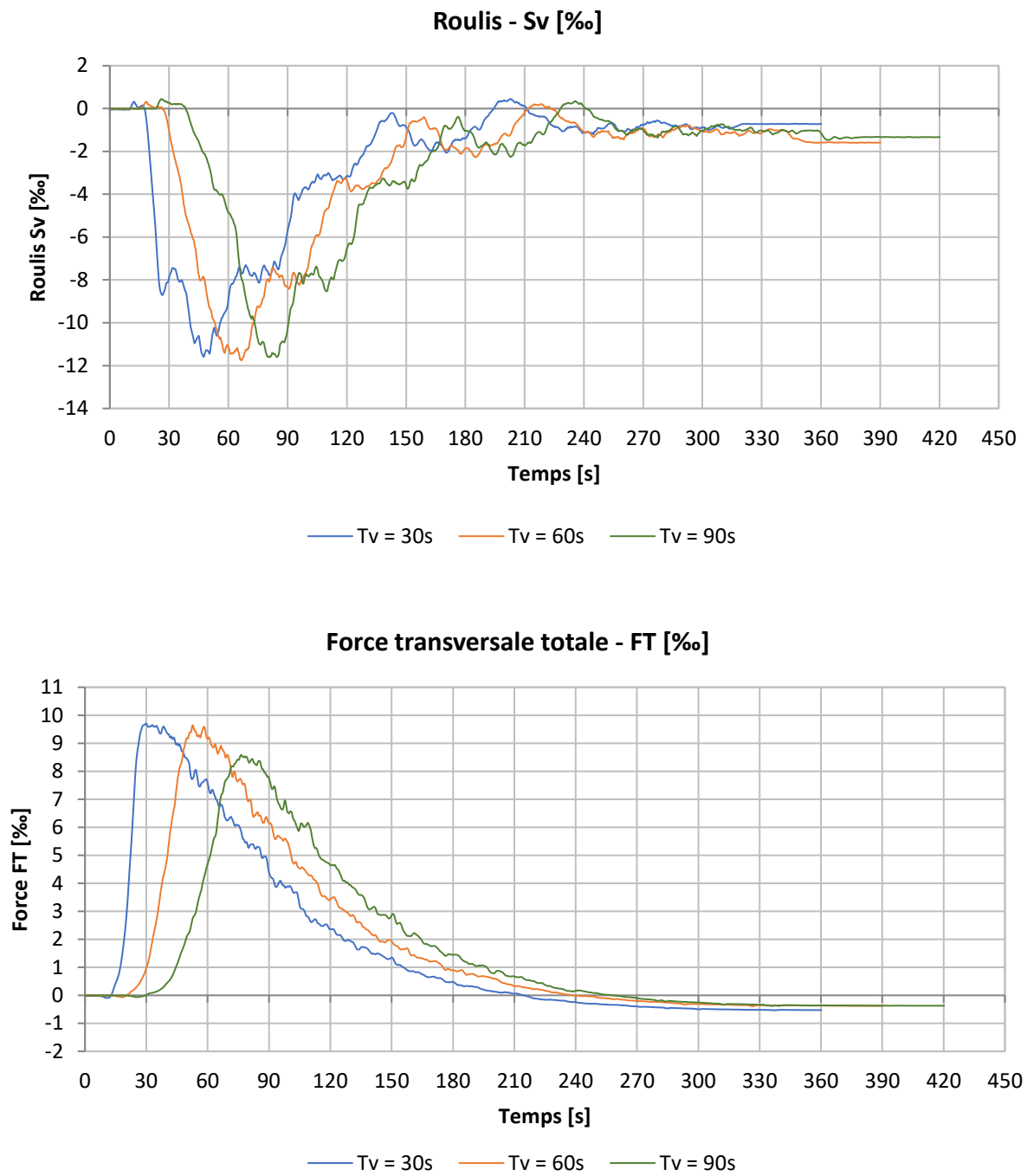
REF – barge bajoyer éjecteur



REF – barge bajoyer opposé

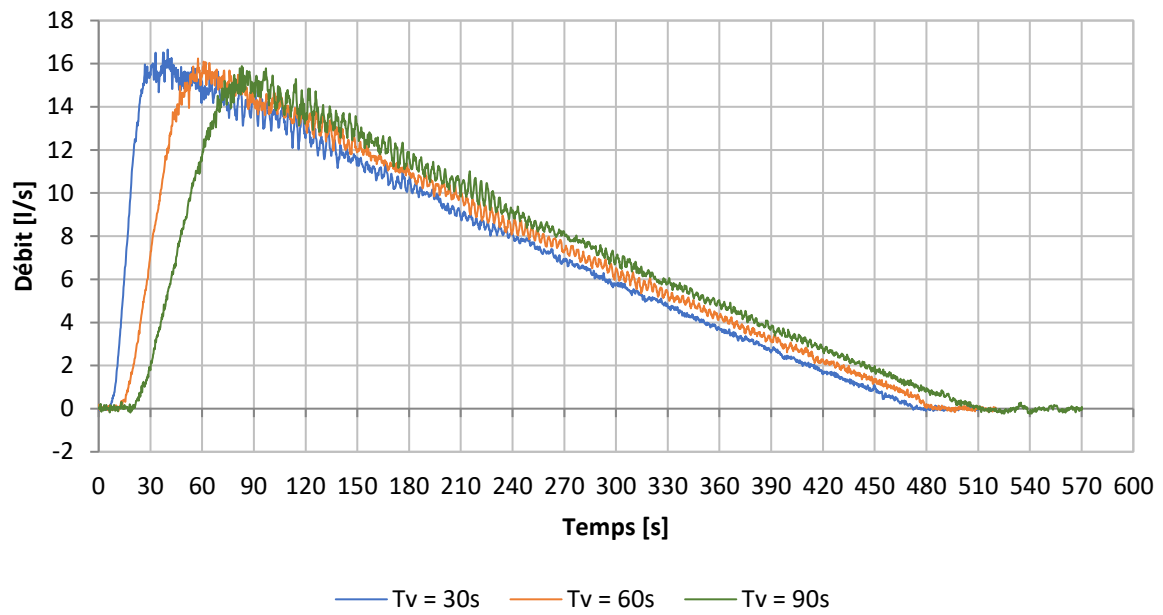


REF – barge bajoyer opposé

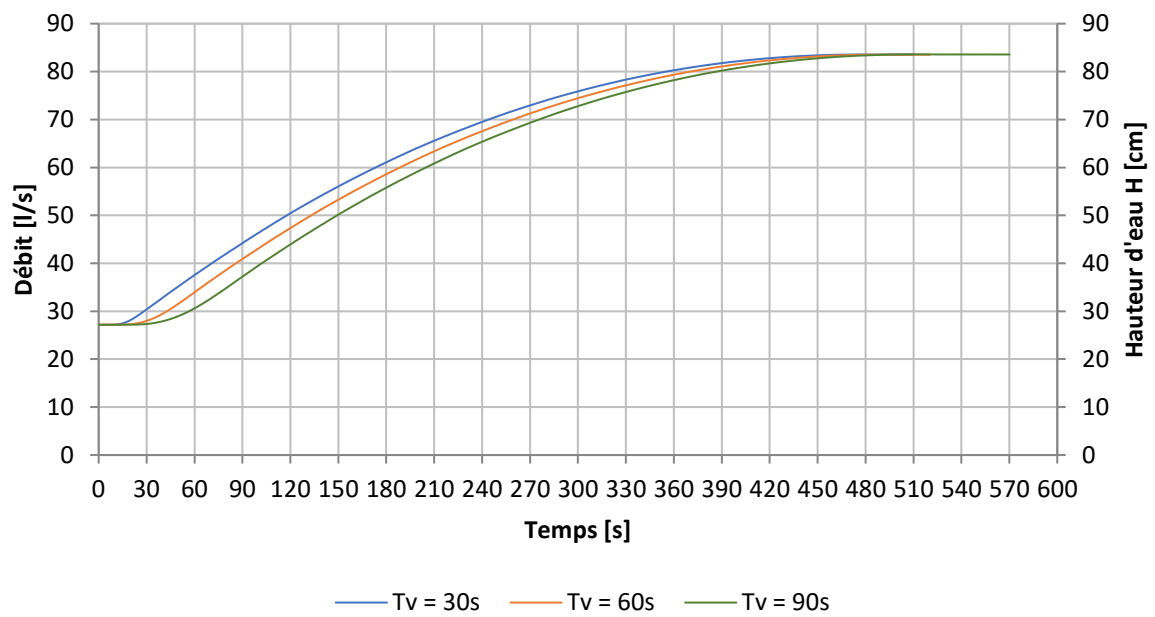


RED – barge centrée

Hydrogrammes

