

École polytechnique de Louvain

Remplissage et vidange d'écluses -

Validation et comparaison de modèles
numériques existants sur base de mesures
réalisées sur terrain.

Auteur: **Antoine GORIYA**

Promoteurs: **Ir. Didier BOUSMAR, Ir. Céline SAVARY (SPW)**

Lecteurs: **Ir. Didier BOUSMAR, Ir. Céline SAVARY (SPW), Ir. João
ALMEIDA**

Année académique 2019–2020

Master [120] : ingénieur civil des constructions

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

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

Remerciements

Je tiens dans un premier temps à remercier toutes les personnes qui m'ont accompagnées lors de la rédaction de ce mémoire.

Je remercie tout particulièrement mes promoteurs, Monsieur Bousmar et Madame Savary, pour leur soutien régulier, les conseils avisés et les réflexions sur mes résultats qui ont contribué à l'aboutissement de ce travail.

Je voudrais également remercier Damien Christiaens, ancien chercheur à l'UCL, pour m'avoir aidé à comprendre et à prendre en main le programme ALFREDO qu'il avait lui même codé.

Je remercie ensuite Alexander de Loor, de l'institut Deltares, pour m'avoir éclairé sur les fonctionnements de LOCKFILL.

Enfin, je tiens à remercier ma famille et mon entourage pour leur soutien constant et leurs encouragements.

Table des matières

0.1	Lexique	
1	Introduction	1
2	Aspects théoriques	4
2.1	Les écluses - présentation	4
2.1.1	Définition	4
2.1.2	Géométrie de l'écluse	5
2.1.3	Système de remplissage de l'écluse	6
2.1.4	Types de vannes	7
2.1.5	Lois de remplissage	8
2.2	Critères d'acceptabilité	9
2.3	Classes de bateaux - gabarits CEMT	9
2.4	Forces s'exerçant sur un bateau lors des opérations de sasse- ment d'une écluse	10
2.4.1	Contexte général	10
2.4.2	Forces hydrostatiques	11
2.4.3	Forces hydrodynamiques	11
3	Comparaison d'ALFREDO et de LOCKFILL	13
3.1	Présentation	13
3.2	Types de remplissage disponibles	14
3.3	Principe de la simulation	14
3.3.1	Débit au travers des réseaux de conduites	15
3.3.2	Ecoulement à l'intérieur du sas de l'écluse	15
3.4	Implémentation des forces agissant sur le bateau	16
3.4.1	Force hydrostatique	17
3.4.2	Forces hydrodynamiques - ALFREDO	21
3.4.3	Forces hydrodynamiques LOCKFILL	23
3.4.4	Comparaison des forces hydrodynamiques	28

4	Roselies - opérations de sasement	29
4.1	Introduction	29
4.2	Modélisation de l'écluse de Roselies	29
4.2.1	Conduites d'alimentation	30
4.2.2	Sas de l'écluse	31
4.3	Remplissage de l'écluse avec présence de bateau	31
4.3.1	Loi d'ouverture des vannes	32
4.3.2	Premier hydrogramme	32
4.3.3	Loi de perte de charge pour la vanne papillon	33
4.3.4	Etude de la sensibilité de l'ouverture de la vanne	35
4.3.5	Calcul de la pente d'eau longitudinale	36
4.4	Comparaison de la première simulation avec le programme LOCKFILL	37
4.4.1	Avant-propos	37
4.4.2	Equivalence du réseau d'alimentation	37
4.4.3	Equivalence de la loi de perte de charge de la vanne	38
4.4.4	Résultat de la simulation avec LOCKFILL	39
4.4.5	Influence des oscillation de la hauteur d'eau à l'entrée du sas de l'écluse	40
4.4.6	Calcul des forces sur le bateau	44
4.4.7	Etude de l'influence du placement des sorties des aque- ducs le long du sas de l'écluse	51
5	Essais sur le modèle réduit de Lanaye	55
5.1	Présentation du modèle réduit - perte de charge	55
5.2	Loi d'ouverture des vannes	56
5.3	Hydrogrammes et limnigrammes	57
5.4	Calcul des pentes d'eau dans le sas	59
5.5	Calcul des forces	61
5.5.1	Force longitudinale totale	61
5.5.2	Composante hydrostatique	63
5.5.3	Composante de décroissance d'impulsion	64
5.5.4	Composante de friction	65
5.5.5	Conclusion	67
6	Canal Bruxelles-Charleroi	68
6.1	Géométrie et système d'alimentation des écluses	69
6.2	Simulations	69
6.3	Lois d'ouverture des vannes	70
6.3.1	Coefficient de perte de charge	70
6.4	Résultats - arrêt d'ALFREDO	71

TABLE DES MATIÈRES

6.5	Etude de sensibilité aux paramètres d'entrée de la simulation .	72
6.5.1	Dimensions du bateau	72
6.5.2	Inclinaison de la poupe et de la proue du bateau	73
6.5.3	Nombre de cellules constituant le sas	74
6.5.4	Pas de temps de l'itération de la simulation	75
6.5.5	Equation de conservation de quantité de mouvement .	75
6.6	Nouveaux résultats - calcul de la pente d'eau dans le sas . . .	76
6.6.1	Pente du bateau dans le sas	79
7	Ecluse d'Ampsin-Neuville (Vb)	82
7.1	Données géométriques	82
7.2	Remplissage et pertes de charge	82
7.2.1	Hydrogrammes	84
7.2.2	Calcul des pentes	85
7.3	Modification de la géométrie des vanelles	88
7.3.1	Perte de charge	88
7.3.2	Hydrogrammes	89
7.3.3	calcul des pentes	90
7.3.4	Introduction d'un bateau dans les simulations - calcul des efforts sur le bateau	91
8	Conclusion	98
A	Modification du code d'ALFREDO	104
A.0.1	Modification du coefficient de Boussinesq	104
A.0.2	Lois de perte de charge	105
B	Coefficient de perte de charge vanne Hanrez 1B	106
C	Calcul du coefficient de Boussinesq	108
C.0.1	Répartition triangulaire de la vitesse	108
C.0.2	Répartition uniforme de la vitesse sur la moitié de la hauteur du sas	109
C.0.3	Conclusion	110
D	Ecoulement à travers les conduites d'alimentation	111
D.0.1	Ecoulements permanents	111
D.0.2	Ecoulements non-permanents : équation de conduite . .	112
D.1	Ecoulement dans le sas - Les équations de Saint-Venant . . .	113
D.1.1	Equation de continuité	113
D.1.2	Equation de quantité de mouvement	114
D.1.3	Expression sous forme vectorielle	116

TABLE DES MATIÈRES

D.1.4	Introduction du bateau dans le sas de l'écluse	116
E	Formule d'Euler	118
F	Plans des écluses et modèles réduits	120
F.1	Roselies : Plans du sas et de la vanne d'alimentation	121
F.2	Lanaye : Plans du modèle réduit	124
F.3	PLAN MARCHIENNE	125
F.4	PLAN GOSSELIES	126
G	Pertes de charges à introduire dans LOCKFILL	127
G.1	Perte de charge des alimentations de Roselies	127
G.2	Perte de charge des alimentations de Lanaye	128

0.1 Lexique

symbole	nom	unités
α	angle entre l'horizontale et le jet de remplissage	[°]
β	coefficient de Boussinesq	[-]
θ	angle d'inclinaison du bateau	[°]
ρ	masse volumique (de l'eau si non spécifiée)	[kg/m ³]
μ	coefficient de débit	[-]
ν	viscosité cinématique de l'eau	[m ² /s]
ζ	coefficient de perte de charge	[-]
a	accélération	[m/s ²]
b_k	largeur du sas de l'écluse	[m]
b_s	largeur du bateau	[m]
c_k	célérité de l'eau dans le sas	[m/s]
g	accélération gravitationnelle	[m/s ²]
h_k	hauteur d'eau dans le sas de l'écluse	[m]
h_{poupe}	hauteur d'eau à la poupe	[m]
h_{proue}	hauteur d'eau à la proue	[m]
h_s	hauteur d'eau au milieu de la coque	[m]
k_I	rugosité de Nikuradse du sas	[m]
k_{II}	rugosité de Nikuradse du bateau	[m]
l_k	longueur du sas de l'écluse	[m]
l_s	longueur du bateau	[m]
p	pression	[N/m ²]
t_s	enfoncement du bateau	[m]
v	vitesse de l'eau	[m/s]
x_b	position de la poupe par rapport à l'entrée du sas	[m]
x_s	décalage du bateau par rapport au centre du sas	[m]
A	aire	[m ²]
C_f	coefficient de friction	[-]
C_I	coefficient de Chézy	[-]
F_f/F_{fric}	force de friction	[N]
F_{hydro}/F_{hs}	force hydrostatique	[N]
$F_{hydrodyn.}$	force hydrodynamique	[N]
F_{impuls}	force due à la décroissance d'impulsion	[N]
F_{jet}	force due au jet de remplissage	[N]
F_{ltot}	force longitudinale totale	[N]
H	charge hydraulique	[m]
K	perte de charge totale	[m]
P	périmètre mouillé	[m]
Q	débit	[m ³ /s]
R	rayon hydraulique	[m]
S_w	pente de la ligne d'eau	[-]
V_m	vitesse moyenne de l'eau dans cellule du sas (ALFREDO)	[m/s]

Chapitre 1

Introduction

Présentant des atouts non négligeables d'un point de vue économique, écologique et logistique, le transport par voies navigables a toujours gardé une place de choix dans le monde des transports modernes. Il participe de facto à la globalisation grandissante du commerce mondial. On retrouve ainsi en Belgique près de 1500 km de voies navigables, dont près de 500 km se situent en Wallonie (SPF Mobilité et Transports, 2019)

Ces voies navigables wallonnes sont elles-mêmes reliées avec le réseau européen qui compte lui près de 40 000 km de voies, de quoi desservir de façon efficace l'ensemble du continent.



FIGURE 1.1 – Réseau de Transport Européen des voies navigables

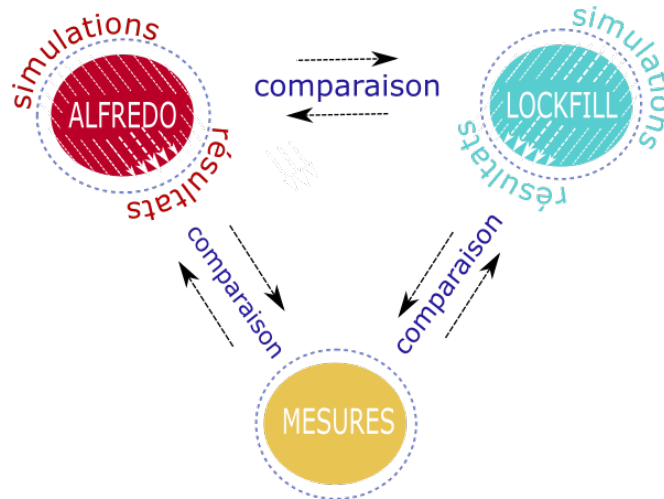
C'est dans ce contexte que depuis les années 60 des projets ont été établis à travers la wallonie pour augmenter la capacité d'accueil des axes de navigation les plus importants (SPW, 2019). Ils permettront à terme le passage

de bateaux aux tonnages bien plus élevés que ceux actuellement en circulation (de 1350 à 2000 tonnes, soit les classes IV et V de bateaux selon la classification **CEMT** qui sera définie plus loin). Une voie ayant la capacité d'accueillir des convois de classe IV intègre en effet "le réseau des transports européen par voie navigable " ou **RTE**.

Ces projets se traduisent concrètement en Wallonie par la construction de nouvelles écluses (éléments indispensables à la navigation sur cours d'eau) et le redimensionnement d'écluses existantes.

Or, pour le bon dimensionnement d'une écluse, plusieurs paramètres sont à prendre en compte (tels que les efforts s'exerçant sur le bateau, la pente d'eau à l'intérieur de l'écluse, etc). Un outil de modélisation numérique du nom de **ALFREDO**(Christiaens, 2015) ("Algorithme Figurant le Remplissage des Ecluses en vue de leur Dimensionnement Optimal") a dès lors été développé par des chercheurs de l'Université Catholique de Louvain en vue de calculer ces différents paramètres.

Le but principal du présent travail sera donc de valider les résultats des simulations données par ce modèle numérique ALFREDO en les confrontant aux mesures existantes d'opérations réalisées sur un ensemble d'écluses wallonnes (mesures provenant de campagnes réalisées sur le terrain , d'essais effectués en laboratoire ou encore d'études de dimensionnement).



Pour compléter cette comparaison, un autre programme, réalisant les mêmes opérations qu'ALFREDO et nommé **LOCKFILL** (Glerum et Vrijburcht, 2000) et (de Loor et al, 2013), logiciel en libre accès développé par

Deltares (institut néerlandais indépendant), sera également utilisé. Des situations identiques seront étudiées et portées à comparaison, dans le but de valider ou non le modèle d'ALFREDO, de relever également les points de convergences et divergences avec les résultats avancés par LOCKFILL

Une fois les deux programmes analysés et connaissant les points forts et faiblesses de chacun d'eux, une dernière analyse menée sur la nouvelle écluse d'Ampsin fera office de synthèse des résultats amenés tout au long de ce travail et proposera un ensemble d'éléments nouveaux pour le dimensionnement de l'ouvrage.

Chapitre 2

Aspects théoriques

2.1 Les écluses - présentation

Pour débiter ce travail, un rappel sur les points fondamentaux concernant les écluses et leur fonctionnement nous permettra d'aborder avec plus de compréhension les points d'analyse qui suivront. La plupart des concepts présentés sont tirés de Bousmar (2018).

2.1.1 Définition

Commençons par une définition précise de ce qu'est une écluse :

« Une écluse est un ouvrage d'art hydraulique permettant au bateau de passer le dénivelé existant entre deux plans d'eau du cours d'eau de niveaux différents »

Le fonctionnement de l'écluse est simple : un sas, situé entre le plan d'eau amont et le plan d'eau aval, se remplit (jusqu'au niveau de l'amont) ou se vide (jusqu'au niveau de l'aval) selon que le bateau doive respectivement monter ou descendre le dénivelé entre les plans d'eau.

Ces opérations de remplissage/ vidange (appelées "opérations de sassement) font l'objet d'une étude approfondie ayant pour objectif d'une part d'en limiter le temps pour garantir la fluidité du trafic, d'autre part de limiter les forces s'exerçant sur le bateau présent dans le sas et dont elles sont la cause directe. Nous reviendrons sur ces facteurs dans la suite de ce chapitre.

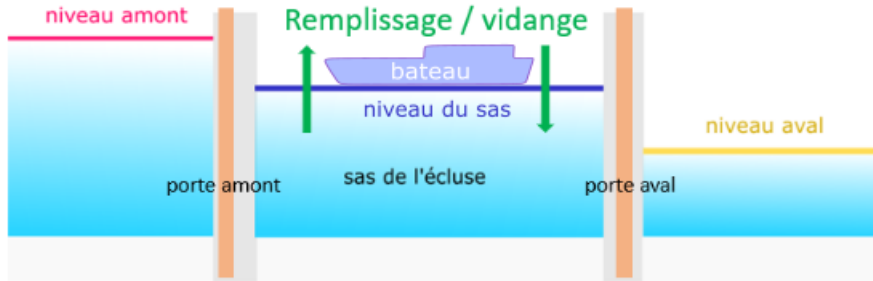


FIGURE 2.1 – schématisation des opérations de sasement

2.1.2 Géométrie de l'écluse

La connaissance de certains des éléments principaux constituant la géométrie d'une écluse sera importante pour la compréhension du présent travail. On retrouve ces éléments dans la vue en plan et la coupe présentée à la figure(2.2)

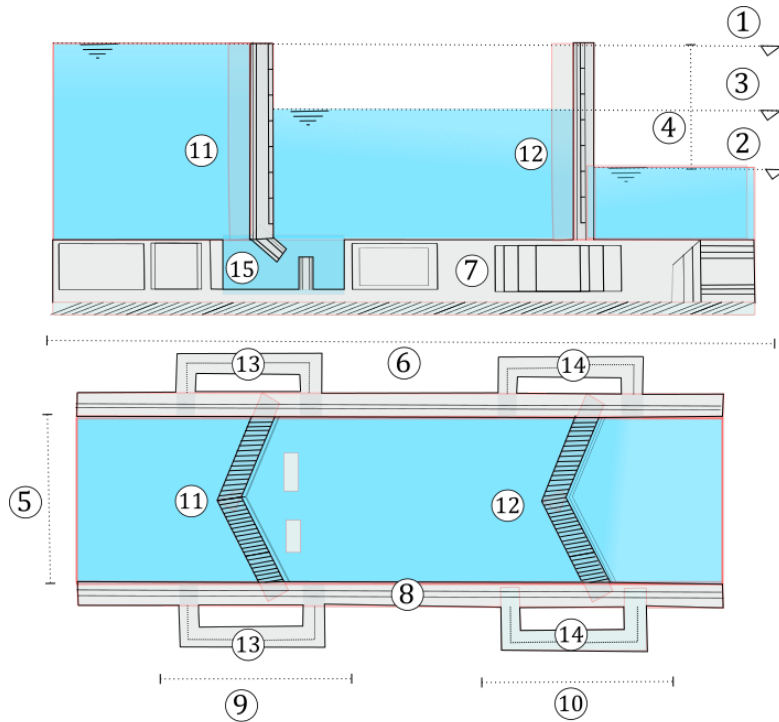


FIGURE 2.2 – Vue en plan et longitudinale d'une écluse

- | | |
|---------------------------------------|---|
| 1. niveau de flottaison du bief amont | 9. tête amont |
| 2. niveau de flottaison du bief aval | 10. tête aval |
| 3. niveau de flottaison dans le sas | 11. porte amont |
| 4. hauteur de chute | 12. porte aval |
| 5. largeur utile du sas | 13. système d'alimentation/ remplissage |
| 6. longueur utile du sas | 14. système d'alimentation/ vidange |
| 7. radier du sas | |
| 8. bajoyer | 15. chambre de dissipation |

2.1.3 Système de remplissage de l'écluse

Comme nous l'avons déjà mentionné, l'écluse fonctionne au travers du remplissage et de la vidange de son sas. Lors de ces opérations, des facteurs tels que la durée de sassement, les forces s'exerçant sur le bateau, la pente d'eau dans le sas ou encore les cavitations auprès des vannes devront être minimisés .