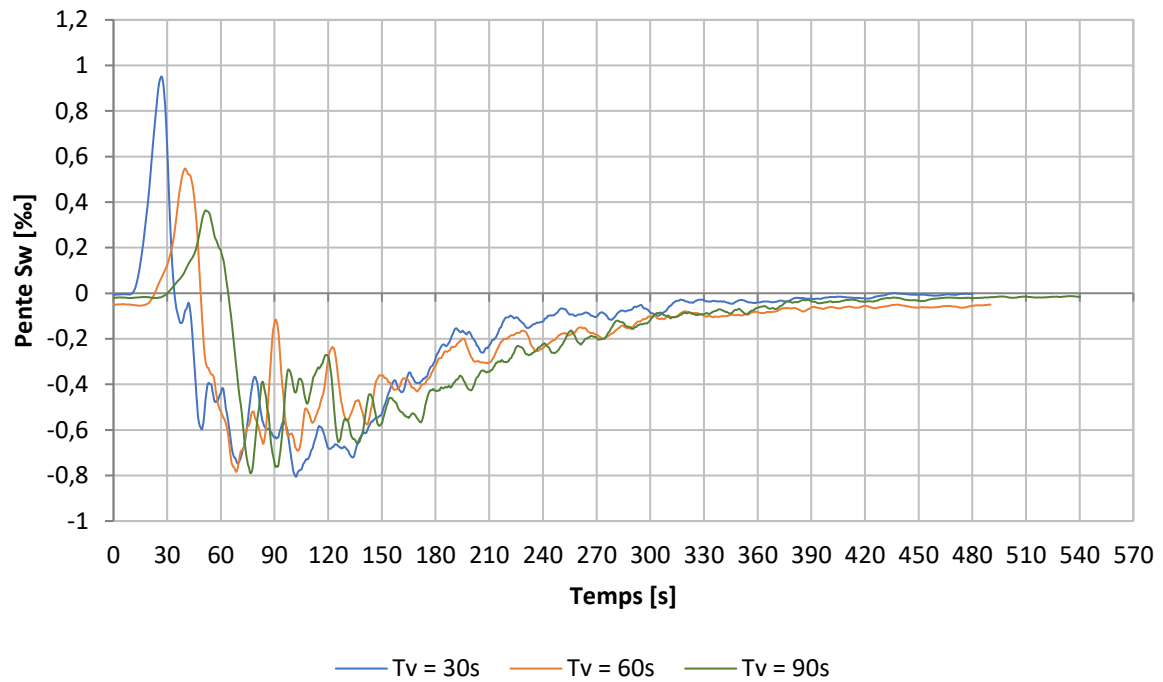


Limnigrammes

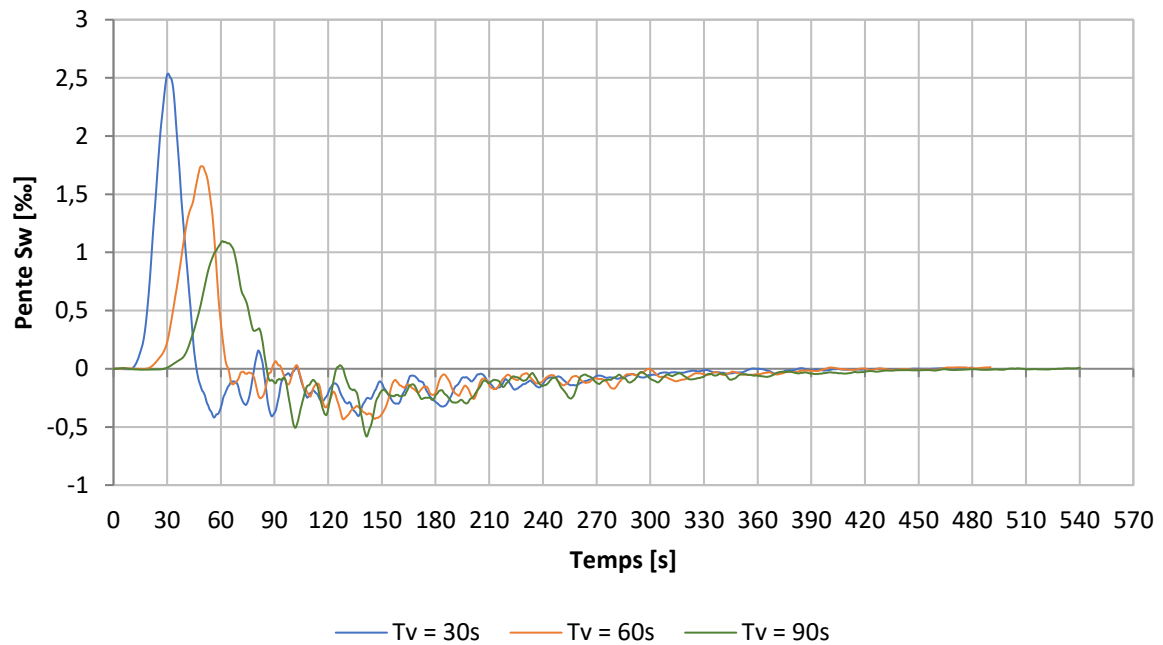


RED – barge centrée

Pentes d'eau - Sw [%] - sans barge

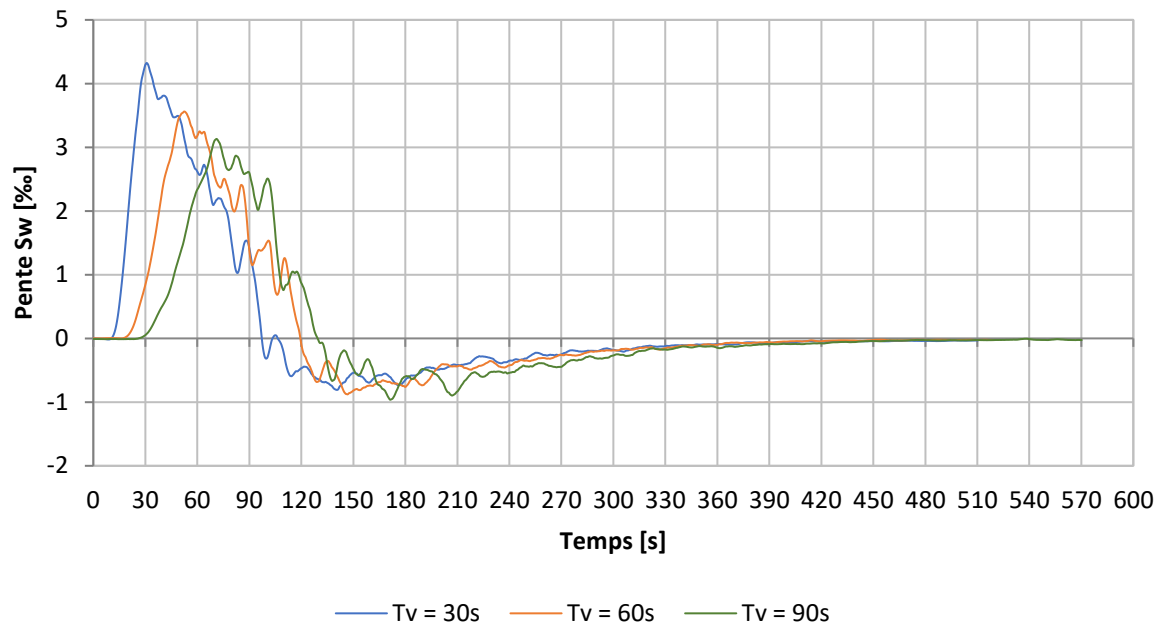


Pentes d'eau - Sw [%] - sans barge - Entre éjecteurs

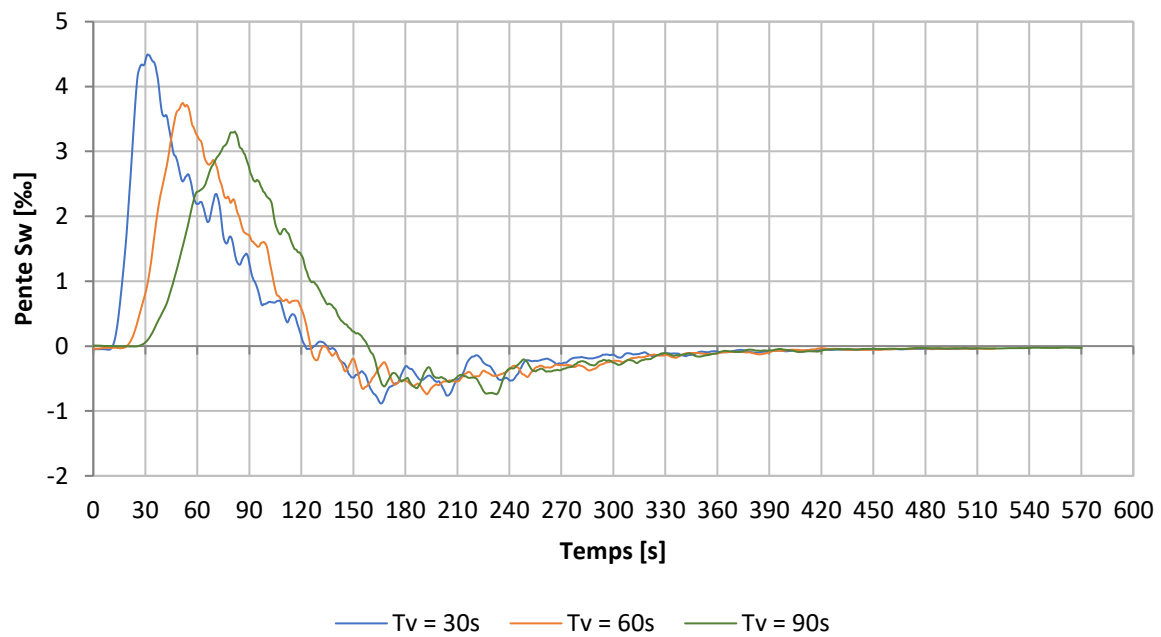


RED – barge centrée

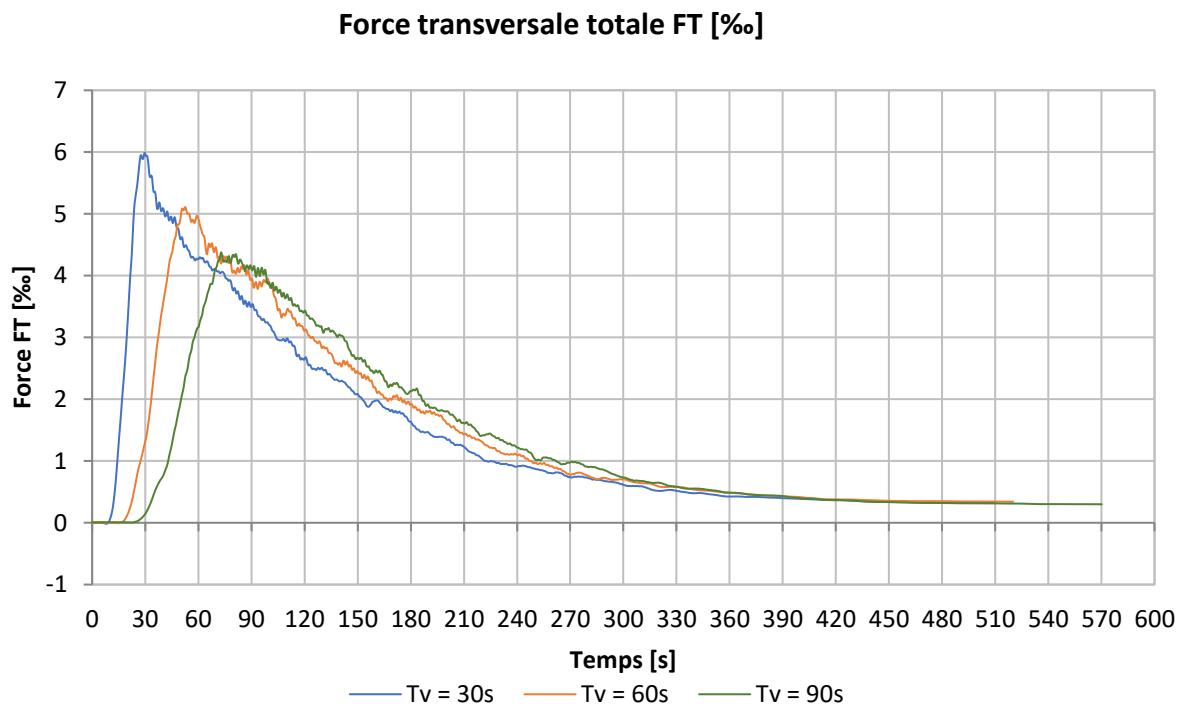
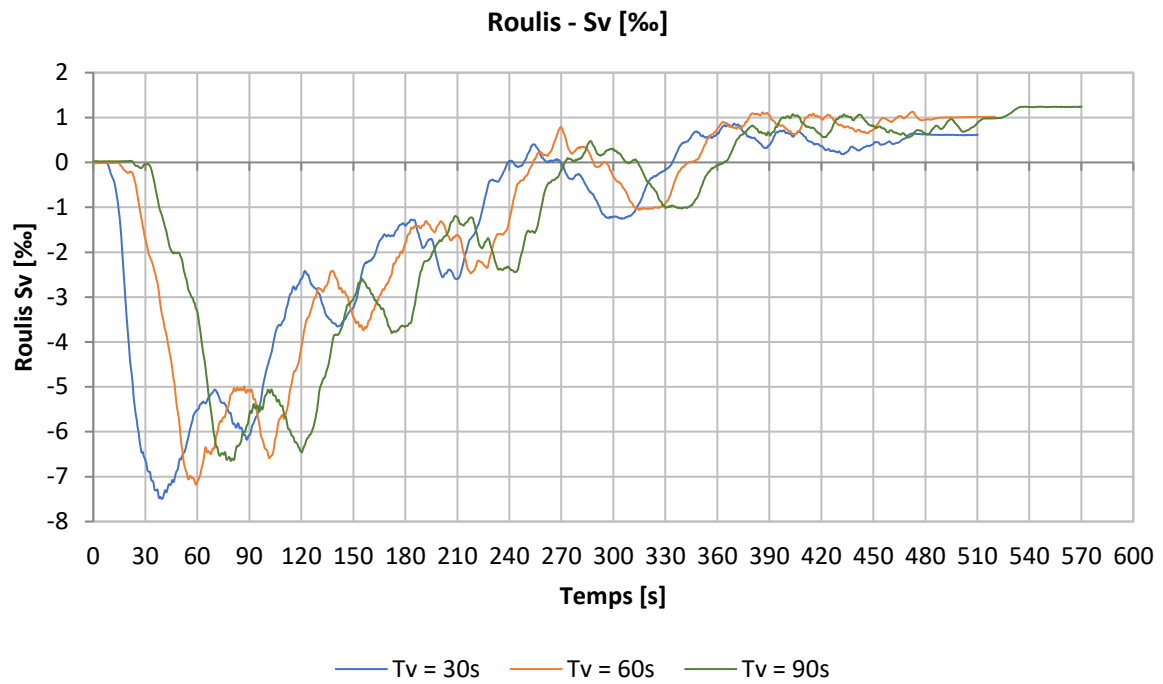
Pentes d'eau - Sw [‰] - avec barge

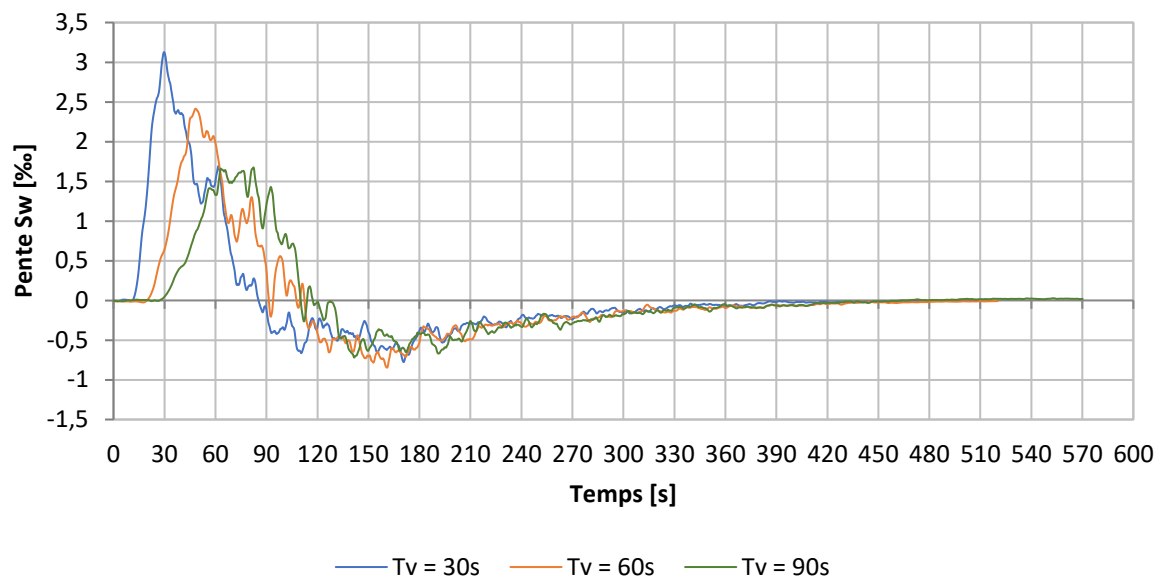
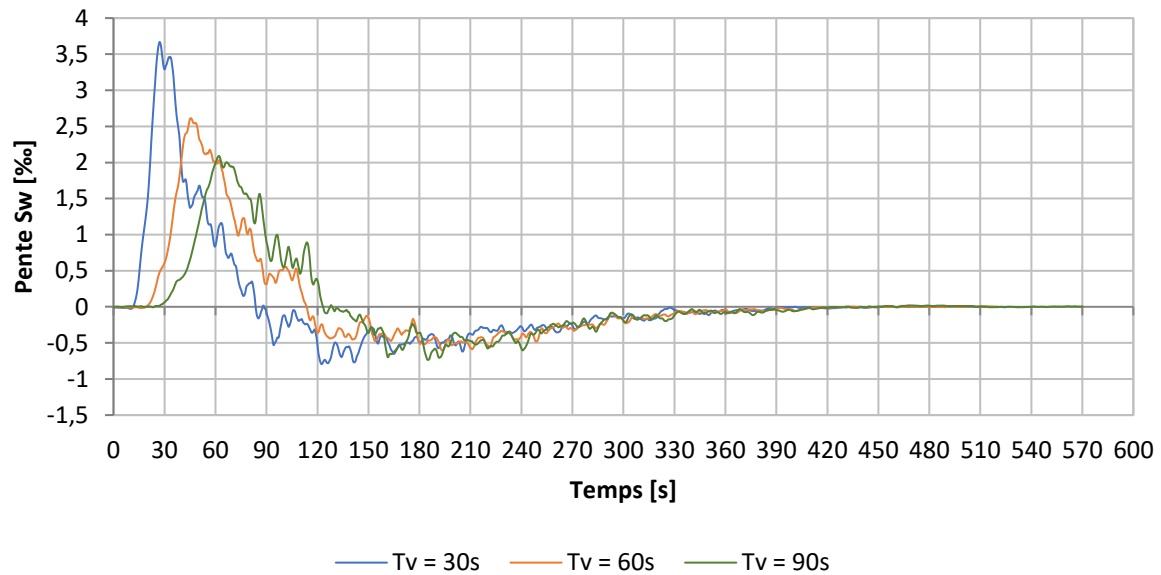