En tenant compte également de la hauteur de chute, on pourra définir un système de remplissage approprié à chaque cas étudié :

Alimentation par les têtes

L'alimentation par les têtes de l'écluse peut se faire :

- Par ouverture directe des portes de l'écluse : système utilisé uniquement pour une hauteur de chute plus petite que 3m.
- Par vanelles placées dans la porte sous le niveau de l'eau, si la hauteur de chute est inférieure à 5-6 m. Des barrières dissipatives d'énergie sont généralement placées pour dissiper l'énergie après les portes.

Alimentation par contournement des têtes

On peut utiliser de courts aqueducs pour contourner les portes de l'écluse généralement lorsque la hauteur de chute est inférieure à 10 m . Une chambre de dissipation peut être placée sous le radier amont pour dissiper l'énergie de l'eau lors de son entrée dans le sas. Ce système présente l'avantage de prendre peu de place dans le cas où le site de l'écluse n'en fournirait pas en suffisance pour un autre système d'alimentation plus encombrant.

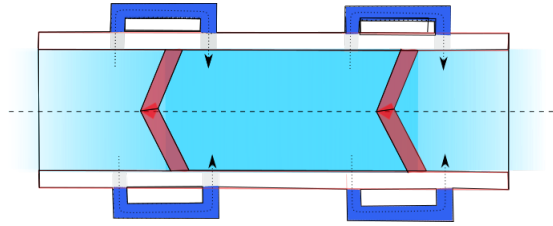


FIGURE 2.3 – système d'aqueducs de contournement des têtes

Alimentation par aqueducs longitudinaux (aqueducs larrons)

Pour des hauteurs de chute qui vont jusqu'à 35 mètres . Les conduites sont dans ce cas placées tel que le débit de sasement est identique à chaque endroit de la chambre de l'écluse (ce qui implique que les pertes de charges sont identiques à chaque sortie des conduites). Ce système permet un sasement rapide et une pente d'eau dans le sas assez faible, mais présente le désavantage d'être assez encombrant.

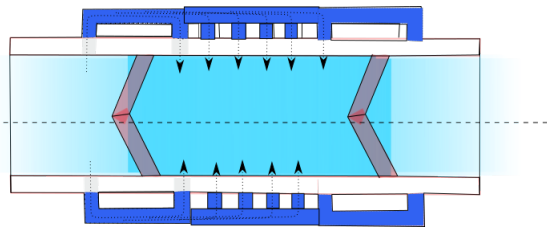


FIGURE 2.4 – système d'aqueducs larrons

2.1.4 Types de vannes

Les systèmes d'alimentation autres que l'ouverture directe des portes de l'écluse sont généralement régulés par des vannes, dont il existe une grande variété de formes et de systèmes d'ouverture différents. La loi caractérisant la relation entre le degré d'ouverture et le coefficient de perte de charge de la vanne influencera pour une grande part la valeur du débit entrant dans le sas de l'écluse.

On retrouve de manière non exhaustive :

- **La vanne papillon** : vanne de section circulaire qui adopte une ouverture complète après avoir effectué une rotation de 90° (soit $\frac{1}{4}$ de tour)
- **La vanne levante** : vanne simplement levée par translation verticale. Il en existe plusieurs types telles que la vanne levante simple, la vanne

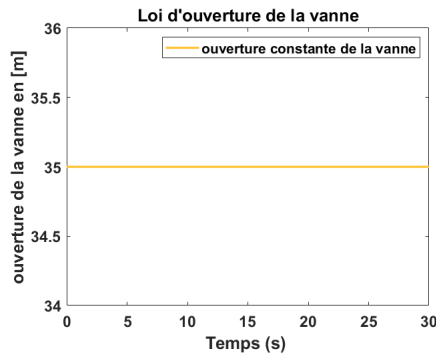
à jalousie (il s'agit d'une grille mobile placée sur un bâti fixe) ou encore la vanne cylindrique (qui fonctionne comme un bouchon de baignoire).

La vanne segment : elle a la forme d'un arc de cercle et est levée par rotation autour du centre de courbure de son arc.

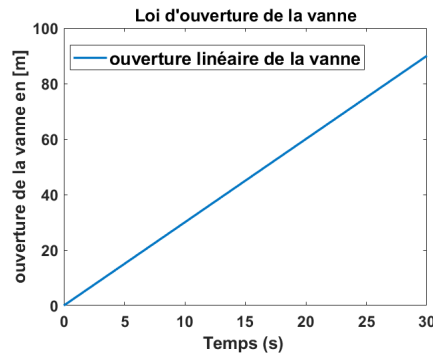
2.1.5 Lois de remplissage

Différentes lois d'ouverture des vannes en fonction du temps sont envisageable pour remplir le sas de l'écluse. Celles-ci conduiront bien entendu à un hydrogramme de remplissage différent. Soit Ω l'ouverture de la vanne, on retrouve comme loi de remplissage :

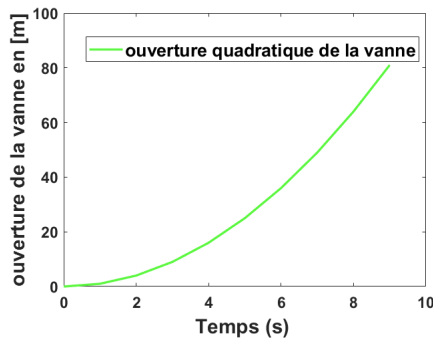
- Loi d'ouverture instantanée : $\Omega = \text{constante}$
- Loi d'ouverture linéaire : $\Omega = a.t$ où t est le temps et a une constante.
- Loi d'ouverture quadratique : $\Omega = a.t^2$
- Loi d'ouverture composée.



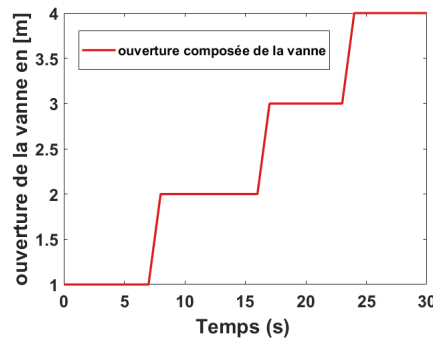
(a) loi d'ouverture instantanée



(b) loi d'ouverture linéaire



(c) loi d'ouverture quadratique



(d) loi d'ouverture composée

2.2 Critères d'acceptabilité

Plusieurs facteurs sont habituellement considérés dans le dimensionnement du système de sasement d'une écluse pour garantir un certain degré de sécurité et de confort au bateau amarré dans le sas ainsi que l'intégrité de l'infrastructure de l'écluse en elle-même. :

- **La durée de sasement** , elle doit être gardée dans des plages de valeurs qui garantissent une certaine fluidité du trafic fluvial.
- **La pente de l'eau dans le sas** , elle est généralement majorée à 1 ‰, Cette pente traduit un effort limite acceptable dans les amarres. Par sécurité, le critère de pente peut être diminué à 0.5 ‰, afin de tenir compte de la composante dynamique des efforts s'exerçant sur le bateau.
- **Les efforts subis par le convois durant le sasement** , Ils s'exercent longitudinalement et transversalement sur le convois et sont à minimiser.
- **Les ondes de sasement** générées par les débits prélevés dans le bief amont ou libérés dans le bief aval, leur amplitude doit être minimisée.
- **Le risque de cavitation au droit des vannes**. Une pression relative trop faible de l'eau au droit des vannes peut entraîner la formation de bulles de vapeur dommageable pour les vannes.
- **la vitesse d'écoulement dans les conduite**, qui est à limiter pour ne pas endommager le béton qui les constitue.

2.3 Classes de bateaux - gabarits CEMT

La Conférence Européenne des Ministres des Transports (CEMT) définit des classes de bateaux et voies navigables selon les dimensions de ces dernières.

les dimensions minimales des écluses sont donc également définies par la classe CEMT en fonction des bateaux qu'elles peuvent accueillir en leur sas.

Les différentes classes de bateaux sont reprises dans le tableau (2.1) (SPW, 2019).

classe CEMT	Longueur [m]	Largeur [m]	tirant d'eau [m]	tonnage [t]
classe I	38.50	5.05	1.80-2.20	250-400
classe II	50.00-55.00	6.60	2.50	400-650
classe III	67.00-80.00	8.20	2.50	650-1000
classe IV	80.00-85.00	9.50	2.50	1000-1500
classe Va	95.00-110.00	11.40	2.50-4.50	1500-3000
classe Vb	172.00-185.00	11.40	2.50-4.50	3200-6000
classe VIa	95.00-110.00	22.80	2.50-4.50	3200-6000
classe VIb	185.00-195.00	22.80	2.50-4.50	6400-12000

TABLE 2.1 – Classes de bateaux



FIGURE 2.6 – illustration d'un bateau de transport de marchandise

2.4 Forces s'exerçant sur un bateau lors des opérations de sasement d'une écluse

2.4.1 Contexte général

La littérature sépare généralement les origines des forces s'exerçant sur le bateau en deux groupes :

- Les forces résultant des opérations de sasement de l'écluse (remplissage et vidange).
- Les forces non liées à ces opérations de sasement (causes météorologiques, etc.)

La plupart des auteurs s'accordent pour dire que les effets dus au deuxième groupe sont négligeables lors des opérations de sasement, on peut ainsi se permettre de se concentrer uniquement sur les forces du premier groupe. On distinguera alors dans ce premier groupe :

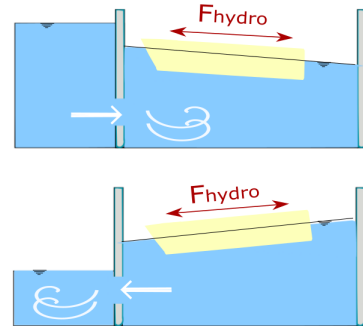
- **Les forces hydrodynamiques** : les opérations de sasements provoquent un mouvement de l'eau présente dans l'écluse qui va être à l'origine de ces forces sur le bateau.
- **Les forces hydrostatiques** qui sont calculées à partir de la différence de niveau d'eau entre la poupe et la proue du bateau.

Ces forces peuvent alors être décomposées en une composante longitudinale et une composante transversale. Seule la composante longitudinale sera étudiée dans le présent travail.

Une présentation générale de chacune de ces forces, telles que décrite par Beem et al.(2000) et Verelst et al.(2018) est effectuée dans la section qui suit. La description de l'implémentation de ces forces dans LOCKFILL et ALFREDO est ensuite présentée au chapitre suivant .

2.4.2 Forces hydrostatiques

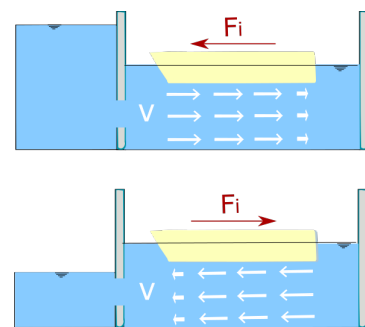
Il s'agit de l'ensemble des pressions hydrostatiques s'exerçant sur le bateau. On retrouve la pression sous la coque, mais aussi les effets de variations de débit à travers les portes de l'écluse, qui génèrent des ondes dans le sas. Ces ondes vont créer une différence de niveau d'eau entre la poupe et la proue qui génèrera une force oscillatoire sur le bateau.



2.4.3 Forces hydrodynamiques

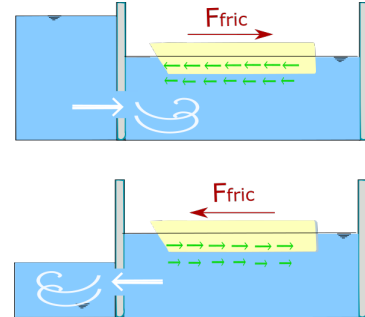
Différence d'impulsion

Le débit diminuant au fur et à mesure que l'on se situe loin de l'alimentation (en remplissage) ou du rejet d'eau (en vidange), il va y avoir une impulsion (produit de la masse d'eau et de sa vitesse) plus faible au bout du sas de l'écluse qu'au début de celui-ci. On retrouve donc une différence d'impulsion entre la poupe et la proue du bateau qui est à l'origine d'une force. Cette force dépendra dès lors de la vitesse relative du bateau par rapport à l'eau de l'écluse.



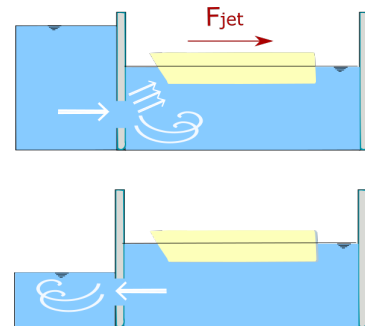
Force de friction :

Elle apparaît par frottement de l'eau entrant dans le sas de l'écluse avec les flancs du bateau et dépendra du coefficient de frottement de ce dernier. Sa valeur est généralement d'un ordre de grandeur plus faible que les autres composantes de la force longitudinale.



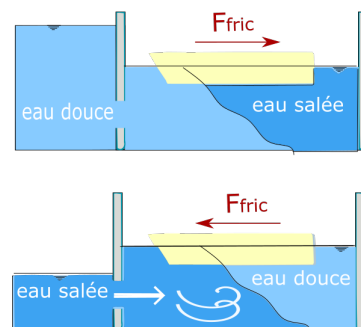
Effort dû au jet de remplissage :

Le jet de remplissage sortant des alimentations peut directement venir se heurter au bateau entraînant un effort longitudinal sur ce dernier. Cet effet sera plus important lors des opérations de remplissage, quand le bateau fait face aux ouvertures par lesquelles l'eau rentre que lors des opérations de vidange. Dans le cas de système de remplissage par aqueduc de contournement des têtes, cette composante sera négligable.



Effort dû à la différence de densité (présence d'eau douce et d'eau salée) :

Cette composante intervient dans le cas d'écluses maritimes mais n'est pas présente dans le cas des écluses de navigation intérieures aux terres (ce qui est le cas pour toutes les écluses étudiées dans le présent travail). Elle prend en compte la densité d'eau douce et celle d'eau salée. Elle sera positive ou négative selon la situation initiale de l'écluse.



Chapitre 3

Comparaison d'ALFREDO et de LOCKFILL

3.1 Présentation

Le programme **ALFREDO**, dont le nom provient de l'acronyme "Algorithme Figurant le Remplissage (ou vidange) d'une Écluse en vue de son Dimensionnement Optimal", est un logiciel codé en FORTRAN qui simule le remplissage et la vidange d'écluses par contournement des têtes ou par aqueducs larrons.

Il fait suite à plusieurs modélisations réalisées par l'unité de Génie Civil et Environnemental de l'UCL, suite à de nombreuses études et commandes de rapport du SPW sur des écluses wallonnes (Soares-Frazão, Christiaens et al., 2013).

Une première partie du code fut écrite par des chercheurs de l'UCL qui modélisait le remplissage de l'écluse sans présence d'un bateau. Une seconde partie fut ensuite ajoutée par Christiaens (2015), ajoutant la présence d'un convoi dans le sas et le calcul des nombreux paramètres l'accompagnant.

Quant à **LOCKFILL** (Glerum et Vrijburcht, 2000) et (de Loor et al, 2013)(entendre "LOCK-FILL" soit "remplir une écluse" en anglais), il s'agit d'un logiciel développé par Deltares, institut de recherche dans le domaine des eaux et des sous-sols basé aux Pays-Bas (villes de Delft et Utrecht). Deltares travaille dans le monde en collaboration avec des gouvernements, instituts de recherche et universités et propose une utilisation en libre accès de ces logiciels. Nous utiliserons donc ici la version 5.2 du logiciel, directement téléchargeable sur leur site¹.

1. <https://oss.deltares.nl>

3.2 Types de remplissage disponibles

Permettant tout deux de simuler les opérations de sasement avec présence d'un convoi dans le sas, les deux programmes se distinguent par le type de systèmes de remplissages qu'ils proposent à leur utilisateur.

ALFREDO permet, via deux codes distincts, de simuler les sasements au travers :

- d'**aqueducs de contournement des têtes**
- d'**aqueduc larrons longitudinaux**²

Nous pourrions également simuler un **remplissage directement à travers les portes** en utilisant des aqueducs de contournements des têtes dont la longueur sera réduite au minimum (en tenant compte de l'épaisseur de la porte).

LOCKFILL permet quant à lui de simuler des remplissages/vidanges à l'aide de système de sasement :

- d'**aqueducs de contournement des têtes**
- par **remplissage directement à travers les portes** et ce pour différentes sortes de porte (portes busquées, portes simples, portes levantes, etc)

Les simulations effectuées dans ce travail se porteront donc sur la comparaison de cas de remplissage par aqueducs de contournement des têtes et au travers des portes qui sont communs aux deux programmes.

3.3 Principe de la simulation

Pour chaque pas de temps " dt " des simulations, on distinguera deux étapes. Dans un premier temps le calcul du débit au travers des conduites d'alimentation. Dans un second temps l'évolution de la ligne d'eau dans le sas se remplissant/vidant. Les résultats de la deuxième parties servant de conditions initiales pour la première parties au temps " $t + dt$ ". La répétition de ces deux étapes s'effectuera pour chaque pas de temps " dt " allant du temps " $t = 0$ " au temps " t_{final} " défini par l'utilisateur (Christiaens, 2015).

2. Des problèmes de compilation de code nous ont empêché d'utiliser la partie sur les aqueducs longitudinaux, ce qui ne cause que partiellement problème car la majorité des cas étudiés dans le présent travail utiliseront un remplissage par contournement des têtes.

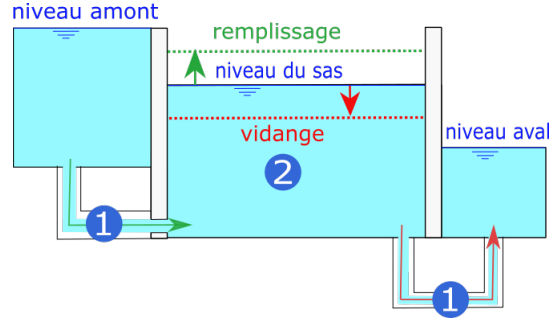


FIGURE 3.1 – Deux étapes des simulations de sasement

3.3.1 Débit au travers des réseaux de conduites

ALFREDO et LOCKFILL

A la fois ALFREDO et LOCKFILL utilisent l'équation de conduite (cfr ANNEXE D) pour simuler l'écoulement au travers des aqueducs de contournement des têtes.

$$\frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} = H_1 - H_2 - \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (3.1)$$

qui une fois discrétisée par pas de temps " dt " nous fournit le débit au temps " $t + dt$ " (avec $v = \frac{Q}{A}$)

$$Q_{t+\Delta t} = \frac{(H_1 - H_2) + \frac{L}{gA} \frac{Q_t}{\Delta t}}{\frac{L}{gA \Delta t} + \zeta \frac{Q_t}{2gA^2}} \quad (3.2)$$

La même équation est utilisée pour un remplissage au travers des portes mais dans le cas extrême où $L = 0$. On retrouve alors :

$$Q_{t+\Delta t} = \mu A \sqrt{2g \Delta H_t} \quad (3.3)$$

avec μ le coefficient de débit tel que

$$\mu = \frac{1}{\zeta^2} \quad (3.4)$$

3.3.2 Ecoulement à l'intérieur du sas de l'écluse

Une différence majeure existe par contre pour la modélisation de l'écoulement et de l'évolution de la ligne d'eau dans le sas.

ALFREDO

ALFREDO considère en effet une utilisation des équations de Saint-Venant en une dimension, pour des écoulements peu profonds. Ces équations introduiront dès lors une oscillation du plan d'eau au cours de l'opération de sassement, dont la pente évoluera au cours du temps.

Les équations peuvent se présenter sous la forme vectorielle reprise par l'équation (3.5) (cfr ANNEXE D) (Christiaens, 2015) :

$$\boxed{\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U)} \quad (3.5)$$

avec

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, F(U) = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A+gI_1} \end{pmatrix}, S(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{pmatrix} \quad (3.6)$$

Reprenant les équations de continuité et de conservation de la quantité de mouvement. ALFREDO considère en outre une loi de dissipation de quantité de mouvement par friction sur le radier du sas, à l'aide du coefficient de Manning.

LOCKFILL

A l'opposé de celà, LOCKFILL considère de manière simplifiée que la ligne d'eau du sas reste horizontale, le sas se remplissant comme un réservoir dont le niveau est donné par l'équation (3.7) dans le cas d'un remplissage (LOCKFILL, 2016) et par l'équation (3.8) dans le cas d'une vidange.

$$h_{t+\Delta t} = h_t + \frac{Q_t \Delta t}{A} \quad (3.7)$$

$$h_{t+\Delta t} = h_t - \frac{Q_t \Delta t}{A} \quad (3.8)$$

Equations pour lesquelles A est l'aire de surface du radier du sas. Aucune pente ne pourra être calculée directement à partir de l'évolution du plan d'eau dans le cas de LOCKFILL.

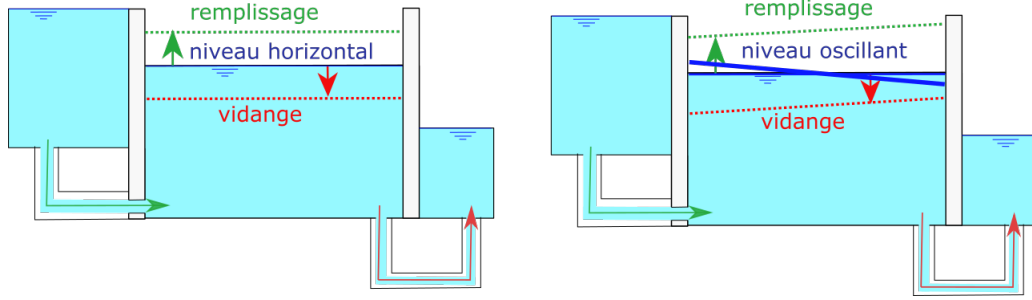


FIGURE 3.2 – réservoir (LOCKFILL) à gauche - Saint-Venant (ALFREDO) à droite

3.4 Implémentation des forces agissant sur le bateau

Dans cette section on traitera de la manière dont sont implémentées dans ALFREDO et LOCKFILL les forces présentées au point précédent. L'ensemble des développements pour les force d'ALFREDO proviennent de Christiaens et al.(2014) tandis que le développement pour LOCKFILL sont tirés de Vrijbrucht et al.(1988). Ces développements théoriques nous permettront par la suite de trouver une cause aux écarts rencontrés dans les résultats donnés par les deux programmes.

3.4.1 Force hydrostatique

Force hydrostatique ALFREDO

ALFREDO calcule les termes de pression hydrostatique s'exerçant sur la poupe, la proue et la coque du bateau. La force hydrostatique s'obtient alors en sommant les trois composantes (équation 3.13).

$$F_{hs.poupe} = \frac{1}{2} \rho g b_s h_{poupe}^2 \quad (3.9)$$

$$F_{hs.proue} = \frac{1}{2} \rho g b_s h_{proue}^2 \quad (3.10)$$

$$F_{hs.coque} = \int_{L_{coque}} \rho g b_s h_s \theta \, dx \quad (3.11)$$

où θ est l'angle d'inclinaison du bateau par rapport à l'horizontale et est ici utilisé pour prendre la composante longitudinale de cette force ($\sin(\theta) \approx \theta$ aux petits angles), b_s est la largeur du bateau, h_{proue}/h_{poupe} sont les hauteurs d'eau au niveau de la proue/poupe, h_s est l'enfoncement du bateau au milieu de la coque.

$$F_{hs.tot} = F_{hs.poupe} + F_{hs.coque} + F_{hs.proue} \quad (3.12)$$

$$F_{hs.tot} = \frac{1}{2}\rho g b_s h_{poupe}^2 + \int_{L_{coque}} \rho g b_s h_s \theta \, dx - \frac{1}{2}\rho g b_s h_{proue}^2 \quad (3.13)$$

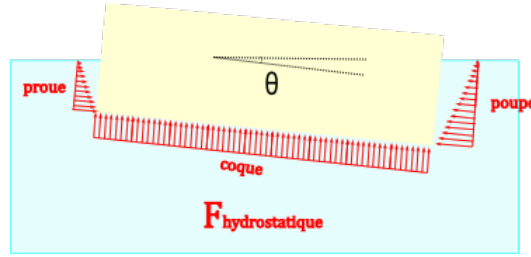


FIGURE 3.3 – force hydrostatique-ALFREDO

Pour l'évaluation de l'inclinaison du bateau dans le sas θ , une équation de tangage est introduite dans ALFREDO donnée par Natale et Savi (2000)

$$(1 + C_t)I \frac{\partial^2 \theta}{\partial t^2} + D_\theta \frac{\partial \theta}{\partial t} + k_\theta \theta = M(t) \quad (3.14)$$

Dans laquelle on retrouve, C_t le coefficient de moment ajouté, I le moment d'inertie du bateau, D_θ est un coefficient d'amortissement du tangage, k_θ un coefficient de raideur, $M(t)$ le moment du bateau au temps t .

Force hydrostatique LOCKFILL

LOCKFILL va calculer la différence de pression entre la proue et la coque du bateau par le terme suivant :

$$F_t = \rho_w g (h_{poupe} - h_{proue}) b_s t_s \quad (3.15)$$

où h_{poupe} et h_{proue} sont évalués par une résolution simplifiée des équations de Saint-Venant.

La force sur la coque est, quant à elle, calculée et projetée sur l'axe longitudinale par une évaluation de la pente d'eau S_w (on fait l'hypothèse que la pente du bateau vaut la pente de la ligne d'eau). Si h_k est la hauteur d'eau dans le sas de l'écluse, b_k la largeur du sas de l'écluse, on a alors :

$$S_w = \frac{dh_k}{dx} \quad (3.16)$$

soit η la hauteur de la vague dans le sas,

$$\eta = \frac{Q}{b_k c_k} \quad (3.17)$$

ou $c_k = \sqrt{g(h_k - h_s)} = \frac{dx}{dt}$ est la célérité de l'eau,

$$\frac{d\eta}{dt} = \frac{dQ}{dt} \frac{1}{b_k c_k} \quad (3.18)$$

On peut dès lors reformuler S_w , sachant que $\frac{dh_k}{dx} = \frac{d\eta}{dx}$

$$\frac{dh_k}{dx} = \frac{d\eta}{dt} \frac{dt}{dx} \quad (3.19)$$

$$= \frac{dQ}{dt} \frac{1}{b_k c_k^2} \quad (3.20)$$

$$= \frac{dQ}{dt} \frac{1}{b_k g (h_k - h_s)} \quad (3.21)$$

$$= \frac{dQ}{dt} \frac{1}{g (A_k - A_s)} \quad (3.22)$$

LOCKFILL implémente dès lors

$$F_p = \rho g t_s b_s l_s \frac{dQ}{dt} \frac{1}{g (A_k - A_s)} \frac{(l_k - x_s - l_s/2)}{l_k} \quad (3.23)$$

Expression dans laquelle on considère la décroissance linéaire du débit

$$Q(x = x_s/2) = Q \frac{(l_k - x_s - l_s/2)}{l_k} \quad (3.24)$$

Où nous retrouvons x_s qui est la position du centre du bateau par rapport au centre de l'écluse, l_k qui est la longueur du sas de l'écluse et l_s la longueur du bateau.

On associe finalement les deux expressions à l'aide d'un terme d'amortissement pour obtenir la force hydrostatique :

$$F_{hs} = F_t - (F_t - F_p)(1 - e^{-C_e \frac{t}{T_k}}) \quad (3.25)$$

ou C_e est un coefficient empirique et T_k est la période de réflexion de l'onde dans le sas

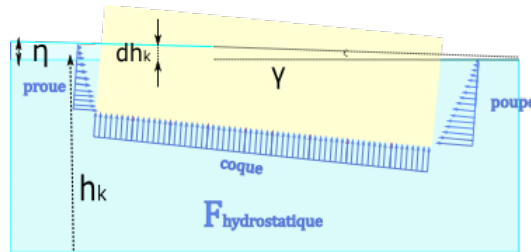


FIGURE 3.4 – force hydrostatique-LOCKFILL

Comparaison entre ALFREDO et LOCKFILL

On constate donc qu'ALFREDO et LOCKFILL calculent la force hydrostatique sur le bateau en évaluant tout deux les pressions hydrostatiques sur la poupe, la proue et la coque, mais une différence intervient dans le terme appliqué à la coque, lors de l'évaluation de l'inclinaison du bateau. LOCKFILL n'effectue pas de calcul direct du mouvement du bateau dans son modèle, il fait l'hypothèse que cette inclinaison vaut celle de l'inclinaison du plan d'eau qui est évaluée par le calcul de la hauteur d'onde dans le sas, avec prise en compte de l'amortissement de l'onde au cours du temps. ALFREDO lui, introduit une équation pour évaluer directement le tangage du bateau, et est donc en théorie plus proche de la réalité si cette évaluation est correcte. On notera finalement que LOCKFILL, pour évaluer la valeur du débit le long du sas, fait l'hypothèse que la décroissance de ce débit est linéaire. ALFREDO lui va résoudre les équations de Saint-Venant pour obtenir une valeur du débit dans chaque cellule de discrétisation constituant le sas de l'écluse.

Les simulations qui seront effectuées dans ce travail permettront ou non de mettre en lumière l'écart ainsi créé entre les deux forces.

3.4.2 Forces hydrodynamiques - ALFREDO

Composante de décroissance d'impulsion

La force due à la décroissance d'impulsion de l'eau (ou quantité de mouvement, produit de la masse de l'eau et de sa vitesse) est calculée par ALFREDO à l'aide de la formule d'Euler³(Christiaens et al 2014). Sur un volume de contrôle défini entre des interfaces 1 et 2 (voir figure 3.5), si ΣF_x est la somme des forces longitudinales s'appliquant sur le volume, on a :

$$\rho Q(V_2 - V_1) = \Sigma F_x \quad (3.26)$$

appliquée à la poupe/proue

$$\rho Q(V_2 - V_1)_{poupe/proue} = F_{hydrostatique} + F_{hydrodyn.poupe/proue} \quad (3.27)$$

$$\rho Q(V_2 - V_1)_{poupe/proue} = \rho g b_s \Delta(h_w^2)_{poupe/proue} + F_{hydrodyn.poupe/proue} \quad (3.28)$$

3. voir ANNEXE E sur la formule d'Euler

$$F_{hydrodyn.poupe/proue} = \rho Q(V_2 - V_1)_{poupe/proue} - \rho g b_s \Delta(h_w^2)_{poupe/proue} \quad (3.29)$$

La force de décroissance de quantité de mouvement est alors définie par ALFREDO comme la différence entre la force s'exerçant à la poupe et la force s'exerçant à la proue (équation 3.31).

$$F_{impuls} = F_{hydrodyn.proue} - F_{hydrodyn.poupe} \quad (3.30)$$

$$F_{impuls} = \Delta(\rho Q(V_2 - V_1))_{poupe-proue} - \rho g b_s \Delta(h_w^2)_{poupe-proue} \quad (3.31)$$

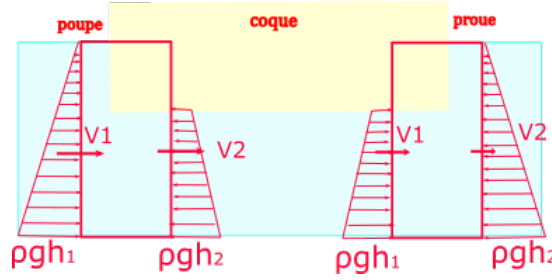


FIGURE 3.5 – volumes de contrôle ALFREDO

Composante de friction

La force de friction est donnée par l'expression suivante donnée par Stockstill (2003) :

$$F_f = \frac{1}{2} C_f \rho A_v V_m |V_m| \quad (3.32)$$

expression dans laquelle :

- ρ est la densité de l'eau à l'intérieur de l'écluse.
- V_m est la vitesse moyenne de l'eau sous la coque du bateau.
- A_v est l'aire mouillée moyenne de la coque du bateau.
- C_f est le coefficient de friction donné par

$$C_f = [1.55 - 0.105(\frac{h_{coque}}{h_s})][0.075(\log(\frac{V_m l_s}{\nu}))^2 + \Delta c_f] \quad (3.33)$$

où

- h_{coque} est la profondeur de l'eau sous la coque.
- ν est la viscosité cinématique de l'eau.
- Δc_f est la rugosité de la surface du bateau.

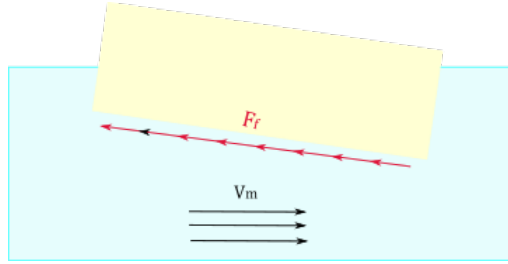


FIGURE 3.6 – composante de friction ALFREDO

Autres composantes

Il existe deux autres composantes hydrodynamiques de la force longitudinale s'appliquant sur le bateau qu'ALFREDO ne calcule pas :

- la composante due au jet de remplissage, qui est négligeable lors d'un remplissage par aqueducs de contournement des têtes.
- la composante due à la différence de densité eau salée/eau douce présente dans les écluses maritimes (les écluses wallonnes pour lesquelles ALFREDO a été implémenté se situent à l'intérieur des terres), nous ne nous préoccupons pas de cette composante dans le présent travail car elle ne concerne pas les écluses étudiées.

3.4.3 Forces hydrodynamiques LOCKFILL

Pour déduire ces composantes hydrodynamiques, LOCKFILL applique la formule d'Euler successivement sur trois volumes de contrôle, le premier placé à la poupe, le second englobant la coque et le troisième placé à la proue.

La force hydrodynamique totale s'exprime alors comme la somme des forces s'appliquant sur la poupe, la proue et la coque :

$$F_{hydrodyn.tot} = F_{poupe} + F_{coque} + F_{proue} \quad (3.34)$$

De cette force hydrodynamique totale sont ensuite déduites les composantes de décroissance de quantité de mouvement, de friction et de jet de remplissage, respectivement F_{impuls} , $F_{friction}$ et $F_{jet-de-remplissage}$.

Situation à la poupe

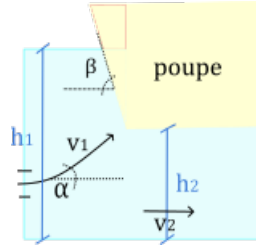


FIGURE 3.7 – géométrie de la poupe du bateau

Vrijburcht(1988) nous donne :

$$F_{poupe} = \frac{1}{2}\rho g(h_1 - h_2 + t_s)^2 b_s + C_1 C_2 \rho Q_1 v_1 \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta) \quad (3.35)$$

où :

- α est l'angle du jet de remplissage par apport à l'horizontal.
- β est l'angle d'inclinaison de la poupe par rapport à l'horizontal.
- C_1 est un coefficient de perte de charge du à l'écoulement de l'eau
- C_2 est un coefficient qui prend en compte le jet de remplissage se heurtant sur la poupe.