Pentes d'eau - Sw [‰] - avec barge - Entre éjecteurs

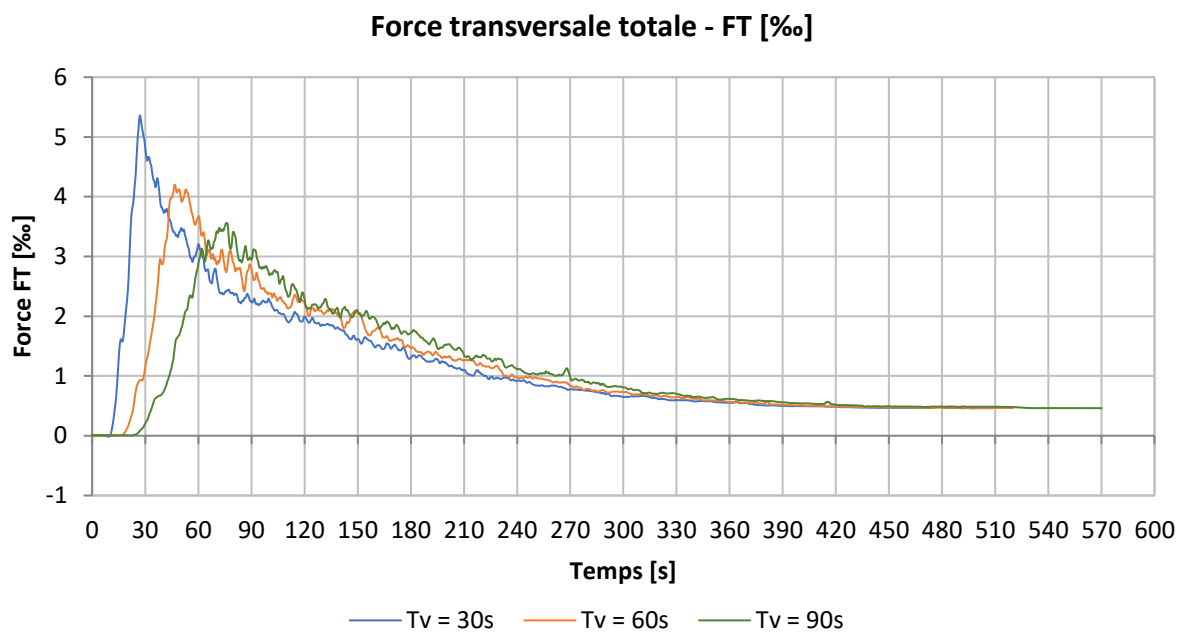
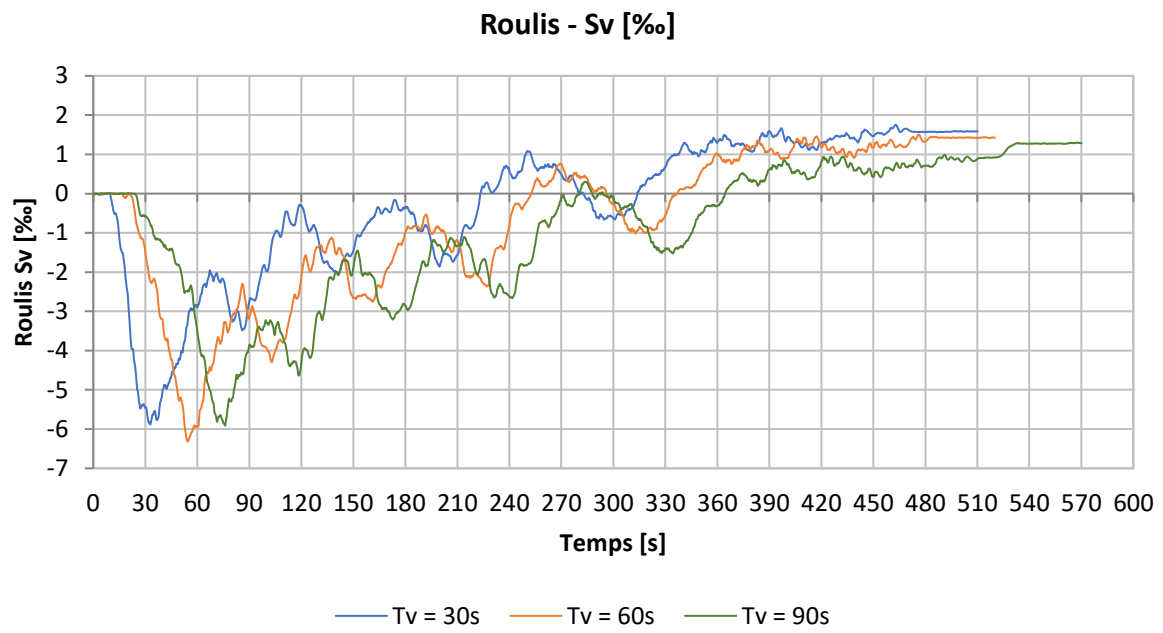


RED – barge centrée



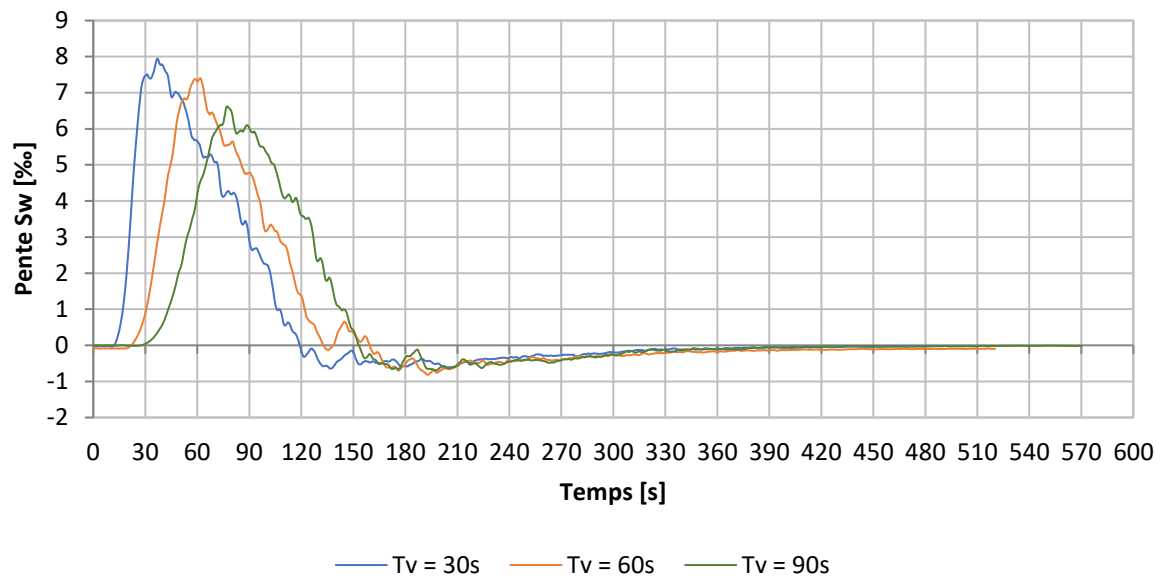
RED – barge bajoyer éjecteur**Pente d'eau - Sw [‰] - avec barge****Pente d'eau - Sw [‰] - avec barge - Entre éjecteurs**

RED – barge bajoyer éjecteur

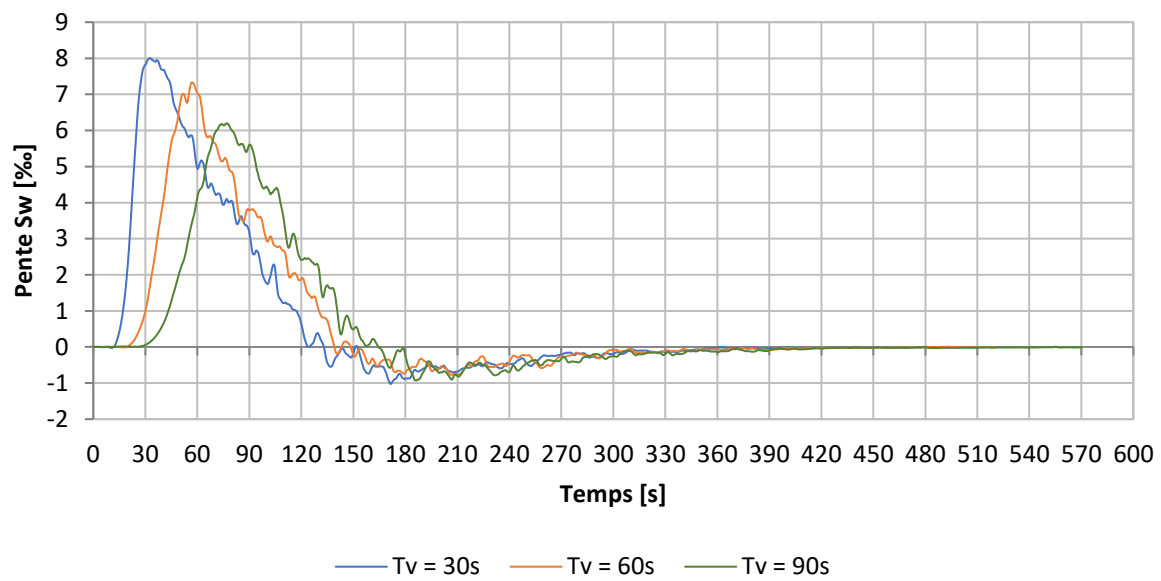


RED – barge bajoyer opposé

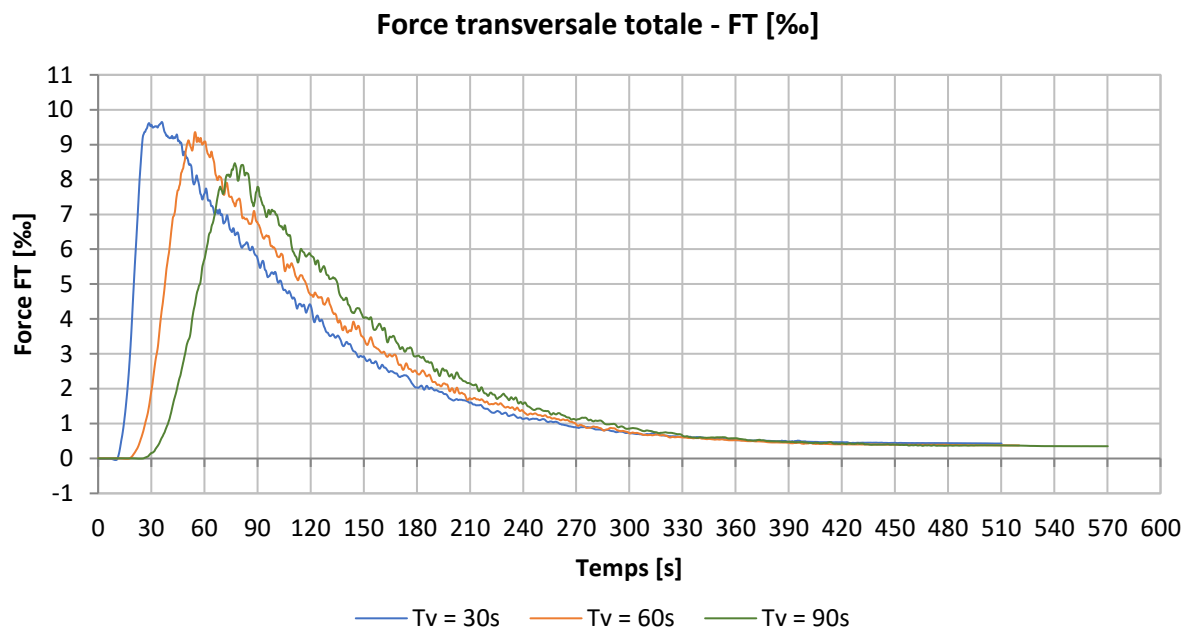
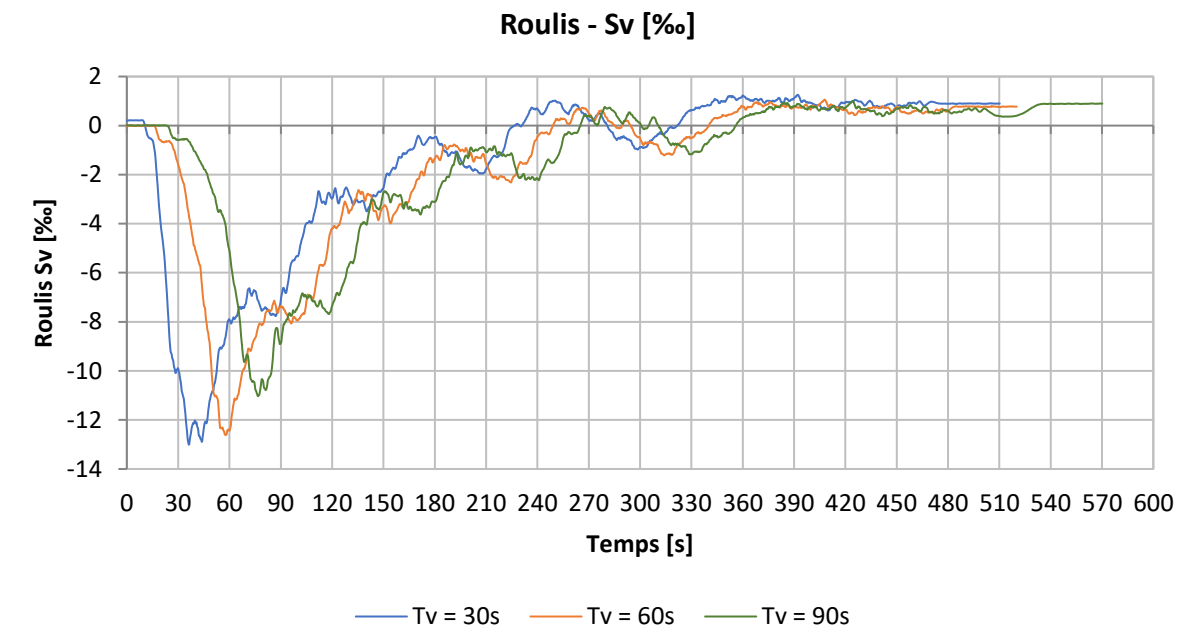
Pente d'eau - Sw [%] - avec barge