$h_1 - h_2$ est substitué par son expression isolée de l'équation d'Euler appliquée sur un volume de contrôle situé entre le point 1 et le point 2 (équation 3.37).

$$\frac{1}{2}\rho g h_1^2 b_k - (\frac{1}{2}\rho g h_2^2 b_k - \frac{1}{2}\rho g t_s^2 b_s) - F_{poupe} + \rho Q_1 v_1 \cos(\alpha) - \rho Q_1 v_2 = 0 \quad (3.36)$$

$$\Leftrightarrow (h_1 - h_2) = \frac{-Q_1 v_1 \cos(\alpha) + \frac{Q_1^2}{h_1 b_k - t_s b_s}}{g(b_k h_k - b_s t_s)} + \frac{C_1 C_2 Q_1 v_1 \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta)}{g(b_k h_k - b_s t_s)} \quad (3.37)$$

Situation à la coque

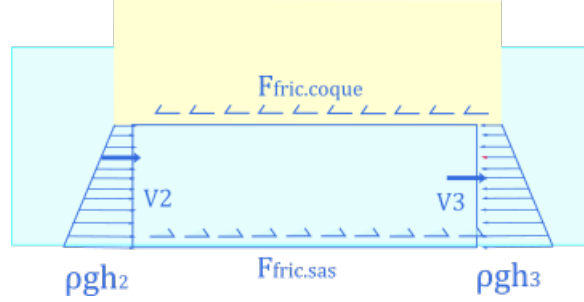


FIGURE 3.8 – géométrie de la coque du bateau

La force sur la coque se calcule via l'expression suivante :

$$F_{coque} = \rho g(h_2 - h_3)t_s b_s + F_{fric.coque} \quad (3.38)$$

où $h_2 - h_3$ est substitué par son expression isolée de l'équation d'Euler appliquée sur un volume de contrôle situé le long de la coque entre le point 2 et le point 3 (équation 3.40).

$$\frac{1}{2}\rho g h_2^2 b_k - \left(\frac{1}{2}\rho g t_s^2 b_k - \frac{1}{2}\rho g h_3^2 b_k\right) + \frac{1}{2}\rho g t_s^2 b_s - \rho g t_s l_s \frac{h_2 - h_3}{l_s} - F_{fric.coque} - F_{fric.sas} + \rho Q_2 v_2 - \rho Q_3 v_3 = 0 \quad (3.39)$$

$$\Leftrightarrow (h_2 - h_3) = \frac{-Q^2}{g(h_2 b_k - b_s t_s)^2} \frac{(2l_k - 2x_b - l_s)l_s}{l_k^2} + \frac{F_{fric.coque} + F_{fric.sas}}{\rho g(h_2 b_k - b_s t_s)} \quad (3.40)$$

Les forces de frictions vont être évaluées par les formules suivantes de Strickler et White-Colebrook :

$$F_{fric.sas} = \rho g \frac{V_m^2}{C_I^2 R_I} R_I P_I l_s \quad (3.41)$$

$$F_{fric.coque} = \rho g \frac{V_m^2}{C_I^2 R_I} R_{II} P_{II} l_s \left(\frac{k_{II}}{k_I} \right) \left(\frac{1}{4} \right) \quad (3.42)$$

— V_m est la vitesse moyenne de l'eau

$$V_m = \frac{Q}{h_k b_k - t_s b_s} \quad (3.43)$$

- $C_I = 18 \log(\frac{12 R_I}{k_I})$ avec R_I le rayon hydraulique est le coefficient de Chézy
- k_I est la rugosité au sens de Nikuradse du sas.
- k_{II} est la rugosité au sens de Nikuradse du bateau .

Situation à la proue

L'hypothèse est faite que $\Delta vitesse \approx 0$ donc négligeable dans le calcul, car la vitesse est faible loin dans le sas où se situe la proue. L'expression de la force sous

$$F_{proue} = \frac{1}{2} \rho g b_s t_s^2 \quad (3.44)$$

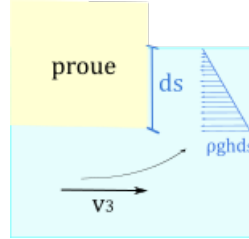


FIGURE 3.9 – géométrie de la proue du bateau

Déduction des forces hydrodynamiques pour LOCKFILL

La Force totale s'exerçant sur le bateau est alors calculée comme la somme des forces s'exerçant à la poupe, la coque et la proue :

$$F_{hydrodyn.tot} = F_{poupe} + F_{coque} + F_{proue} \quad (3.45)$$

qui après développement et simplification en faisant les hypothèses que $h_1 + h_2 \approx 2h_k$ et donc que $(h_1^2 - h_2^2) = (h_1 - h_2)(h_1 + h_2) = (h_1 - h_2)(2h_k)$ en prenant également en compte la linéarité du débit on obtient de Vrijbrucht(1988)

$$\begin{aligned}
 F_{hydrodyn.tot} = & \rho \left(\frac{t_s b_s}{h_k b_k - t_s b_s} \right) \left(-Q \frac{l_k - x_b}{l_k} v_1 \cos(\alpha) + \frac{Q^2}{h_k b_k - t_s b_s} \cdot \left(\frac{l_k - x_b - l_s}{l_k} \right)^2 \right) \\
 & + \rho \left(\frac{h_k b_k}{h_k b_k - t_s b_s} \right) \left(C_1 C_2 Q \frac{l_k - x_b}{l_k} v_1 \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta) \right) \\
 & + \left(\frac{t_s b_s}{h_k b_k - t_s b_s} \right) F_{fric.sas} \\
 & + \left(\frac{h_k b_k}{h_k b_k - t_s b_s} \right) F_{fric.coque}
 \end{aligned} \tag{3.46}$$

On peut séparer dans cette expression 3 composantes qui sont les 3 composantes hydrodynamiques calculées par LOCKFILL :

— La composante due à la décroissance de l'impulsion :

$$F_{impuls} = \rho \left(\frac{t_s b_s}{h_k b_k - t_s b_s} \right) \left(-Q \frac{l_k - x_b}{l_k} v_1 \cos(\alpha) + \frac{Q^2}{h_k b_k - t_s b_s} \cdot \left(\frac{l_k - x_b - l_s}{l_k} \right)^2 \right) \tag{3.47}$$

Qui se simplifie de la manière suivante si le jet de remplissage n'est pas pris en compte, c'est à dire $\cos(\alpha) = 1$ (ce qui sera toujours le cas lors des comparaisons avec ALFREDO par contournement des têtes) :

$$\boxed{F_{impuls} = Q|Q|\rho \left(\frac{t_s b_s}{h_k b_k - t_s b_s} \right) \left(\frac{(l_k - x_b)^2}{b_k h_k} + \frac{Q^2}{h_k b_k - t_s b_s} \cdot \left(\frac{l_k - x_b - l_s}{l_k} \right)^2 \right)} \tag{3.48}$$

— La composante due au jet de remplissage :

$$\boxed{F_{jet} = \rho \left(\frac{h_k b_k}{h_k b_k - t_s b_s} \right) \left(C_1 C_2 Q \frac{l_k - x_b}{l_k} v_1 \sin(\alpha + \beta) \sin(\beta) \right)} \tag{3.49}$$

— La composante due à la friction de l'eau sur le bateau

$$\boxed{F_{friction} = \left(\frac{t_s b_s}{h_k b_k - t_s b_s} \right) F_{fric.sas} + \left(\frac{h_k b_k}{h_k b_k - t_s b_s} \right) F_{fric.coque}} \tag{3.50}$$

3.4.4 Comparaison des forces hydrodynamiques

Trois points peuvent être mis en évidence et seront à retenir pour la suite du travail, après développement des forces hydrodynamiques implémentées par les deux programmes :

- La force due à la décroissance d'impulsion de l'eau est calculée à partir de la formule d'Euler définissant des volumes de contrôle à la poupe et la proue dans le cas d'ALFREDO tandis que LOCKFILL considère en plus un volume de contrôle pris à la coque. Il serait donc intéressant de vérifier l'influence de cette différence dans le choix des volumes de contrôles lors des simulations qui suivront.
- Les forces de friction sont évaluées par des formules différentes, les seuls paramètres sur lesquels nous pourrions influencer seront les rugosités du radier du sas et de la coque du bateau. Seule une comparaison des forces obtenues pour des rugosités équivalentes pour les deux programmes sera alors pertinente.
- LOCKFILL implémente une force due au jet de remplissage qu'ALFREDO ne calcule lui pas. Il faudra donc tenir compte de cette différence si une simulation est effectuée pour une écluse se remplissant directement au travers des portes (cas de l'écluse d'Ampsin, cfr chapitre 7), dans quel cas cette composante ne serait pas négligeable.

Chapitre 4

Roselies - opérations de sasement

4.1 Introduction

Une première série de simulations peut être réalisée en comparaison avec les mesures in-situ prises sur l'écluse de Roselies lors de campagnes de mesures effectuées entre 2009 et 2016 par le SPW (Savary et al., 2016). L'écluse de Roselies est située sur la Sambre dans la commune d'Aiseua-Presles. Il s'agit d'une écluse de classe Va alimentée par des aqueducs de contournement des têtes. Le jeu de mesures que nous possédons nous fournit les valeurs de débits, de hauteur d'eau de pente d'eau et d'inclinaison du bateau.

Pour cette première simulation, une attention particulière sera accordée à préciser chacun des paramètres introduits dans les différents programmes. Les équivalences à effectuer pour s'assurer que de même arguments en entrée sont utilisés pour tous les programmes seront également présentées et feront office de référence pour l'ensemble des prochaines simulations.

4.2 Modélisation de l'écluse de Roselies

Pour parvenir à simuler les différentes opérations de sasements effectuées à Roselies, une modélisation assez précise de l'écluse doit être pensée. Les plans de l'écluse (cfr ANNEXE F) permettront de représenter les deux parties qui serviront à la simulation, à savoir :

- Les conduites d'alimentation
- Le sas de l'écluse

4.2.1 Conduites d'alimentation

Dans le cas de l'écluse de Roselies, le réseau de conduite est composé d'aqueducs de contournement des têtes, modélisables par une succession d'éléments aux caractéristiques géométriques et hydrauliques bien spécifiques. Pour notre simulation, nous sélectionnerons ces éléments dans la large bibliothèque qu'ALFREDO propose à l'utilisateur. Le tableau (4.1) reprend le choix que nous avons effectué pour modéliser la conduite dans ALFREDO, avec les caractéristiques principales attribuées à chacune des pièces du réseau :

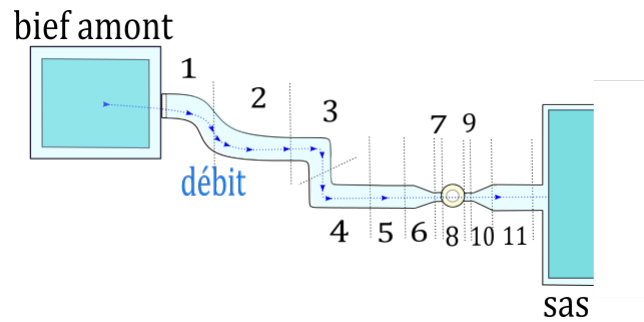


FIGURE 4.1 – modélisation de l'aqueduc de Roselies en 11 éléments

élément	rugosité relative	longueur [m]	section [m^2]
1. Entrée à bords arrondis	0,00104	/	5,76
2. conduite rectiligne (section carrée)	0,00104	2	5,76
3. coude concentrique	0,00104	/	5,76
4. coude concentrique	0,00104	/	5,76
5. conduite rectiligne (section carrée)	0,00104	2,2	5,76
6. diffuseur intermédiaire	0,00104	3	4,52
7. conduite rectiligne (section circulaire)	0,00104	2,55	4,52
8. vanne papillon	0,00104	/	4,52
9. conduite rectiligne (section circulaire)	0,00104	2,55	4,52
10. diffuseur intermédiaire	0,00104	2,1	4,52
11. conduite rectiligne (section rectangulaire)	0,00104	8	4,52
longueur totale		22,4 m	

TABLE 4.1 – ensemble des éléments modélisant l'alimentation de Roselies

4.2.2 Sas de l'écluse

Les dimensions du sas, sont de 112m pour la longueur et de 12,5m pour la largeur. Notons que, comme nous le verrons dans les sections suivantes, un bateau n'est pas toujours présent dans le sas.

4.3 Remplissage de l'écluse avec présence de bateau

La première simulation se base sur le remplissage de Roselies, en mode normal (aqueducs gauche et droit utilisés) avec la présence du bateau Cassidy (classe Va) à l'intérieur du sas. Les informations de base sont reprises dans le tableau '4.2)

mode de remplissage	normal
masse du bateau	1820 tonnes
classe du bateau	Va
longueur du bateau	108 m
largeur du bateau	9.55 m
position du bateau	centrée
hauteur d'eau initiale dans le sas	3.39 m
hauteur d'eau bief amont	6.9 m

TABLE 4.2 – Remplissage de l'écluse - Cassidy

4.3.1 Loi d'ouverture des vannes

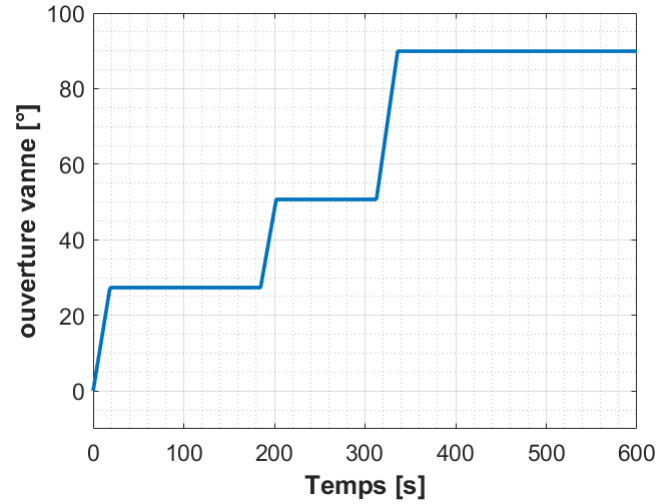


FIGURE 4.2 – Roselies loi d'ouverture de la vanne au passage de Cassidy

La loi d'ouverture des deux vannes papillons amonts est composée de trois paliers. L'allure de cette loi est reprise sur la figure 4.2, On y retrouve un premier palier à 27,3 °, un second à 50,7 ° et un dernier à 89,9 ° d'ouverture.

4.3.2 Premier hydrogramme

L'hydrogramme obtenu suite à cette première simulation est ici mis en comparaison avec les mesures prises sur le terrain lors du remplissage étudié, Nous remarquons une assez bonne concordance entre chacun des trois paliers, avec une légère surévaluation du débit par ALFREDO lors du 3e pic.

.	Q max [m^3/s]	Qmin [m^3/s]
ALFREDO	20.6	-3.8
Mesures in-situ	19.7	-3.9

TABLE 4.3 – Résultats du premier remplissage

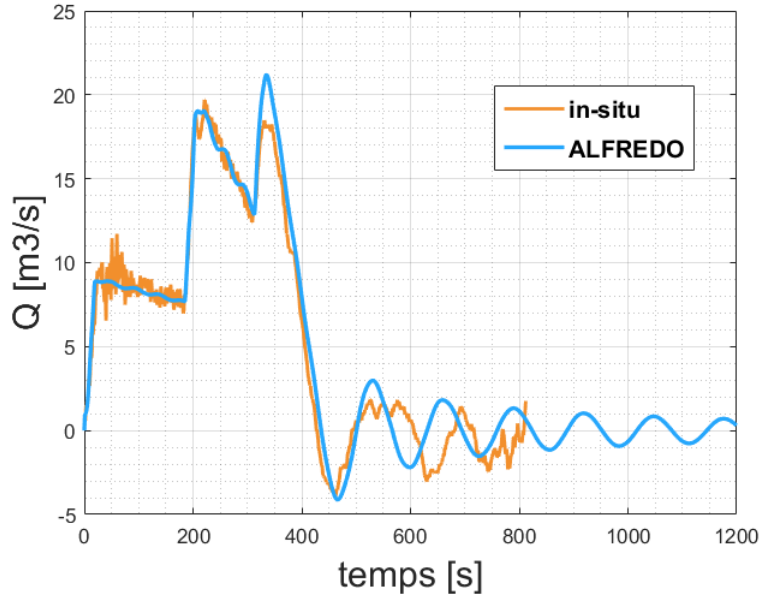


FIGURE 4.3 – Comparaison hydrogramme ALFREDO - mesures terrains

4.3.3 Loi de perte de charge pour la vanne papillon

Il est important d'implémenter la loi de perte de charge exacte qui régit le type de vanne présent à Roselies (vanne papillon Hanrez 1B basse pression). ALFREDO propose déjà ce type de vanne dans son catalogue mais une comparaison entre la valeur des pertes de charge implémentée et la valeur donnée par une fiche du constructeur (cfr ANNEXE B) nous montre qu'il existe une différence non négligeable pour les valeurs extrêmes des angles d'ouverture (figure 4.4).

Une nouvelle loi est donc implémentée dans ALFREDO pour traduire les pertes de charges telles que données par le constructeur de la vanne, nous assurant ainsi être au plus proche de la vanne réelle.

.	Q max [m^3/s]	Qmin [m^3/s]
ALFREDO	20.0	-3.8
Mesures in-situ	19.7	-3.9

TABLE 4.4 – Résultats avec loi de pertes de charge corrigée

L'hydrogramme obtenu (figure 4.5) concorde encore un peu plus avec les mesures in-situ, les premiers et troisième palliers se rapprochant un peu plus

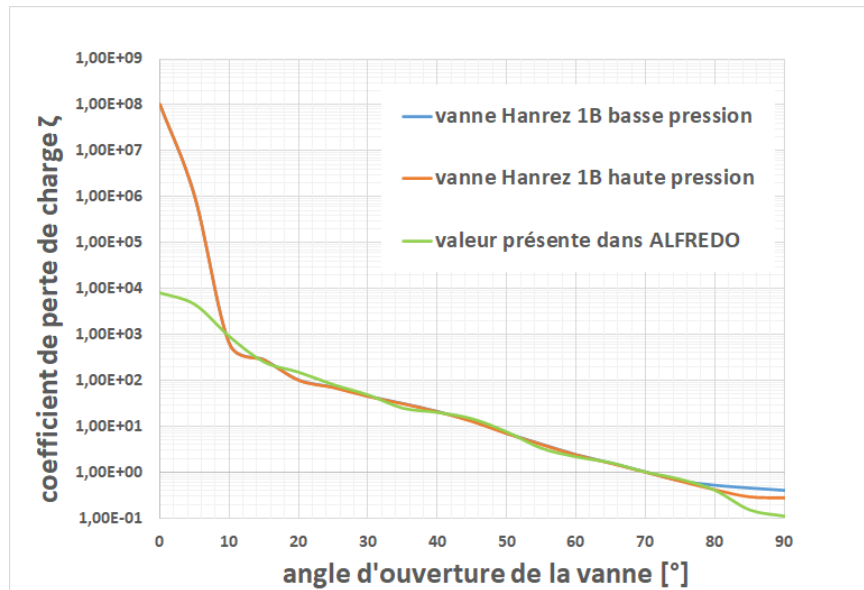


FIGURE 4.4 – lois de perte de charges de la vanne Hanrez

de la courbe de mesure (gain en précision de $1m^3/s$ soit à peu près 5%). Certaines différences subsistent cependant mais nous pouvons les attribuer aux imprécisions de la modélisation du système ainsi qu'aux imprécisions des instruments de mesures in-situ, comme montré dans la section suivante.

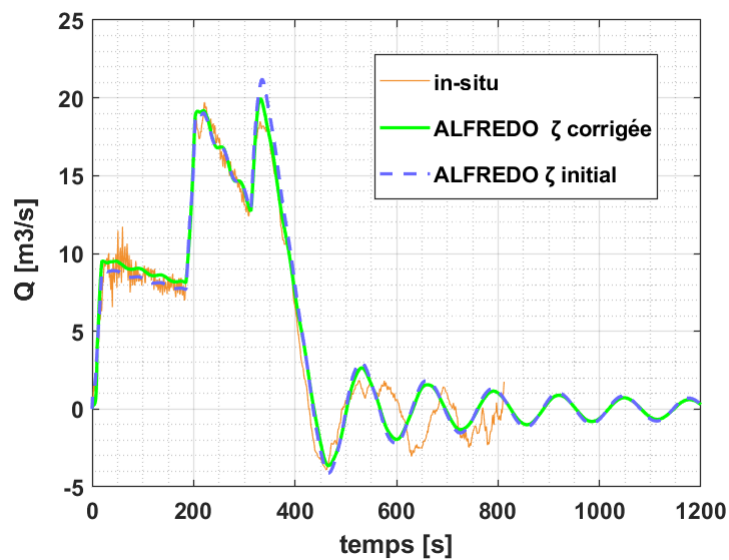


FIGURE 4.5 – hydrogramme avec loi de pertes de charge corrigée

4.3.4 Etude de la sensibilité de l'ouverture de la vanne

Il existe une incertitude assez grande sur la mesure terrain de l'angle d'ouverture des vannes, il est donc important de vérifier quelle sensibilité possède l'hydrogramme d'ALFREDO à une petite variation d'angle d'ouverture des vannes dans la loi introduite en input : si on applique un $\delta +3^\circ$ et un $\delta -3^\circ$ à l'ouverture des vannes nous obtenons les résultats repris au tableau 4.5.

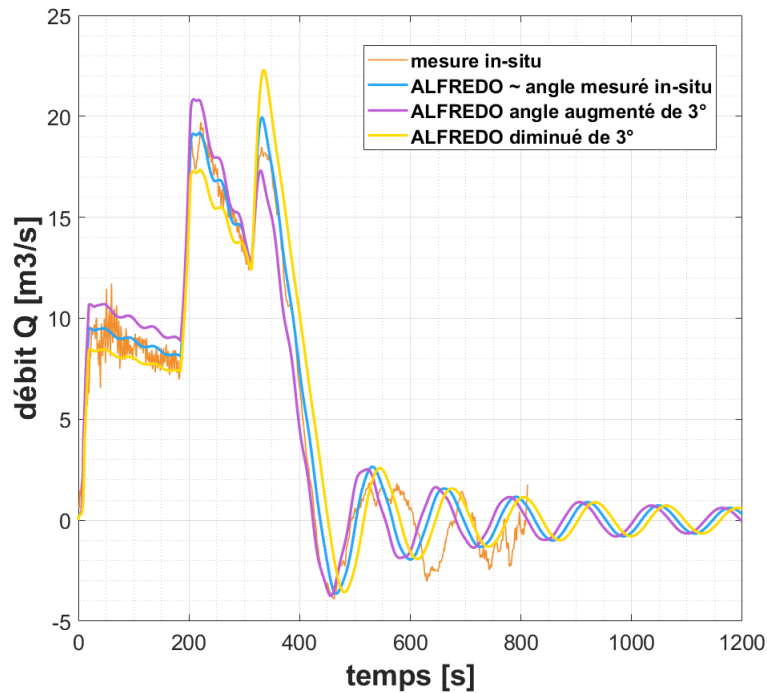


FIGURE 4.6 – Hydrogramme - sensibilité à l'ouverture de la vanne

angle mesuré :	Q max [m^3/s]	Qmin [m^3/s]
angle mesuré in-situ	20.04	9.66
angle $+3^\circ$	20.95	9.3
angle -3°	22.30	8.2

TABLE 4.5 – débits pour angles d'ouverture soumis à un delta d'ouverture

La variation de débit qui en résulte couvre suffisamment la différence de débit entre ALFREDO et les mesures terrains pour que l'on puisse imputer cette différence en partie aux imprécisions de la mesure d'angle d'ouverture.

Pour le reste, les défauts inhérents à une modélisation de l'aqueduc d'alimentation (donc une simplification de ce dernier par rapport à la réalité) apporte également leur lot d'imprécisions sur le calcul du débit total.

4.3.5 Calcul de la pente d'eau longitudinale

Pour effectuer un calcul de la pente comparable aux données terrain, nous devons utiliser les résultats de hauteur d'eau donnés par ALFREDO aux abscisses où se situent les prises de mesures du niveau d'eau dans la réalité. Savary et al. (2016) nous fournit les positions de ces capteurs, le calcul est ensuite effectué comme dans le post-traitement des mesures terrain (créer une droite d'interpolation par la technique des moindres carrés, entre les niveaux d'eau mesurés, la pente d'eau étant égale à la pente de la droite obtenue).

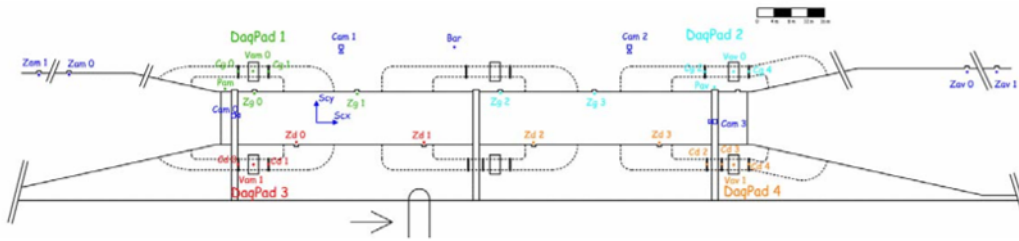


FIGURE 4.7 – capteurs de mesure de niveau d'eau positionnés tous les 10m le long du sas - plan tiré du rapport sur Roselies

Nous observons (figure 4.8) que la pente d'ALFREDO est évaluée jusqu'à deux fois celle mesurée in-situ, les fréquences d'ondes sont quant à elles assez proches.

	ALFREDO	mesures in-situ
pente max [pm]	2.4	1.04
pente min [pm]	-2.2	- 1.2
période [s]	57	63
fréquence [Hz]	0.0175	0.0159

TABLE 4.6 – résultats du calcul de pente (ALFREDO) mis en comparaison avec les valeurs mesurées in-situ

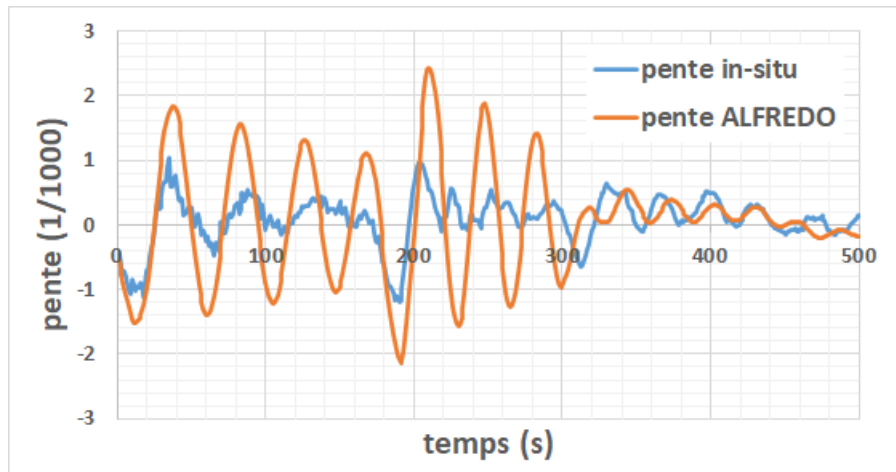


FIGURE 4.8 – pente calculée par ALFREDO et pente mesurée sur terrain

4.4 Comparaison de la première simulation avec le programme LOCKFILL

4.4.1 Avant-propos

Pour être certain d'utiliser les deux programmes sur deux cas parfaitement comparables, il faut s'assurer que les données initiales introduites sont identiques pour les deux programmes. Ce qui n'est pas évident dans un premier temps étant donnés certaines contraintes qu'imposent chacun des programmes. Nous développerons donc chacune des équivalences effectuées avant de présenter les résultats des comparaisons.

4.4.2 Equivalence du réseau d'alimentation

Pour modéliser son aqueduc de contournement des têtes, LOCKFILL propose d'introduire :

1. la longueur de l'aqueduc.
2. le coefficient de perte de charge de l'ensemble de l'aqueduc (séparément du coefficient de perte de charge de la vanne).

ALFREDO lui, comme présenté dans la section précédente, décompose son aqueduc en une suite d'éléments pour lesquels sont introduites leur caractéristiques géométriques. ALFREDO calcule ensuite lui-même pour chaque élément et à chaque pas de temps de la simulation, la perte de charge se rapportant à cet élément.

En partant de l'équation de conduite (somme sur i éléments du réseau de conduite) :

$$\Delta H = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\zeta_i Q^2}{2g A_i^2} + \frac{L_i}{g A_i} \frac{dQ}{dt} \right) \quad (4.1)$$

Si l'on veut obtenir l'équivalence $Q_{ALFREDO} = Q_{LOCKFILL}$ pour un même ΔH introduit dans les deux programmes, on trouve les expressions du coefficient de perte de charge et de la longueur équivalente à introduire dans LOCKFILL :

$$\zeta_{Lockfill} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{\zeta_i}{A_i^2} \right) A_{Lockfill}^2 \quad (4.2)$$

$$L_{Lockfill} = \sum_{i=0}^n \left(\frac{L_i}{A_i} \right) A_{Lockfill} \quad (4.3)$$

Après calcul (cfr ANNEXE G.1), on obtient les valeurs suivantes :

$\zeta_{Lockfill}$	2.51
$L_{Lockfill}$	21.5 m

4.4.3 Equivalence de la loi de perte de charge de la vanne

Il faut traduire la loi de perte de charge de la vanne insérée dans ALFREDO pour compléter l'équivalence. LOCKFILL ne permet pas d'utiliser des vannes papillons avec un aqueduc d'alimentation contournant les têtes, la vanne utilisée est une vanne levante pour laquelle on introduit :

- une vitesse d'ouverture en fonction du temps
- une loi de perte de charge en fonction de la hauteur relative.

Pour obtenir la loi de vitesse d'ouverture de la vanne levante de LOCKFILL, on calcule comme suit la hauteur ouverte équivalente de la vanne glissante sur les intervalles de temps d'ouvertures, que l'on traduit ensuite en vitesse (équation 4.4).

$$h_{ouverte.levante} = \frac{angle_{papillon} \times h_{tot.glissante}}{90^\circ} \quad (4.4)$$

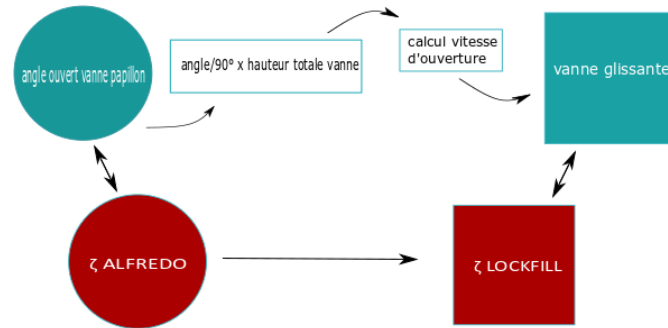


FIGURE 4.9 – équivalence vanne ALFREDO- vanne LOCKFILL

La loi de perte de charge est elle obtenue en reprenant cette équivalence angle ouvert/hauteur ouverte et en lui associant les pertes de charges de la loi implémentée dans ALFREDO.

4.4.4 Résultat de la simulation avec LOCKFILL

L'hydrogramme obtenu est mis en comparaison avec celui donné par ALFREDO à la figure (4.10).

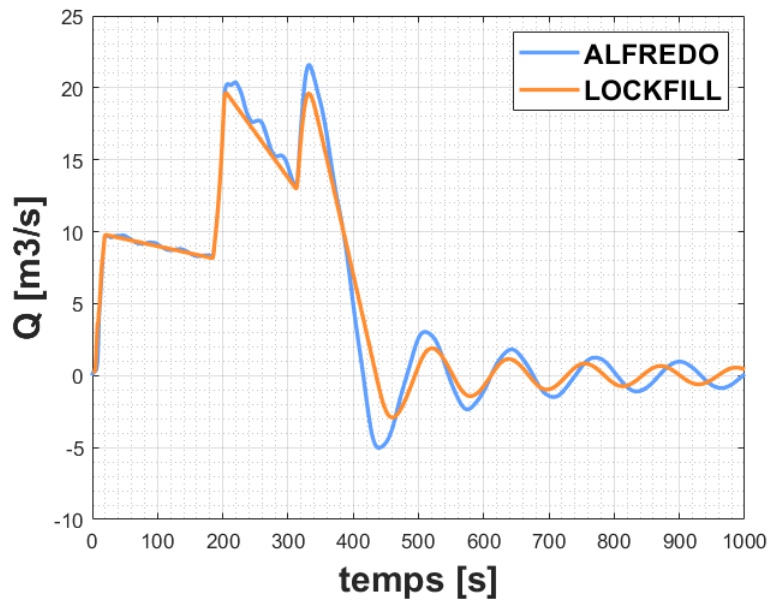


FIGURE 4.10 – hydrogrammes ALFREDO-LOCKFILL

	Q max [m^3/s]	Qmin [m^3/s]
ALFREDO	22	-4.7
LOCKFILL	19.5	-2.5

TABLE 4.7 – Résultats débits ALFREDO - LOCKFILL

Nous observons que les deux premiers pics de débit sont identiques, cependant le troisième pic est plus élevé avec ALFREDO qu'avec LOCKFILL. Il convient de se demander pourquoi, car les deux programmes utilisant la même équation de conduite, des entrées identiques devraient conduire à des sorties identiques. La section suivante tente de donner une explication à cette hausse de débit.

4.4.5 Influence des oscillation de la hauteur d'eau à l'entrée du sas de l'écluse

Comme énoncé précédemment, ALFREDO calcule l'oscillation de la ligne d'eau dans le sas (utilisation de l'équation de Saint-Venant 1D) contrairement à LOCKFILL qui ne calcule qu'une ligne d'eau moyenne et constante sur toute la longueur de l'écluse. Le calcul du débit dans ALFREDO se fait en utilisant le niveau d'eau à l'entrée du sas.

En outre, l'équation de Bernoulli relie le débit à la différence de hauteur d'eau à l'entrée du sas et hauteur d'eau du bief amont. Nous pouvons dès lors comprendre que plus la ligne d'eau du sas se rapproche du bief amont, plus l'oscillation de cette ligne va jouer un rôle significatif dans la valeur de la différence entre les deux hauteurs d'eau, donc dans la valeur du débit.

On remarque en effet sur l'hydrogramme présenté à la figure (4.10) que le premier pallier présente une légère oscillation de débit. En effet, l'oscillation δ de la ligne d'eau (figure 4.12) a peu d'impact sur la différence totale de niveau d'eau ΔH . Au deuxième pallier cette oscillation prend plus d'importance (la différence de niveau d'eau est intermédiaire) et son influence finit par être significative lors du dernier pallier.

Nous allons donc observer le ΔH de la hauteur d'eau à l'entrée du sas (celui qu'ALFREDO utilise pour son calcul de débit, $\Delta H_{oscillation_ALFREDO}$) et le ΔH fournit par le niveau moyen calculé dans le sas d'ALFREDO ($\Delta H_{moyen_ALFREDO}$).

Il faut maintenant vérifier que l'apport de débit amené par $\delta_{oscillation}$ vaut bien la différence de débit entre ALFREDO et LOCKFILL.

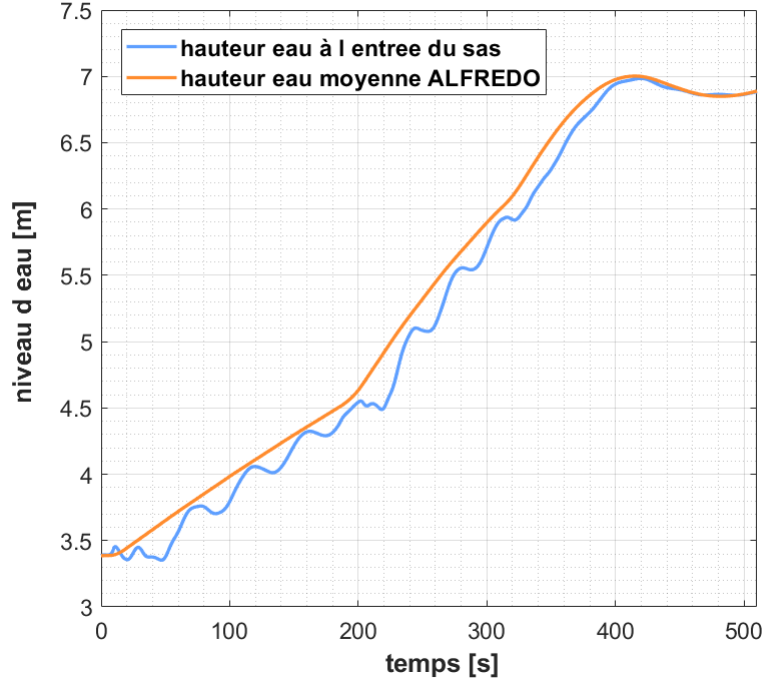


FIGURE 4.11 – hauteur d'eau à l'entrée et hauteur d'eau moyenne donnée par ALFREDO

soit :

$$\Delta H_{oscillation_{ALFREDO}} = \Delta H_{moyen_{ALFREDO}} + \delta_{oscillation} \quad (4.5)$$

$$\delta_{oscillation} = \Delta H_{oscillation_{ALFREDO}} - \Delta H_{moyen_{ALFREDO}} \quad (4.6)$$

si on repart de l'équation de conduite :

$$\Delta H = \frac{\zeta v^2}{2g} + \frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} \quad (4.7)$$

On néglige le terme d'inertie, on obtient alors :

$$\Delta H = \frac{\zeta v^2}{2g} \quad (4.8)$$

$$\Delta H = \frac{\zeta Q^2}{2gA^2} \quad (car \ v = \frac{Q}{A}) \quad (4.9)$$

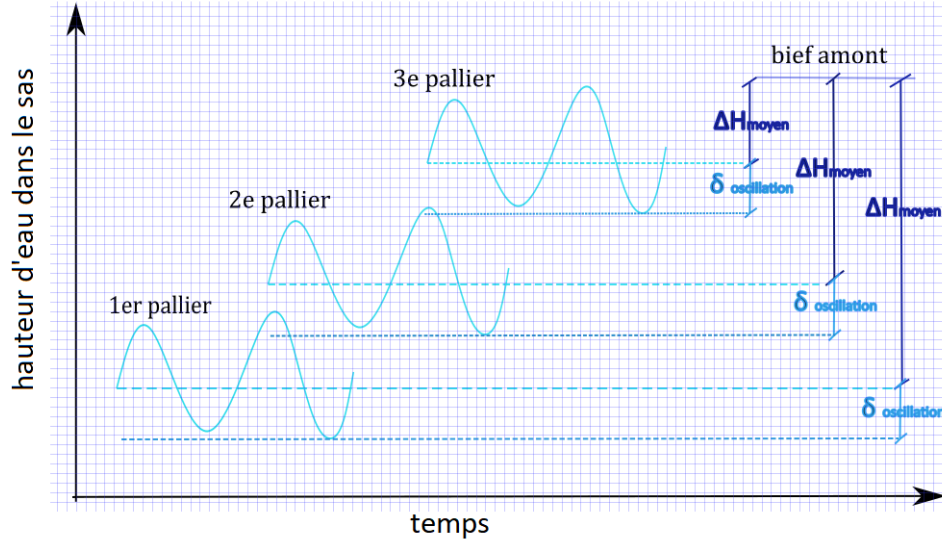


FIGURE 4.12 – évolution de l'importance du $\delta_{oscillation}$ au fur et à mesure du remplissage

$$Q = A \sqrt{2g \frac{\Delta H}{\zeta}} \quad (4.10)$$

soit $x = \Delta H$, $dx = \delta_{oscillation}$ et $Q = f(x)$ pour voir l'apport du débit dQ amené par $\delta_{oscillation}$, on calcule la différentielle $df(x)$

$$df(x) = \frac{df(x)}{dx} dx \quad (4.11)$$

on a donc

$$f(x) = A \sqrt{2g \frac{x}{\zeta}} \quad (4.12)$$

sa dérivée

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{g}{\zeta} \frac{A}{\sqrt{2g \frac{x}{\zeta}}} \quad (4.13)$$

on peut dès lors obtenir

$$dQ = df = \frac{g}{\zeta} \frac{A}{\sqrt{2g \frac{x}{\zeta}}} . dx \quad (4.14)$$

En comparant ce dQ avec la différence de débit existant entre le débit donné par ALFREDO et celui donné par LOCKFILL $\Delta debit$ on obtient, pour l'ouverture de vanne par paliers présentée précédemment la figure 4.13.