Pente d'eau - Sw [%] - avec barge - Entre éjecteurs

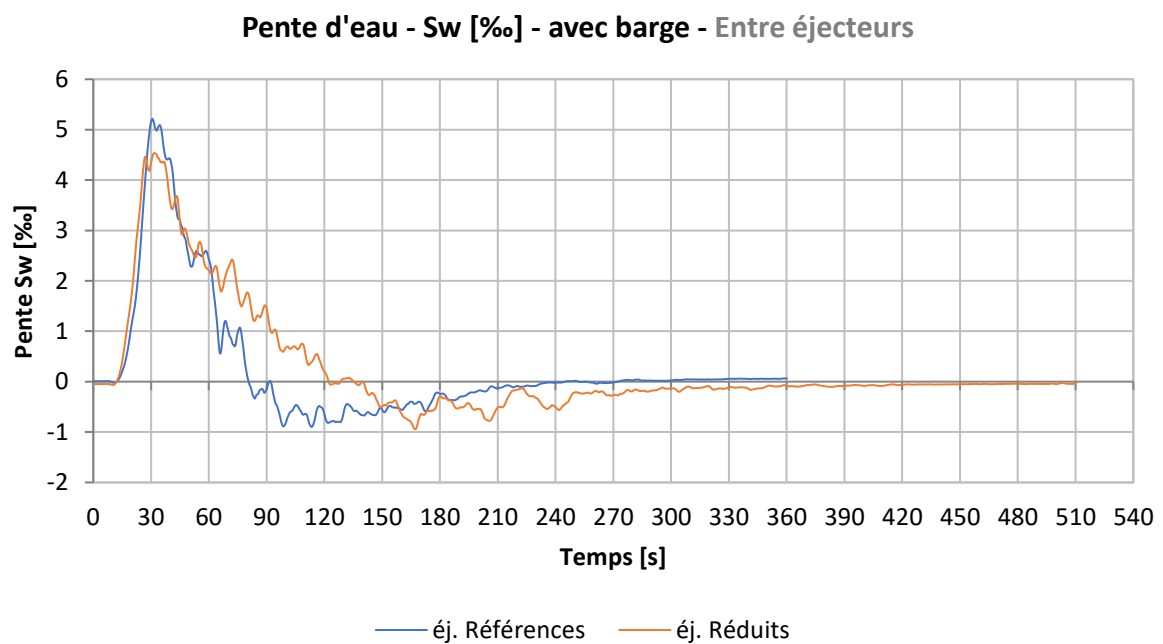
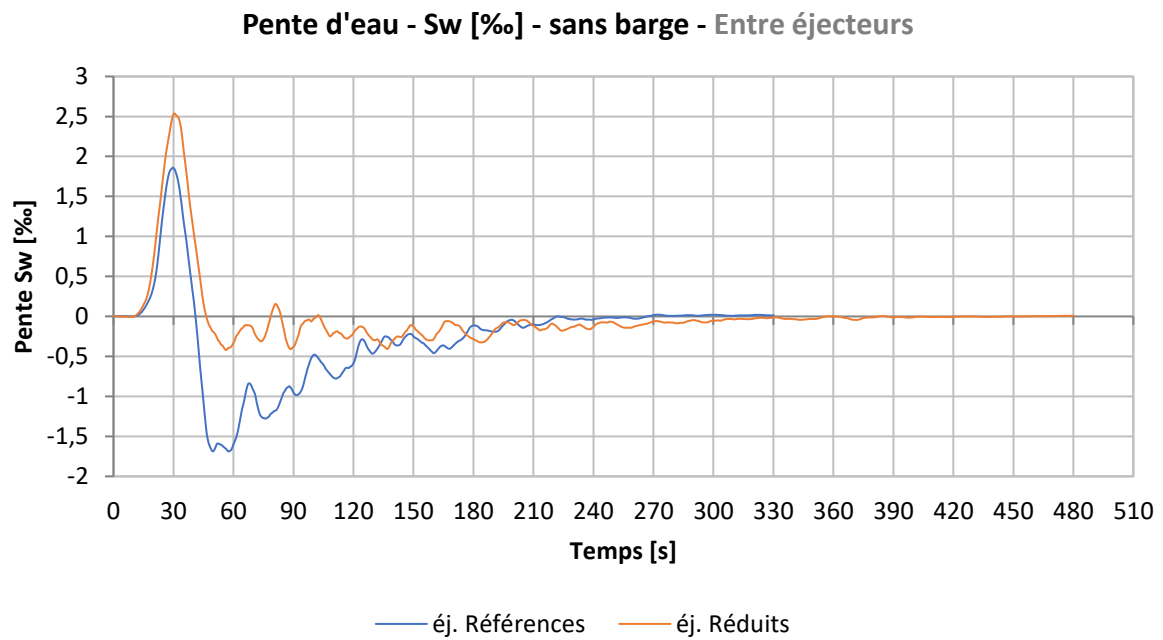


RED – barge bajoyer opposé

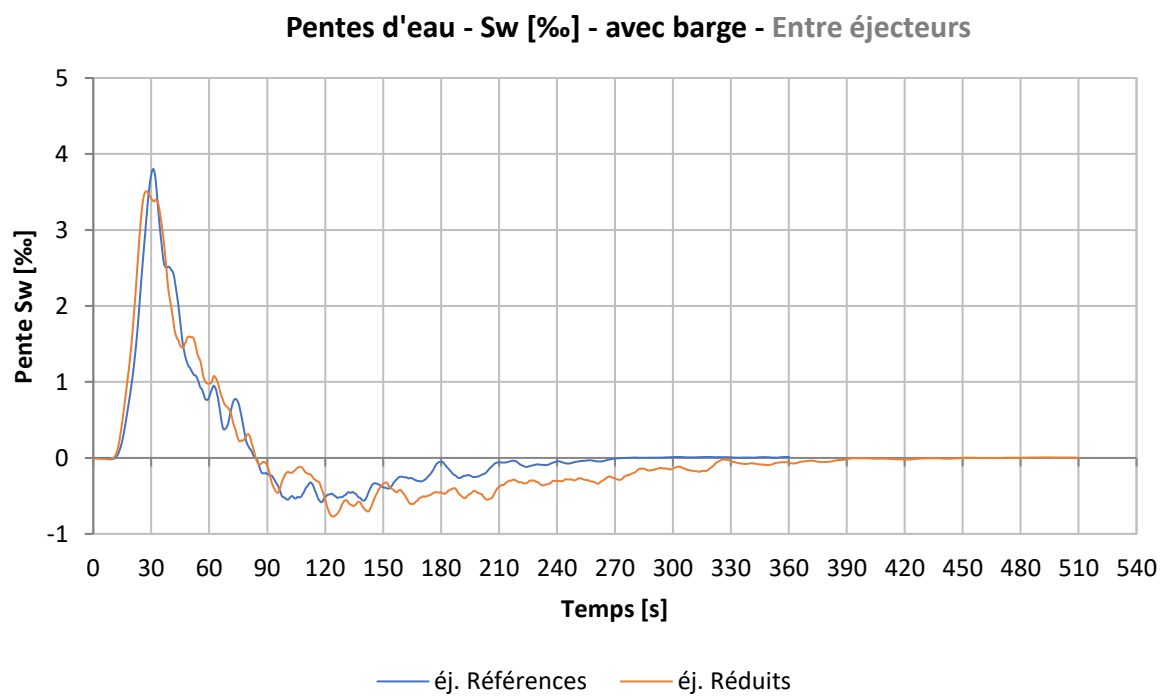
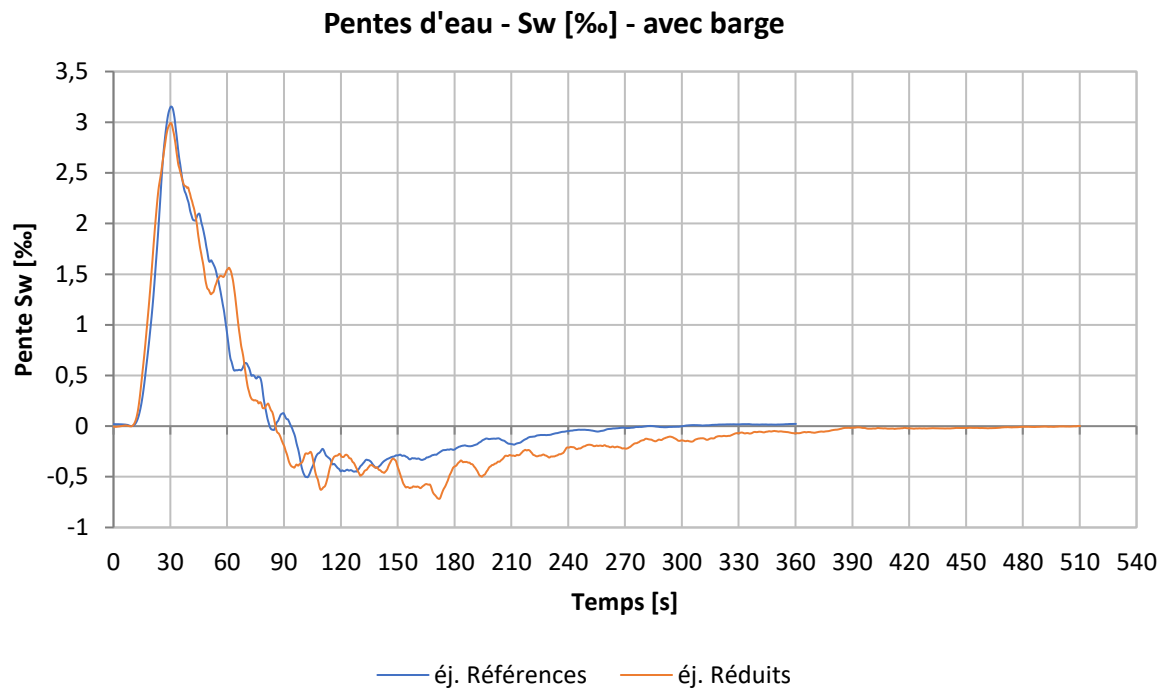


10.4.2 Taille des éjecteurs

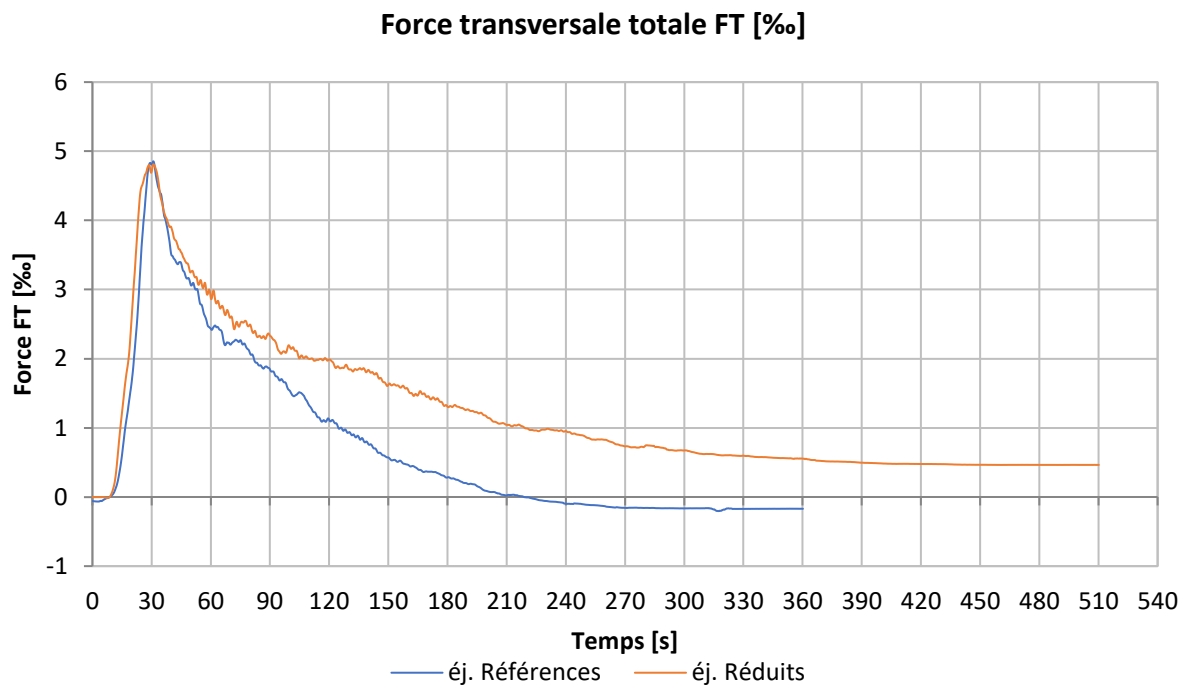
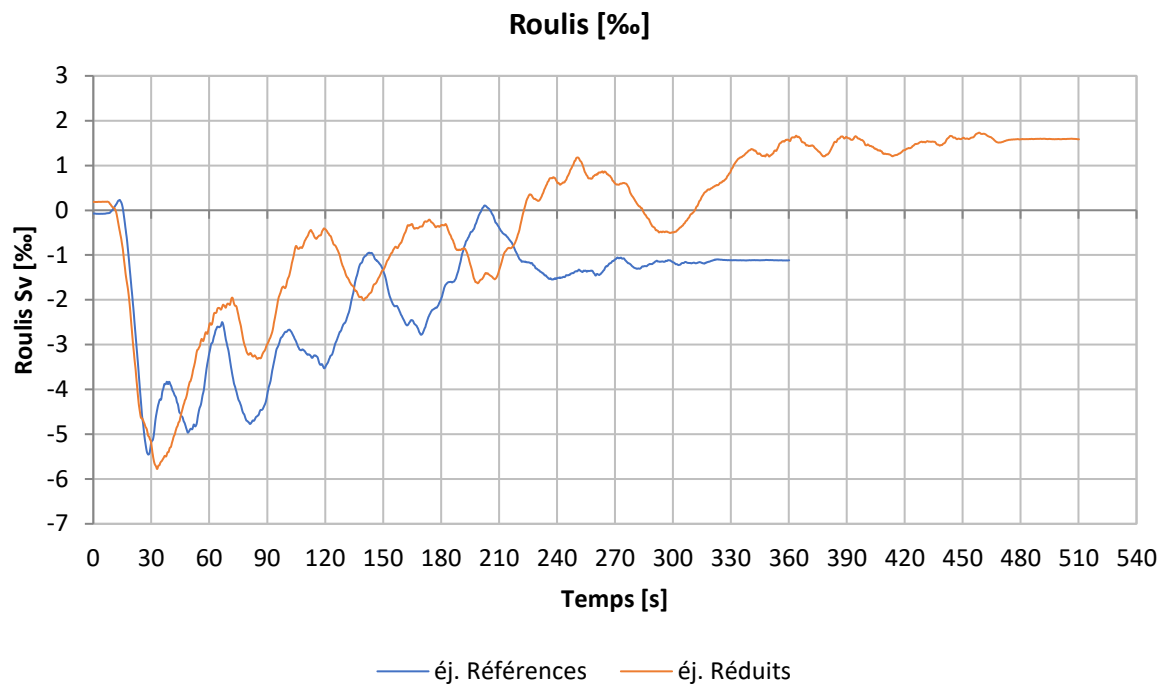
30s – Barge centrée



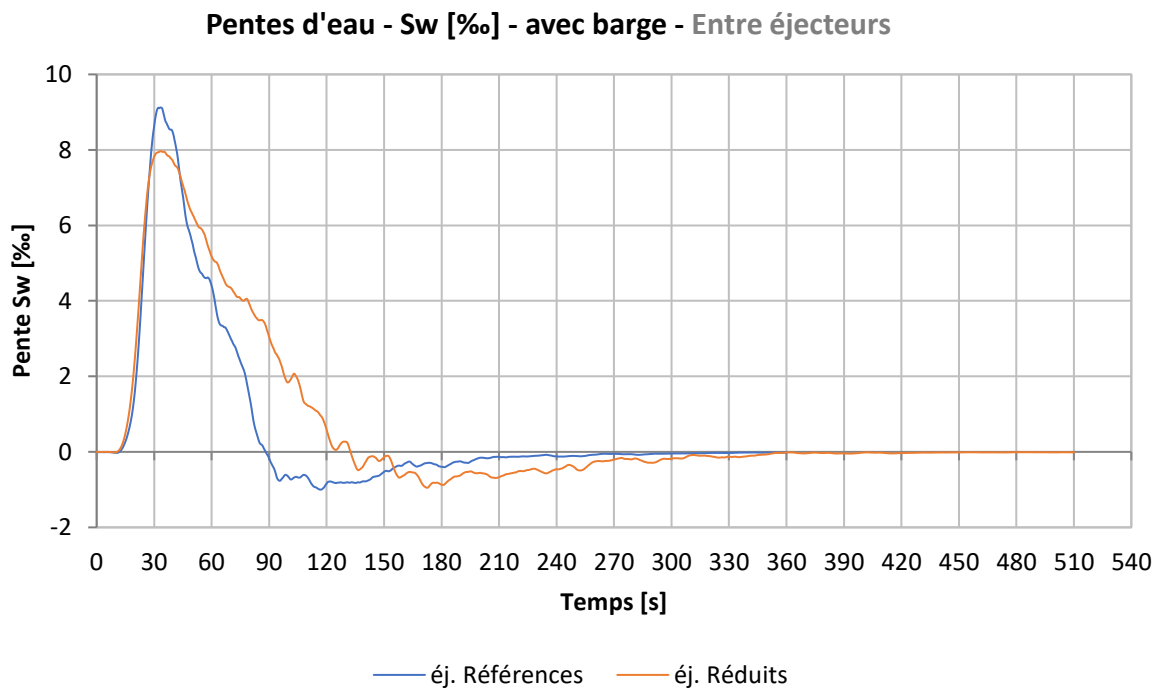
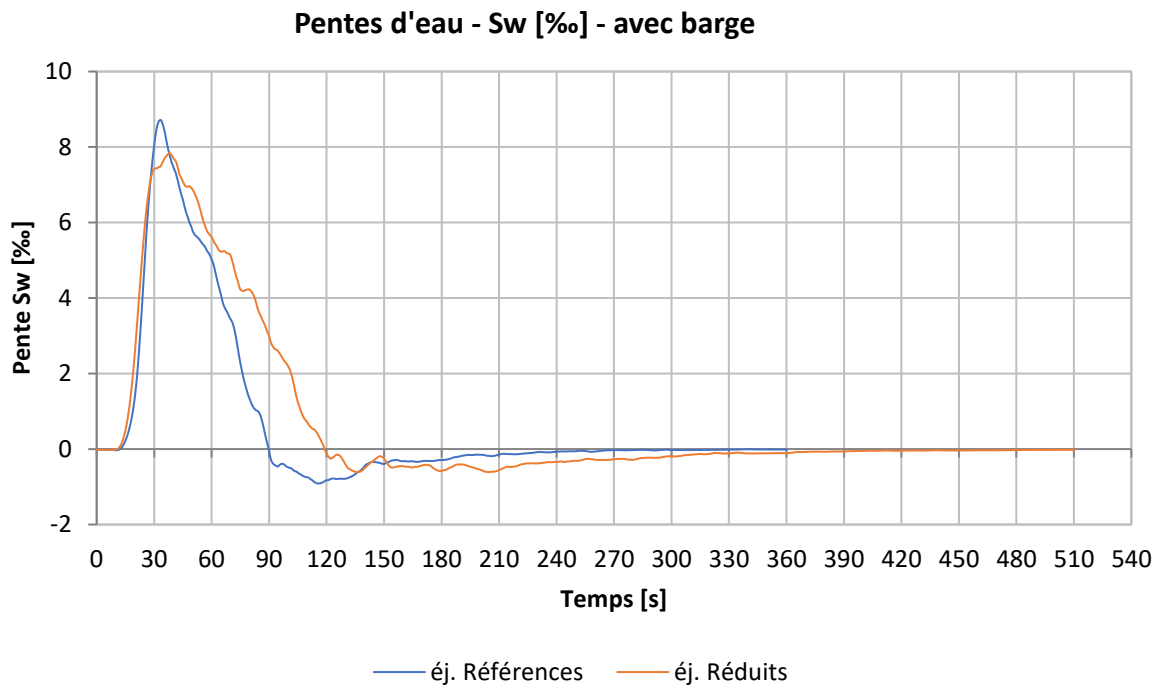
30s – barge bajoyer éjecteur