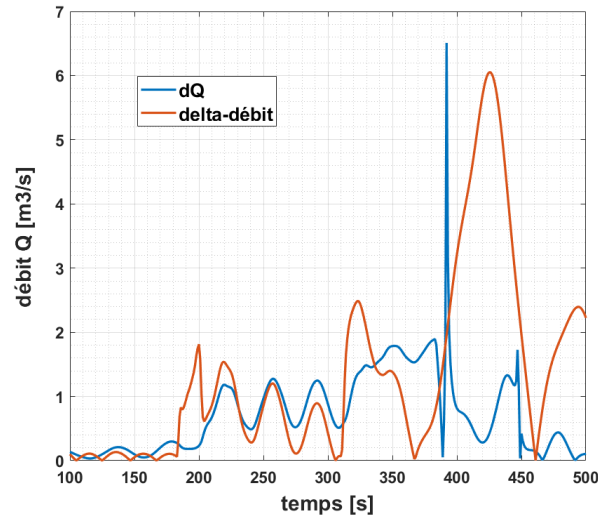


FIGURE 4.13 – dQ - $\Delta debit$, ouverture par paliers

On effectue la même analyse pour une ouverture de vanne linéaire (figure 4.14) pour confirmer l'hypothèse avancée.

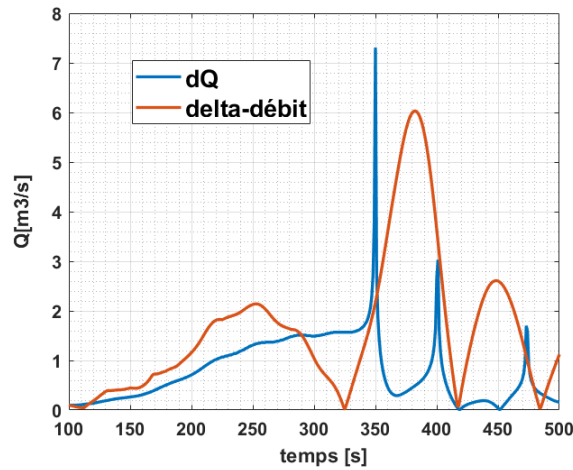


FIGURE 4.14 – dQ - $\Delta debit$, ouverture linéaire

Nous observons dès lors que dQ et $\Delta debit$ sont du même ordre de grandeur pour chaque palier et oscillent de manière assez concordante, ce qui confirme

notre hypothèse que la différence de débit entre ALFREDO et LOCKFILL est bien due aux oscillations du niveau d'eau dans le sas.

4.4.6 Calcul des forces sur le bateau

Pour effectuer un calcul des forces¹ s'exerçant sur le bateau comparable entre les deux programmes, on impose à ALFREDO l'hydrogramme donné par LOCKFILL pour cette simulation. En effet, ALFREDO permet d'introduire directement un doublet [temps, débit] à partir duquel il effectuera le reste de la simulation.

Nous allons dans un premier temps nous intéresser à la force longitudinale totale calculée par chacun des deux programmes (figure 4.15).

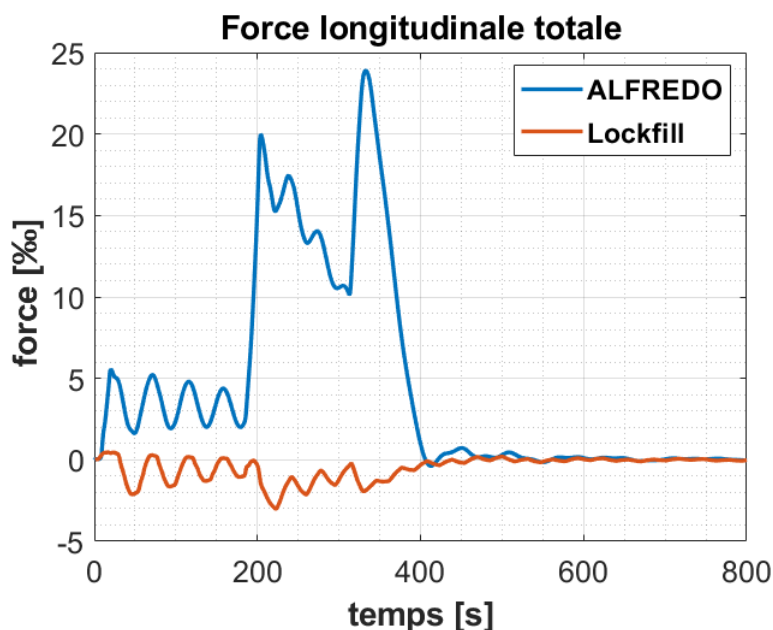
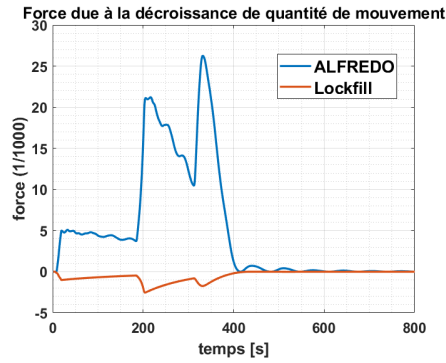


FIGURE 4.15 – force longitudinale totale

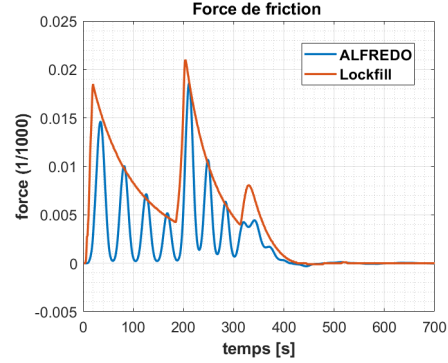
ALFREDO semble surévaluer la force longitudinale, nous observons en outre une forte divergence entre les résultats donnés par les deux programmes. En portant notre analyse sur chacune des composantes de la force totale calculée, nous pourrions peut-être expliquer d'où provient l'écart entre les deux résultats.

1. Les forces sont exprimées en % du poids du bateau, en effet les critères de limitation de force sont donnés également sous cette expression, 1 % étant généralement une limite à ne pas dépasser.

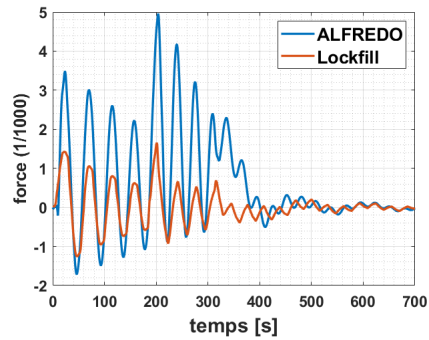
Les composantes hydrostatiques, de frictions et de décroissance d'impulsion sont reprises au tableau (4.8) et à la figure (4.16).



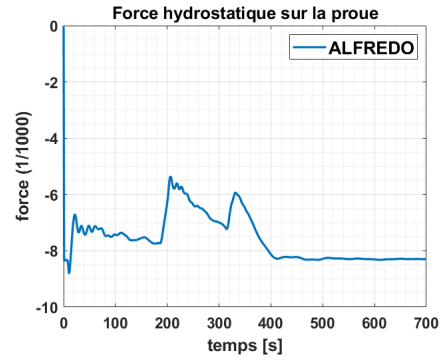
(a) composante d'impulsion



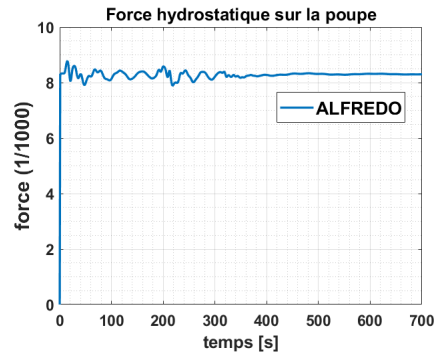
(b) composante de friction



(c) composante hydrostatique totale proue



(d) composante hydrostatique sur la



(e) composante hydrostatique sur la poupe

FIGURE 4.16 – Composantes de la force longitudinale

Les différents graphes nous montrent que les composantes de friction et hydrostatique principale sont d'un même ordre de grandeur pour les deux

Composante	Grandeur	ALFREDO	LOCKFILL
$F_{l_{tot}}$	fréq. [Hz]	0.0215	0.0183
	max [‰]	23.75	0
	min [‰]	0	-2.9
$F_{impulsion}$	fréq. [Hz]	-	-
	max [‰]	27	0
	min [‰]	0	-2.4
$F_{friction}$	fréq. [Hz]	-	-
	max [‰]	0.0215	0.0185
	min [‰]	0	0
F_{hydro}	fréq. [Hz]	0.019	0.0167
	max [‰]	5	1.6
	min [‰]	-1.6	-1.2
$F_{hydro-proue}$	fréq. [Hz]	0.0215	/
	min [kN]	-8.8	/
$F_{l_{hydro-poupe}}$	fréq. [Hz]	0.0227	/
	max [‰]	8.8	/

TABLE 4.8 – Forces calculées par ALFREDO et LOCKFILL

programmes.

L'écart significatif entre les deux forces totales provient comme on peut le constater à la figure (4.16) de la composante d'impulsion, ALFREDO estime pour celle-ci une valeur près de 10 fois supérieur en valeur absolue à celle de LOCKFILL.

Nous allons donc nous concentrer sur l'étude de cette composante :

- Comme énoncé précédemment, (cfr chapitre 3.4) ALFREDO et LOCKFILL n'utilisent pas le même volume de contrôle pour le calcul des forces hydrodynamiques sur le bateau et donc pour la composante de décroissance d'impulsion. LOCKFILL définit 3 volumes de contrôle couvrant la poupe, la coque et la proue du bateau, alors qu'ALFREDO ne considère que la poupe et la proue.

Ceci rajoute à LOCKFILL une composante de force due à la différence de pression hydrostatique sur la coque formulée comme suit :

$$F_{coque} = \left[\frac{1}{2} \rho g (h_{proue} - h_{poupe}) t_s b_s \right] \frac{1000}{m_s g} \quad (4.15)$$

- h_{proue} est la hauteur d'eau au niveau de la proue
- h_{poupe} est la hauteur d'eau au niveau de la poupe

- t_s est l'enfoncement du bateau
- b_s est la largeur du bateau
- m_s est la masse du bateau

Si on calcule directement (à partir des fichiers résultats d'ALFREDO) la valeur de la force que cette composante de coque ajouterait à la force totale d'ALFREDO et qu'on trace cette valeur en fonction du temps, on obtient le graphe repris à la figure (4.17).

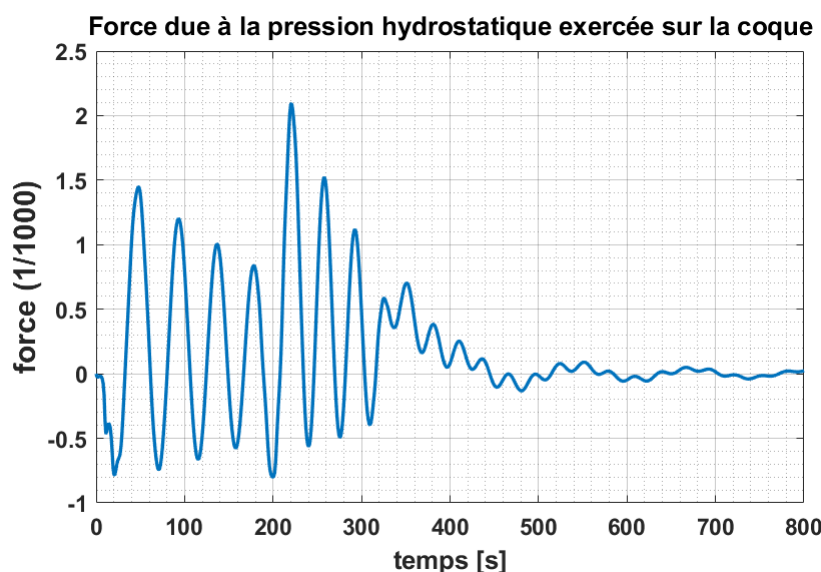


FIGURE 4.17 – force s'exerçant sur la coque (ALFREDO)

Nous observons alors que cette composante n'est de l'ordre que de quelques % et ne peut donc pas à elle seule expliquer l'écart entre les valeurs données par ALFREDO et LOCKFILL.

- Une deuxième piste pour expliquer l'écart des composantes d'impulsion nous vient en analysant le fichier résultat du débit Q_{sas} utilisé par ALFREDO pour le calcul de V_{sas} (vitesse que l'on retrouve dans l'implémentation de la formule d'Euler²). Ce débit est défini comme le débit au centre des cellules du sas. En observant ces valeurs, on remarque que dans les premières cellules du sas, il est donné plus grand que les valeurs de débit sortant des aqueducs. On observe en effet à la figure (4.19) que pour les 4 premières cellules du sas, $Q_{sas} > Q_{rv}$ ou

2. cfr chapitre 3, calcul des forces par ALFREDO et ANNEXE E

Q_{rv} est le débit total sortant des aqueducs. Cela peut poser problème dans le cas d'un bateau tel que Cassidy (108 m) pour une écluse de 112m de longueur, car le volume de contrôle de la poupe prend en compte ces cellules où le débit est surévalué. On peut faire le calcul de l'excédant de force en prenant la variable Q_{et} définie comme le débit à l'interface des cellules et qui lui décroît constamment le long du sas à partir de la valeur de Q_{rv} sortant des aqueducs :

$$\Delta F_{debit} = [\rho Q_{sas} V_{sas} - \rho Q_{et} V_{et}] \frac{1000}{m_s g} \quad (4.16)$$

si on porte ce Δ en fonction du temps on obtient le résultat repris à la figure (4.18).

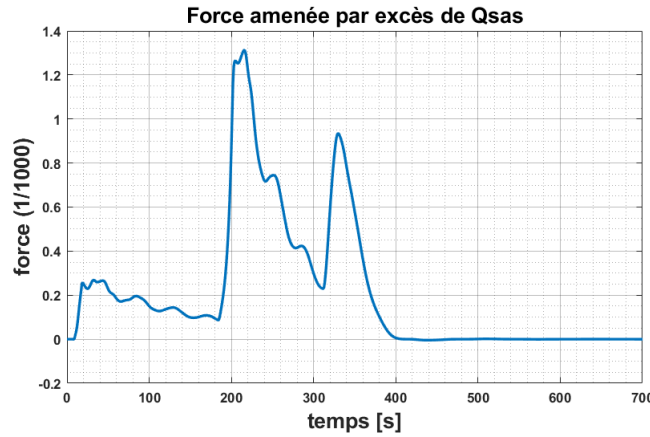


FIGURE 4.18 – Δ de force amené par l'excès de Q_{sas}

Nous observons (figure 4.18) que le Δ de force ne va pas excéder les 2 ‰, il ne peut donc lui non plus expliquer à lui seul l'écart entre les composantes données par LOCKFILL et ALFREDO.

- Finalement, une dernière piste est suivie dans l'évaluation du coefficient de Boussinesq " β " fait par ALFREDO.