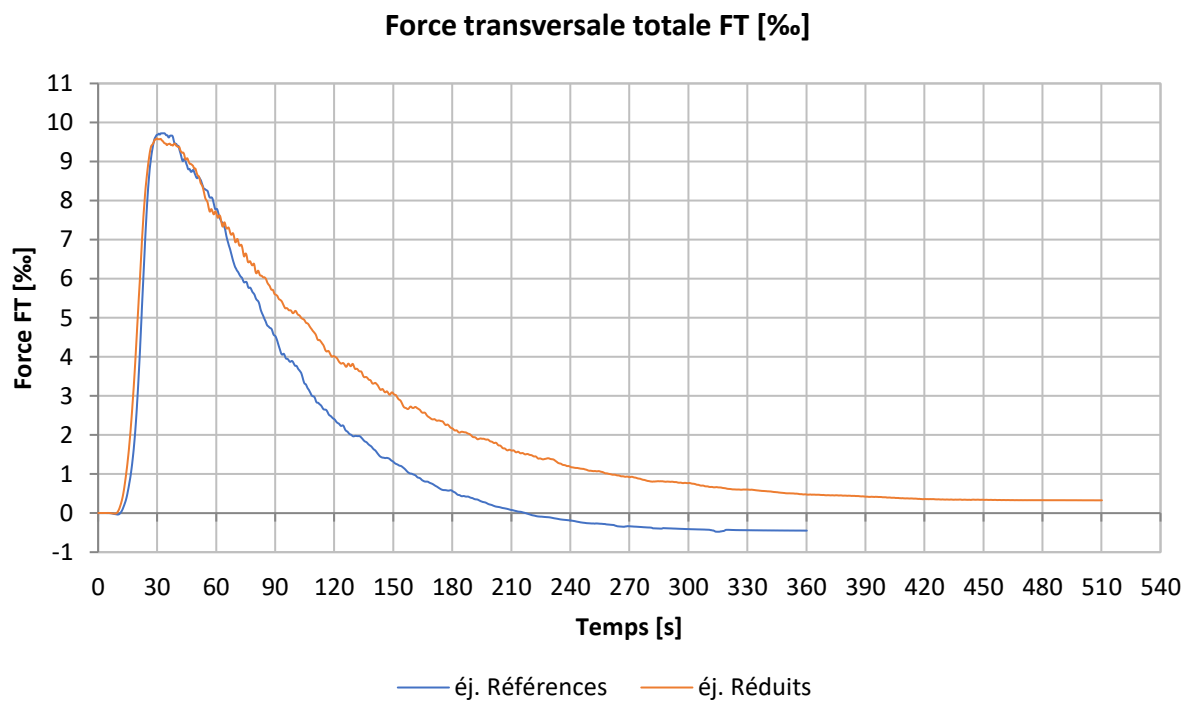
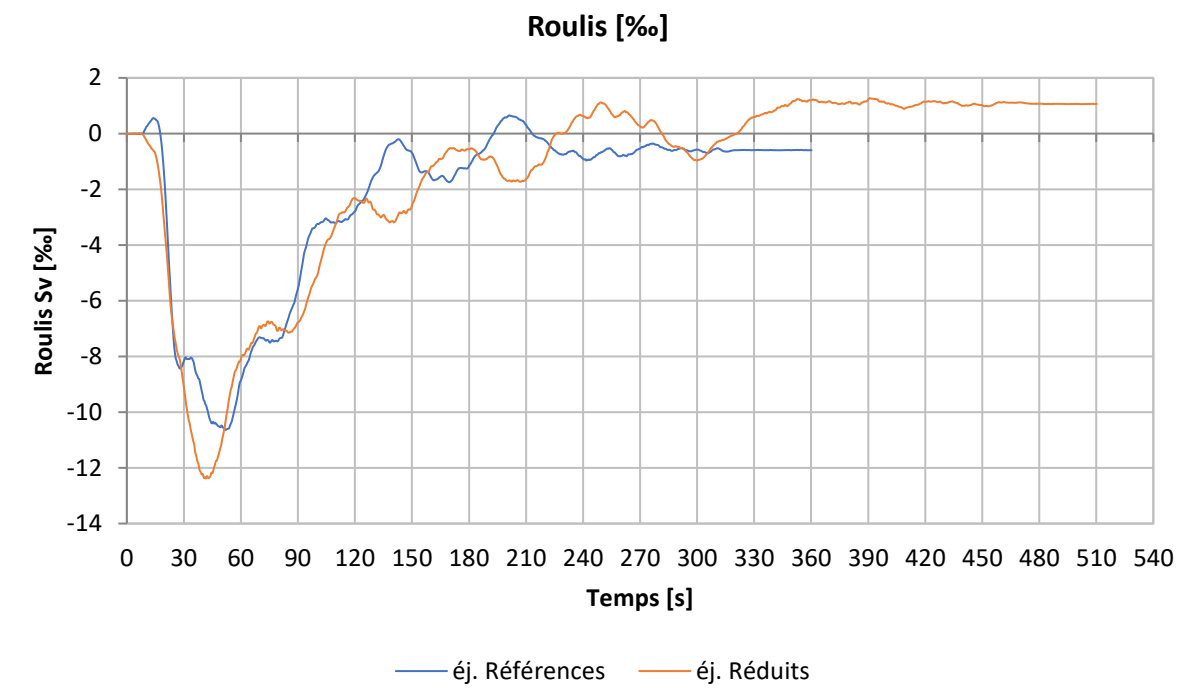
30s – barge bajoyer éjecteur