Les valeurs actuelles sont implémentées comme suit dans le code :

.	derrière le bateau	sous le bateau
β	$\frac{h_{sas}}{0.11} \approx 40$	$\frac{h_{sas}}{h_{sas}-h_e} \approx 2$

Le coefficient de Boussinesq utilisé derrière le bateau semble particulièrement surévalué quand on sait qu'il possède des valeurs généralement légèrement supérieure à 1. Nous pouvons donc refaire un calcul de coefficient β

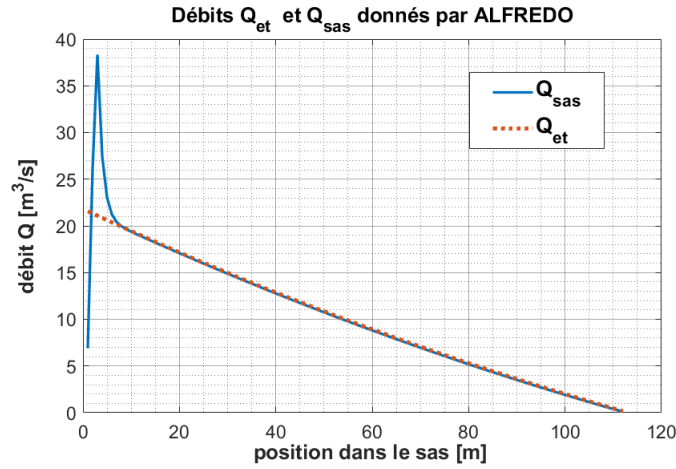
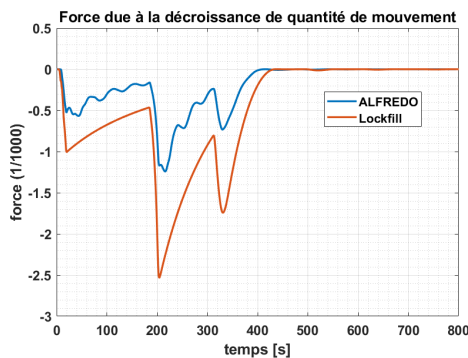


FIGURE 4.19 – profil des débits Q_{et} et Q_{sas} et Q_{rv}

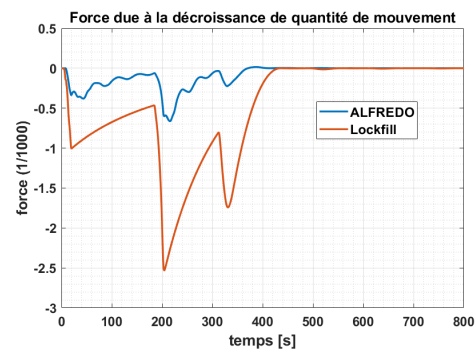
et vérifier si celui-ci amène à des valeurs plus correctes de la composante de force d'impulsion. Le calcul est effectué en annexe (cfr ANNEXE C) pour deux distributions de vitesses étant des cas extrêmes du profil réel de la vitesse au niveau de la poupe du bateau. Ce calcul nous fournit alors deux valeurs extrêmes du coefficient.

β_{max}	2
β_{min}	$4/3$

Une fois ces valeurs implémentées dans le code d'ALFREDO nous observons des résultats bien plus proches de ceux fournis par LOCKFILL pour le calcul de la composante d'impulsion, repris au tableau (4.9).



(a) impulsion avec β_{min}



(b) impulsion avec β_{max}

.	ALFREDO	LOCKFILL
$F_{impulsion\beta_{min}}$	-1.3 ‰	-2.5 ‰
$F_{impulsion\beta_{max}}$	-0.7 ‰	-2.5 ‰

TABLE 4.9 – Force impulsion pour β_{min} et β_{max}

.	ALFREDO	LOCKFILL
$F_{impulsioncorrige}$	-2.9 ‰	-2.5 ‰
$F_{longitudinalecorrige}$	-6.6 ‰	-2.9 ‰

TABLE 4.10 – Forces pour β corrigé

Nous pouvons tenter de corriger la composante d'impulsion. Si nous ajoutons à la force d'impulsion calculée par ALFREDO (avec $\beta = \frac{5}{3}$ pour moyenner les deux valeurs) la composante s'exerçant sur la coque et qu'on soustrait l'excès calculé par la surévaluation de Q_{sas} nous obtenons deux forces aux pics concordants presque parfaitement aux oscillations près d'ALFREDO (figure 21).

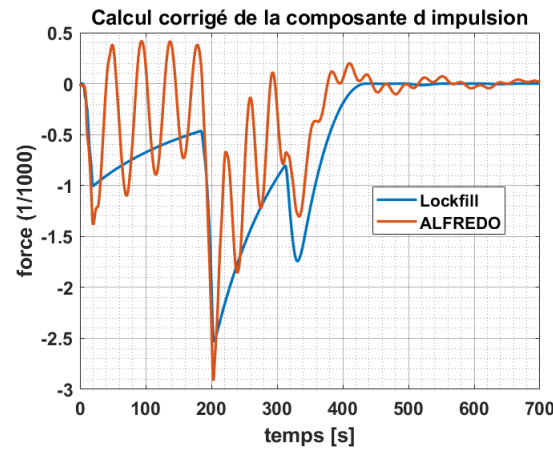


FIGURE 4.21 – Force impulsion corrigée

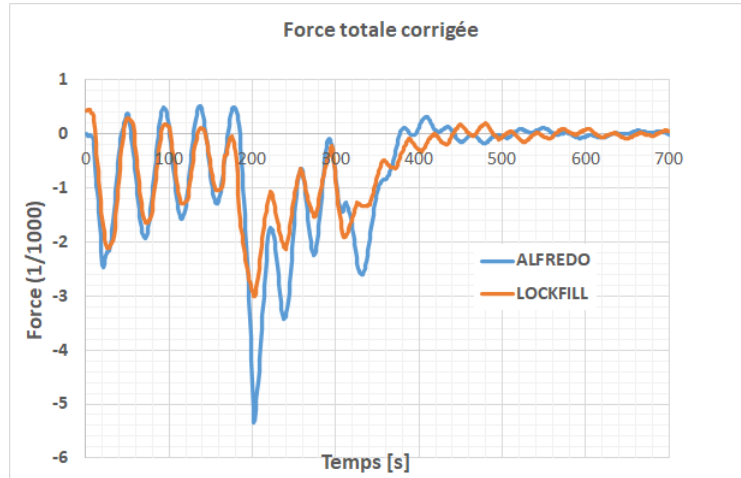


FIGURE 4.22 – Force totale corrigée

La force longitudinale totale alors calculée par chacun des programmes est reprise à la figure (4.22), pour laquelle on remarque une bien meilleure superposition.

4.4.7 Etude de l'influence du placement des sorties des aqueducs le long du sas de l'écluse

A la différence de LOCKFILL, ALFREDO permet de placer les sorties des aqueducs de contournement des têtes à une distance x au-delà des portes d'entrée de l'écluse. LOCKFILL considère lui que ces sorties se situent au niveau des portes d'entrée ($x = 0m$). Or dans le cas de Roselies par exemple, ces sorties se situent en réalité à 8 mètres des portes ($x = 8m$). Pour la comparaison LOCKFILL/ALFREDO effectuée dans les sections précédentes, on a donc fait l'hypothèse que les sorties d'aqueducs se situaient en $x = 0m$ par souci de comparer deux programmes aux entrées strictement identiques. Si l'on souhaite cependant modéliser avec exactitude les opérations ayant lieu dans le sas, il est intéressant de vérifier quelle modification sur nos résultats amènent cette précision supplémentaire qu'offre ALFREDO.

Sachant que l'écluse de Roselies devrait être modélisée avec des sorties d'aqueduc placées à 8m des portes, on va tester les cas suivant avec ALFREDO pour $x = 4m$ et $x = 8m$.

On remarque dès lors sur les profils de débit obtenus (figure 4.24) que la hausse de débit Q_{sas} dans les premières cellules du sas n'a lieu que pour des sorties d'aqueducs placées au niveau des portes ($x = 0m$). Si les sorties sont placées plus loin, l'allure de la courbe Q_{sas} semble plus normale (car elle s'aligne sur Q_{et} en partant de Q_{rv}). On peut dès lors s'intéresser à

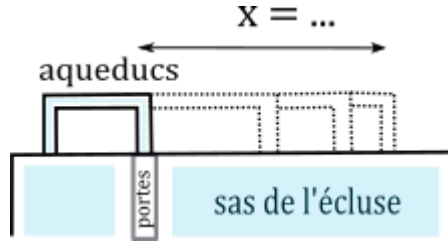


FIGURE 4.23 – sorties des aqueducs à distance x (m) des portes

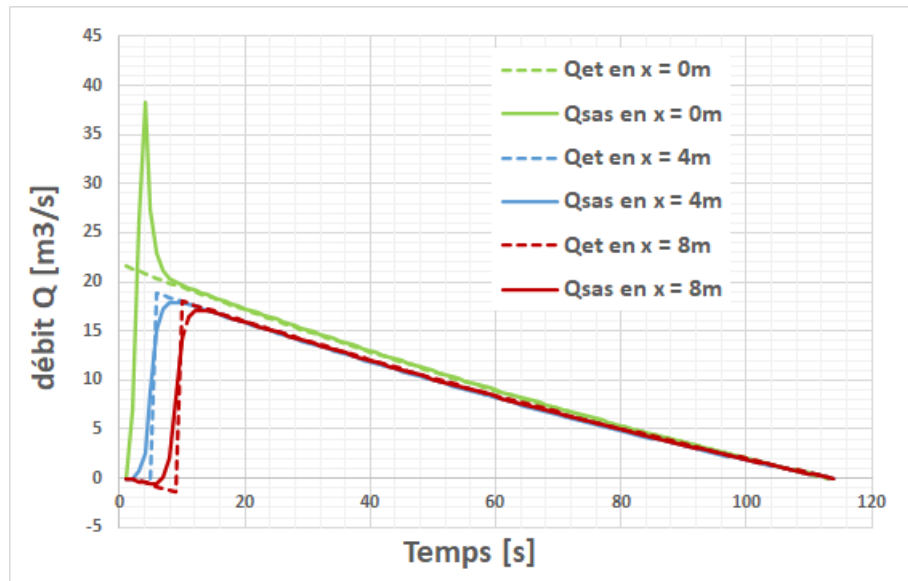


FIGURE 4.24 – débit Q_{et} et Q_{sas} en fonction de la position dans le sas ('t=330s')

la force longitudinale totale que nous fournit ALFREDO, sachant que la composante de décroissance de quantité de mouvement sera modifiée du fait de la modification de Q_{sas} . Les résultats sont repris dans le tableau (4.11)

Nous observons à la figure (4.25) une décroissance de la composante d'impulsion au fur et à mesure que les sorties d'aqueducs s'éloignent des portes (x augmente). Le phénomène s'accompagne d'une décroissance de la force longitudinale totale et n'est donc pas négligeable (figure 4.26) avec une perte de près de la moitié de sa valeur entre $x = 0$ et $x = 8$. Une attention particulière au placement des sorties devra donc être apportée lors des simulations d'opérations de sassement avec ALFREDO.

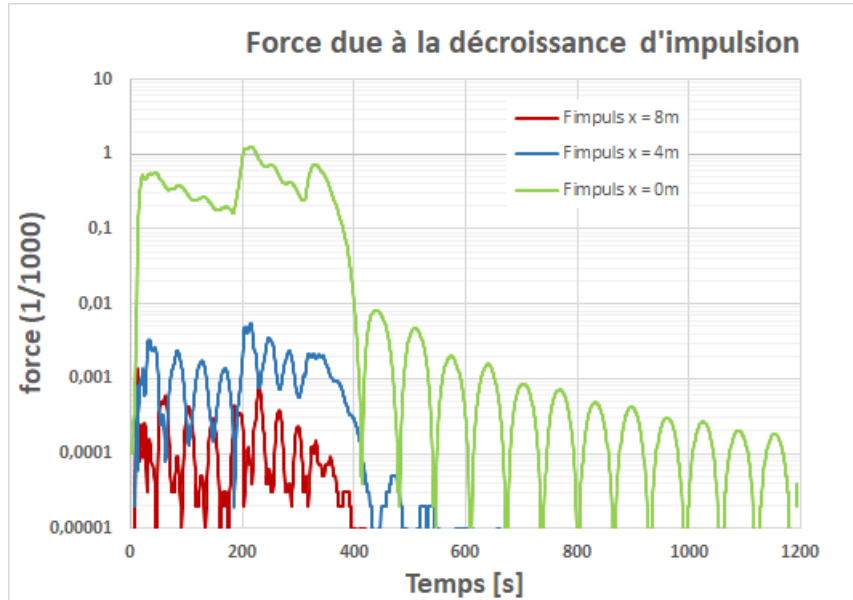


FIGURE 4.25 – Force de décroissance d'impulsion en fonction de la position des sorties d'aqueducs (échelle logarithmique)

placement des sorties	grandeur	$F_{longitudinale\ tot}$	$F_{impulsion}$
$x = 0m$	max [% ₀₀]	0	0
	min [% ₀₀]	-6.6	-1.2
$x = 2m$	max [% ₀₀]	2.23	0
	min [% ₀₀]	-1.97	-0.28
$x = 4m$	max [% ₀₀]	2.4	0
	min [% ₀₀]	-1.58	-5.5×10^{-3}
$x = 8m$	max [% ₀₀]	2	0
	min [% ₀₀]	-1.8	-1.34×10^{-3}

TABLE 4.11 – influence de la position de sortie des aqueducs sur les efforts calculés sur le bateau

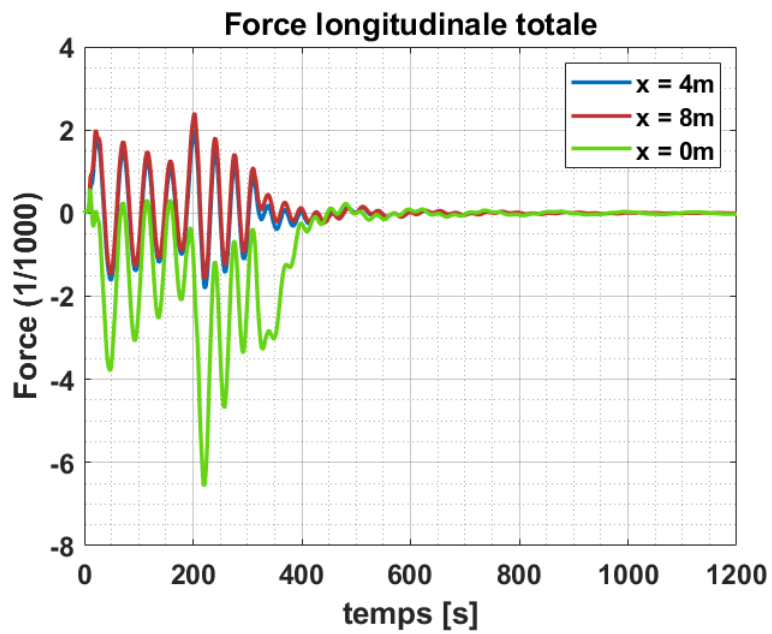


FIGURE 4.26 – Force longitudinale en fonction de la position x des sorties d'aqueducs

Chapitre 5

Essais sur le modèle réduit de Lanaye

Les essais réalisés par Heinz (2013) nous fournissent un ensemble de données (hydrogrammes, limnigrammes, forces et pentes d'eau) relevées sur le modèle réduit de la 4ème écluse de Lanaye du laboratoire des recherches hydrauliques (SPW). Celles-ci vont nous servir de support pour l'ensemble des simulations effectuées dans la présente section.

Dans un premier temps, nous confirmerons les résultats d'hydrogrammes et de hauteur d'eau pour des remplissages en mode normal (les deux aqueducs sont ouverts) et dégradé (un seul des aqueducs est ouvert).

Les mesures de pentes d'eau dans le sas et de force longitudinale totale s'appliquant sur le bateau nous permettront ensuite de discuter des résultats donnés par ALFREDO et LOCKFILL pour ces deux paramètres.

5.1 Présentation du modèle réduit - perte de charge

Le modèle de Lanaye est une reproduction à l'échelle 1/25 de la quatrième écluse de Lanaye, située sur le canal Albert. Ce modèle mesure 9m de long sur 0,72m de large et possède une hauteur de chute de 0,58m. Dans ce bassin un modèle réduit de barge ($7,2m \times 0,5m \times 0,3m$) est introduit. C'est sur cette barge que seront mesurés les efforts longitudinaux.

La conduite d'alimentation est modélisée dans ALFREDO par la suite d'éléments repris au tableau (5.1).

CHAPITRE 5. ESSAIS SUR LE MODÈLE RÉDUIT DE LANAYE

élément	rugosité relative	longueur [m]	section [m^2]
1. entrée à bords arrondis	0.0015	/	0.0897
2. conduite rectiligne (section carrée)	0.0015	0.16	0.04
3. coude concentrique	0.0015	/	0.04
4. conduite rectiligne (section carrée)	0.0015	0.27	0.04
5. coude concentrique	0.0015	/	0.04
6. diffuseur intermédiaire	0.0015	0.16	0.04
7. conduite rectiligne (section circulaire)	0.0015	0.32	0.123
8. vanne papillon	0.0015	/	0.123
9. diffuseur intermédiaire	0.0015	0.2	0.0513
10. coude concentrique	0.0015	/	0.0414
11. coude arrondi avec changement de section	0.0015	/	0.0414
longueur totale		1.10 m	

TABLE 5.1 – ensemble des éléments modélisant l'alimentation du modèle de Lanaye

Comme présenté au chapitre sur Roselies, un coefficient de perte de charge et une longueur d'aqueduc équivalents sont calculés et introduits dans LOCK-FILL pour une aire équivalente égale à $A = 0.0123m^2$ (cfr ANNEXE G).

$\zeta_{Lockfill}$	3.10
$L_{Lockfill}$	2.52 m

5.2 Loi d'ouverture des vannes

Des essais de remplissage ont été effectués en mode normal pour un remplissage avec ouverture de vanne linéaire sur des durées de 30s, 60s, 90s et pour un mode de remplissage dégradé pour une durée d'ouverture de vanne de 30s.

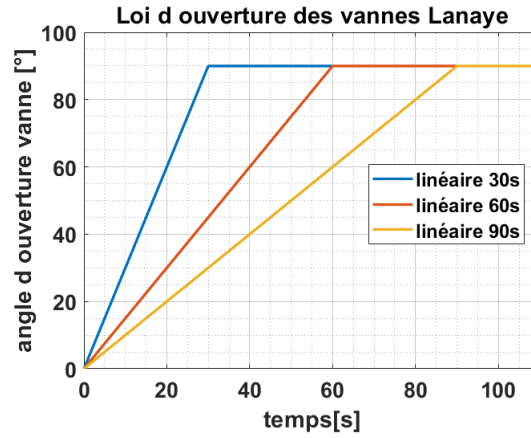


FIGURE 5.1 – loi d'ouverture des vannes

5.3 Hydrogrammes et limnigrammes

Les résultats d'évolution du débit et de la hauteur d'eau au cours du temps sont repris dans les figures et tableaux (5.2) et (5.3).