30s – barge bajoyer opposé

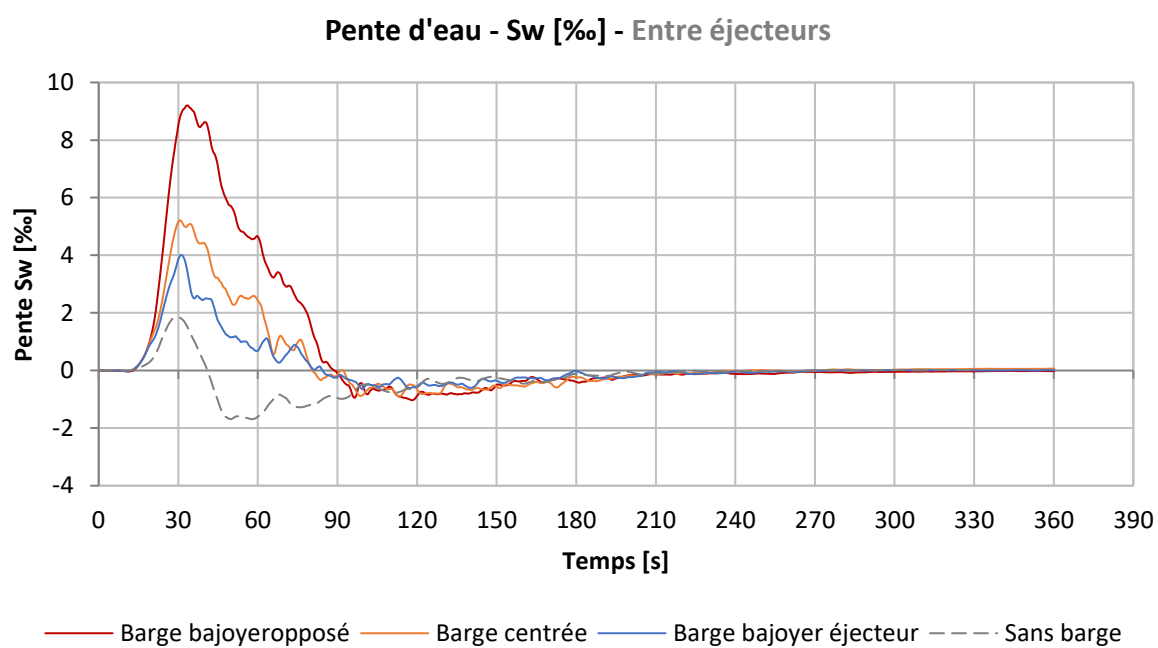


30s – barge bajoyer opposé

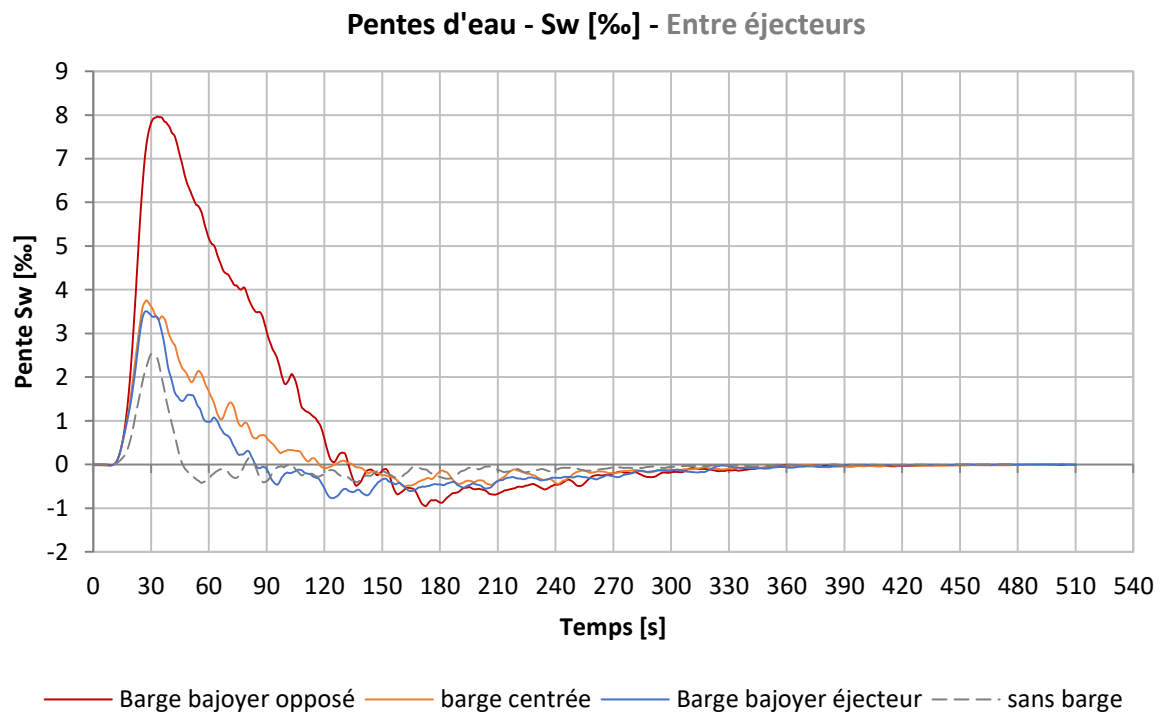
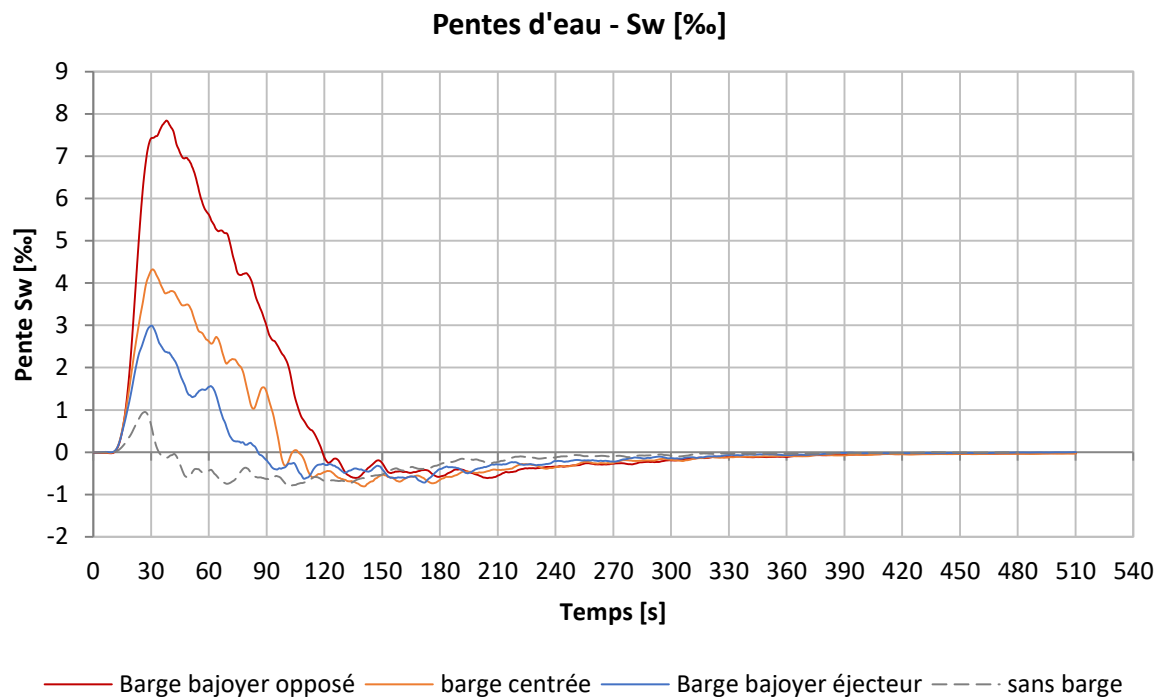


10.4.3 Position transversale de la barge

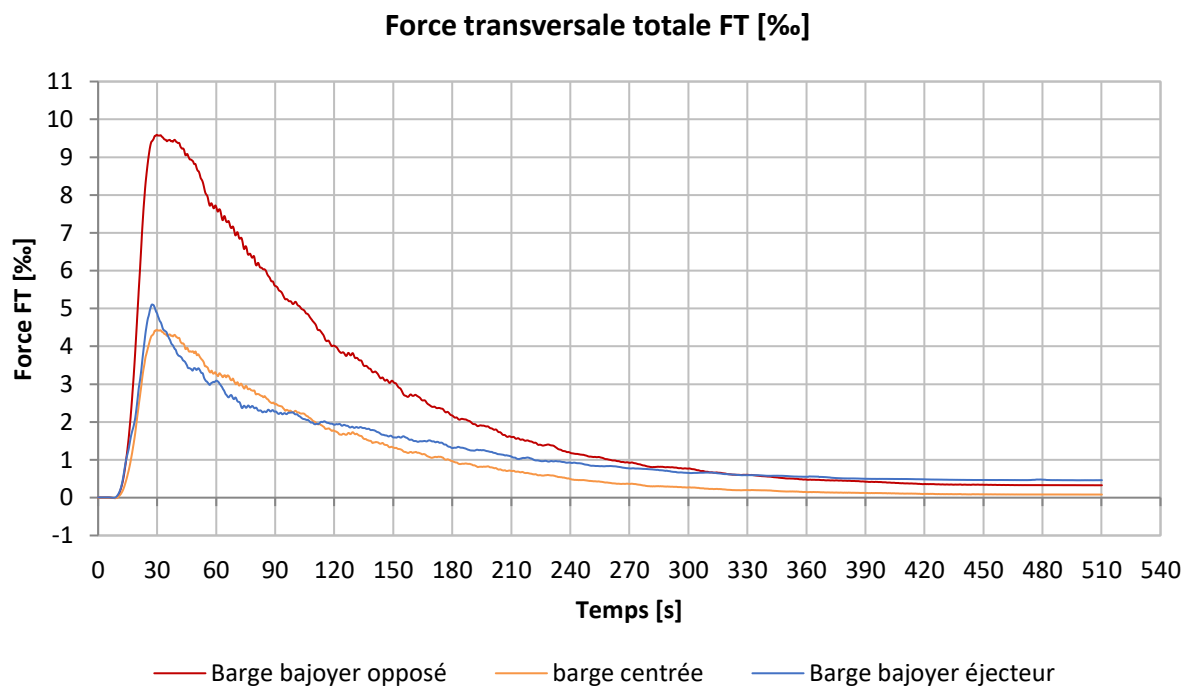
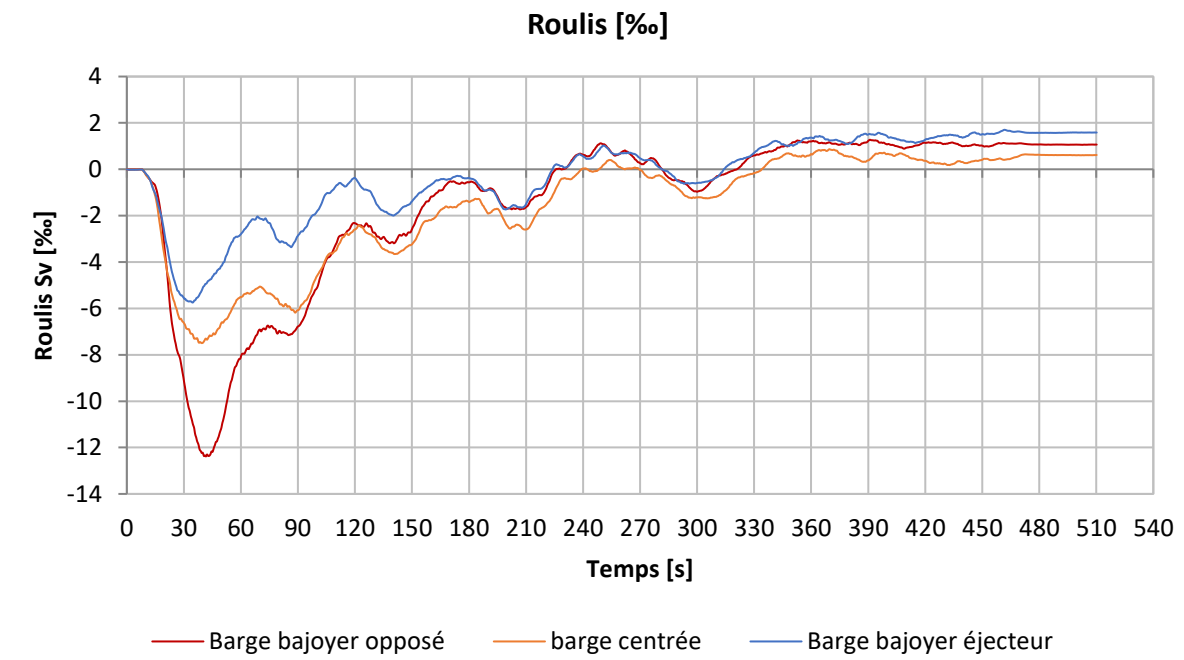
30s – REF



30s – RED



30s – RED



UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

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