Q maximal [m^3/s]	ALFREDO	LOCKFILL	mesures labos
30 sec.	0.042	0.042	0.0375
60 sec.	0.039	0.039	0.0345
90 sec.	0.037	0.037	0.0325
30 sec. dégradé	0.0215	0.0215	0.0215

TABLE 5.2 – Valeur de débits maximales obtenues

hauteur d'eau maximale [m]	ALFREDO	LOCKFILL	mesures labos
30 sec.	0.864	0.865	0.858
60 sec.	0.864	0.865	0.858
90 sec.	0.864	0.865	0.858
30 sec. dégradé	0.858	0.858	0.858

TABLE 5.3 – valeurs maximales de hauteurs d'eau obtenues

Nous observons une assez bonne similitude entre simulations et données labos, les écarts sont de l'ordre de 10% pour les mesures de débits et peuvent être attribués aux imprécisions existant sur la modélisation du système dans

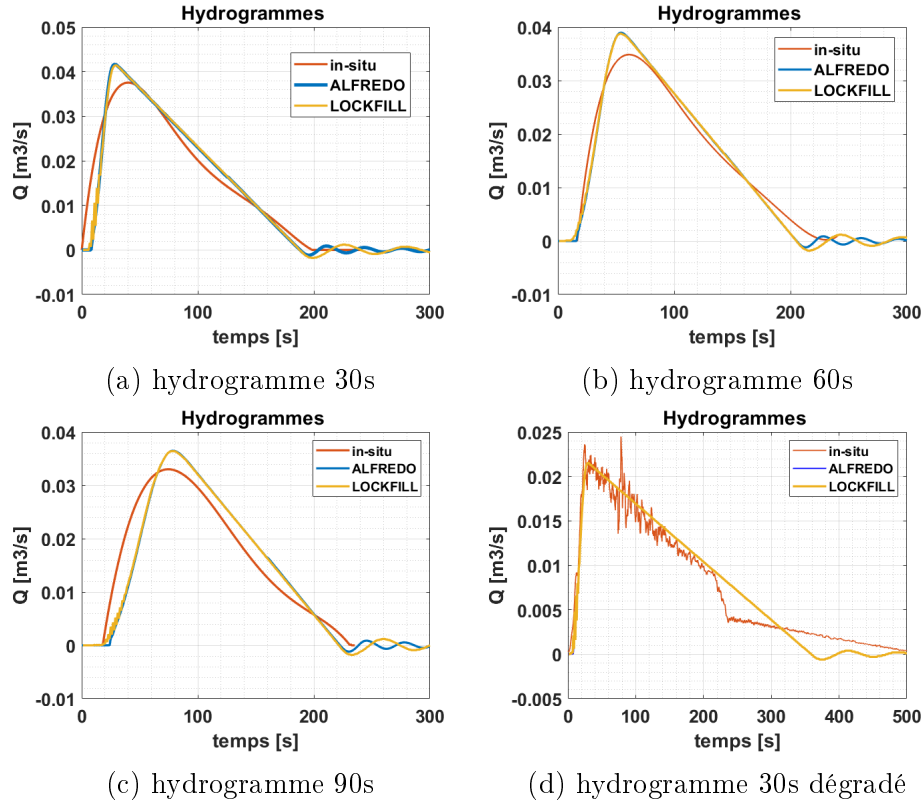


FIGURE 5.2 – Hydrogrammes

les deux programmes ainsi qu'à l'abaissement du plan d'eau remarqué dans le bief amont du modèle réduit. Ces écarts sont encore plus faibles pour la mesure de la hauteur d'eau. Nous observons par ailleurs une grande similitude entre les résultats fournis par ALFREDO et ceux donnés par LOCKFILL, leur courbes se superposant quasi-parfaitement. Ceci valide la bonne implémentation des pertes de charge pour les éléments du réseau de conduite ainsi que l'implémentation de l'équation de conduite à travers les aqueducs de contournement des têtes. Nous remarquons en outre que l'équivalence entre les inputs de ALFREDO et LOCKFILL est également très efficiente.

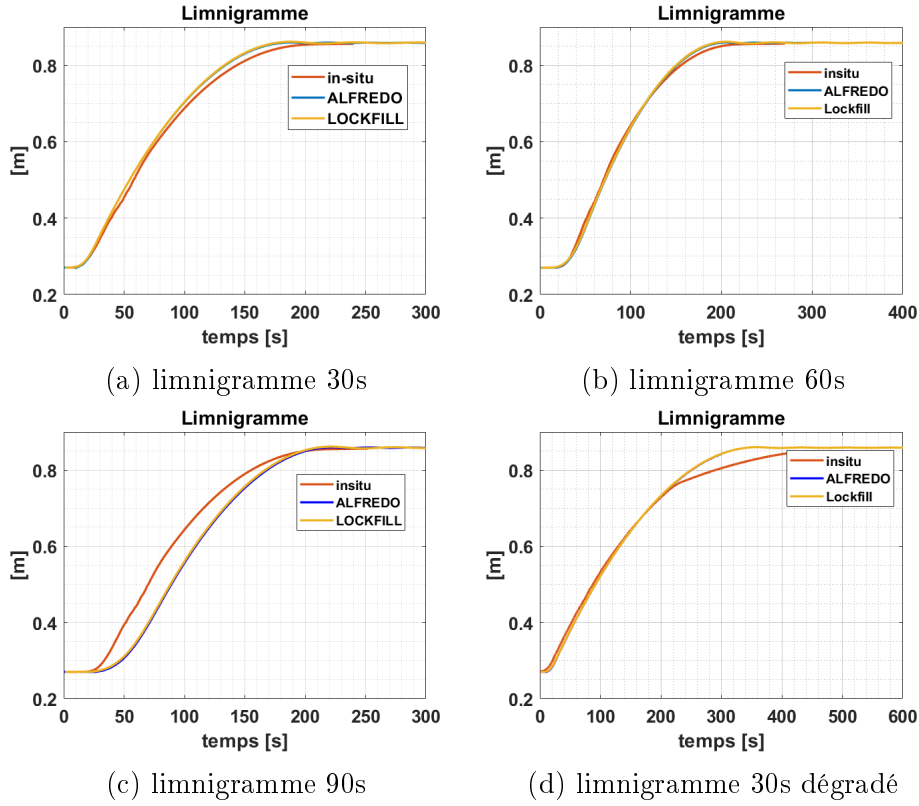


FIGURE 5.3 – Limnigrammes

5.4 Calcul des pentes d'eau dans le sas

Un calcul de la pente d'eau peut être effectué avec ALFREDO (mais pas avec LOCKFILL car pour rappel, ce dernier considère une ligne d'eau horizontale constante sur toute la longueur du sas). Les calculs de pente en laboratoire ont été effectués à l'aide de capteurs de pression différentielle (mesurant la différence de niveau entre deux points). La pente en laboratoire est donc obtenue par :

$$S_w = \frac{P_{diff}}{longueur_{sas}} \quad (5.1)$$

Le calcul suivant permettra en outre d'obtenir la pente au travers des résultats fournis par ALFREDO :

$$S_w = \frac{\Delta h_{sas}}{longueur_{sas}} \quad (5.2)$$

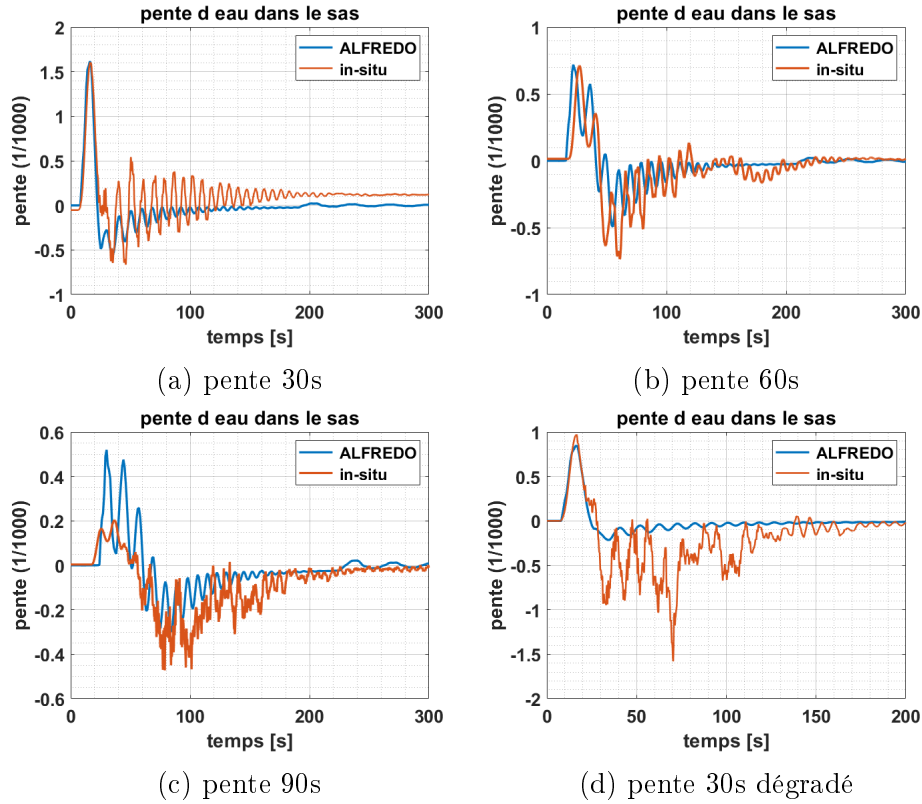


FIGURE 5.4 – pente de la ligne d'eau dans le sas

Nous constatons aux figures et tableau (5.4) que :

- Le premier pic positif de la pente est de manière générale très bien évalué
- Le premier pic négatif est plus sujet à être sous-évalué par ALFREDO par rapport aux mesures in-situ mais l'allure globale de la courbe est bien adoptée sur tout le temps de la simulation.
- Les fréquences sont proches avec des écarts de l'ordre de 10%

Nous concluons donc que dans le cas du modèle réduit de Lanaye (sas d'une dizaine de mètre de longueur), ALFREDO reste un bon outil pour évaluer la pente d'eau dans le sas. Les prochaines simulations nous permettront de confirmer ce calcul de manière plus globale.

-	-	ALFREDO	mesures labos
pente 30s	fréq. [Hz]	0.10	0.10
	max [% ₀]	1.5	1.5
	min [% ₀]	-0.5	-0.68
pente 60s	fréq. [Hz]	0.11	0.083
	max [% ₀]	0.7	0.7
	min [% ₀]	-0.5	-0.71
pente 90s	fréq. [Hz]	0.125	0.11
	max [% ₀]	0.52	0.20
	min [% ₀]	-0.35	-0.47
pente 30s dégradé	fréq. [Hz]	0.125	0.125
	max [% ₀]	0.83	0.98
	min [% ₀]	-0.22	-1.6

TABLE 5.4 – valeurs de pente obtenues

5.5 Calcul des forces

5.5.1 Force longitudinale totale

Les forces longitudinales s'exerçant sur le modèle réduit de bateau ont été mesurées à l'aide de jauges de déformations. Mises en parallèle avec les forces obtenues par ALFREDO et LOCKFILL, on obtient les graphes de la figure (5.5).

On observe que le premier pic positif de force longitudinale coïncide parfaitement entre les mesures labos et les deux programmes. Le pic négatif est globalement surévalué de l'ordre de 1 %₀ par ALFREDO (ce qui n'est pas négligeable car les efforts acceptables sont généralement limités à 1 %₀) sauf dans le cas du remplissage dégradé où celui-ci se rapproche plus du pic mesuré en laboratoire. Une analyse des composantes de la force longitudinale permettra comme dans le cas de Roselies, de déterminer l'origine de ces écarts.

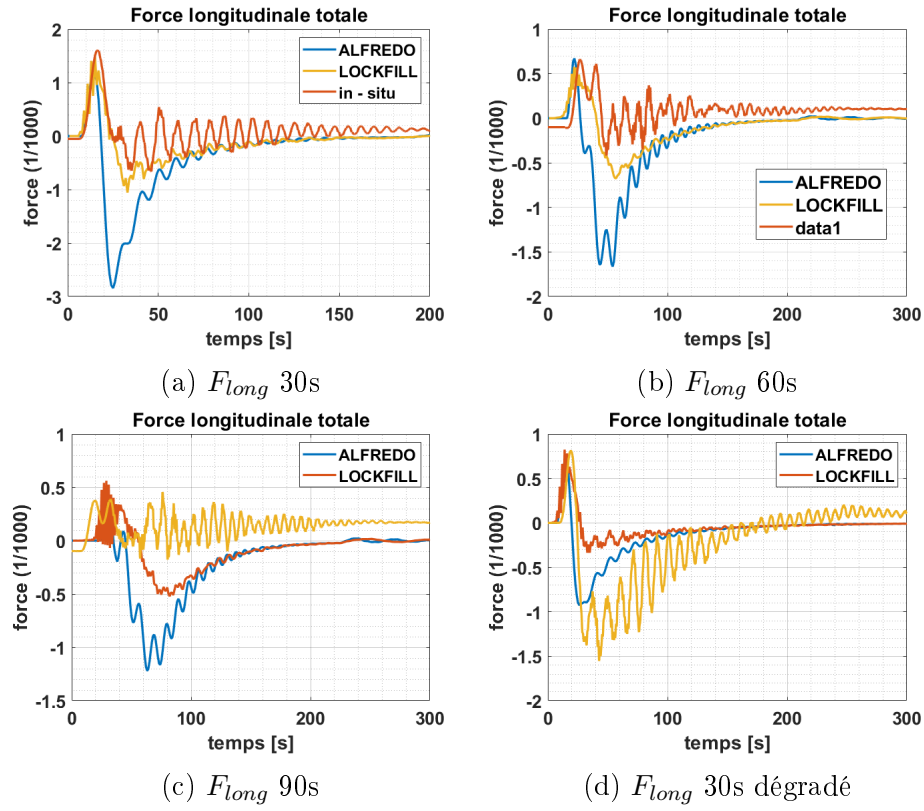


FIGURE 5.5 – Force longitudinale totale

simulations	unités	ALFREDO	LOCKFILL	mesures labos
$F_{l_{tot}}$ 30s	fréq. [Hz]	0.11	0.125	0.125
	max [‰]	1.38	1.38	1.56
	min [‰]	-2.7	-1	-0.65
$F_{l_{tot}}$ 60s	fréq. [Hz]	0.111	0.111	0.111
	max [‰]	0.68	0.57	0.62
	min [‰]	-1.44	-0.67	-0.4
$F_{l_{tot}}$ 90s	fréq. [Hz]	0.1	0.1	0.11
	max [‰]	0.54	0.56	0.37
	min [‰]	-0.99	-0.51	-0.15
$F_{l_{tot}}$ 30s dégradé	fréq. [Hz]	0.1	0.09	0.083
	max [‰]	0.74	0.74	0.8
	min [‰]	-0.87	-0.33	-1.5

TABLE 5.5 – Valeurs de forces totales obtenues

5.5.2 Composante hydrostatique

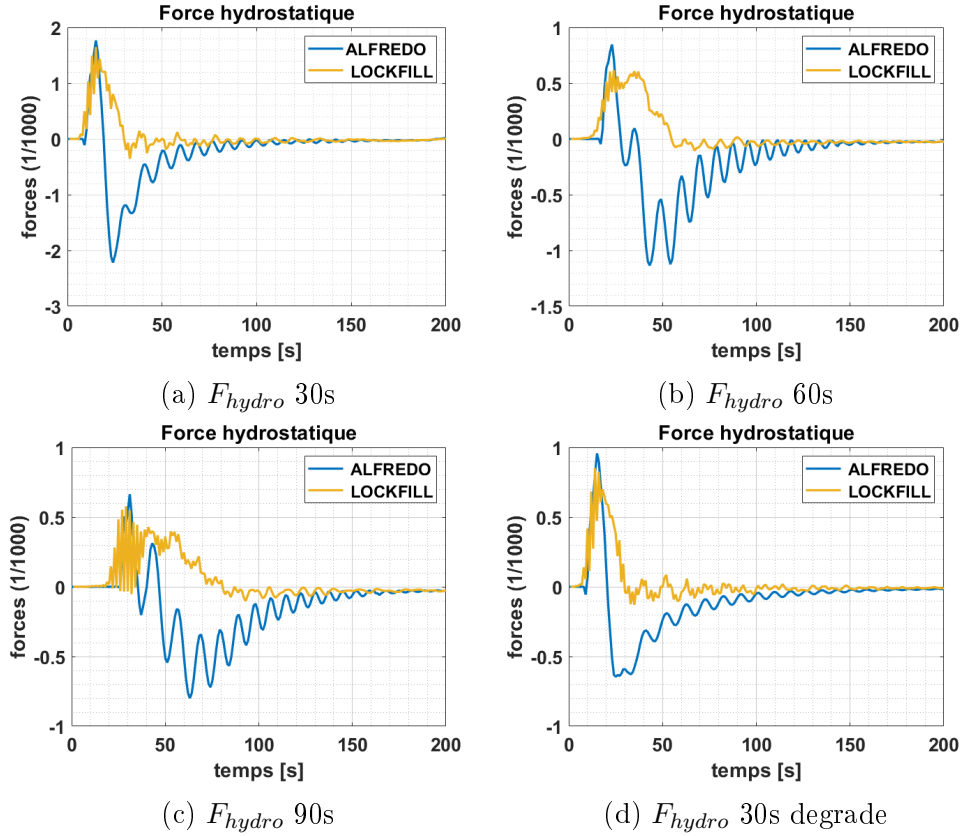


FIGURE 5.6 – Forces hydrostatiques

Dans un premier temps, il est intéressant d’observer la composante hydrostatique de la force longitudinale qui en est généralement la composante principale.

On remarque (figure 5.6) que :

- Les pics positifs sont assez proches pour les deux programmes. On observe bien les même tendances que celles retrouvées sur la force longitudinale totale.
- ALFREDO évalue un pic négatif plus important que LOCKFILL, avec des écarts allant de 1 à 2 ‰

Répercutées sur la force longitudinale totale, ces constatations peuvent expliquer la différence existant entre les résultats d’ALFREDO et les mesures labos.

simulations	unités	ALFREDO	LOCKFILL
F_{hydro} 30s	fréq. [Hz]	0.1	0.125
	max [‰]	1.85	1.6
	min [‰]	-1.9	-0.36
F_{hydro} 60s	fréq. [Hz]	0.083	0.11
	max [‰]	0.86	0.56
	min [‰]	-0.88	-0.1
F_{hydro} 90s	fréq. [Hz]	0.125	0.125
	max [‰]	0.67	0.57
	min [‰]	-0.58	-0.10
F_{hydro} 30s dégradé	fréq. [Hz]	0.09	0.09
	max [‰]	0.97	0.85
	min [‰]	-0.53	-0.13

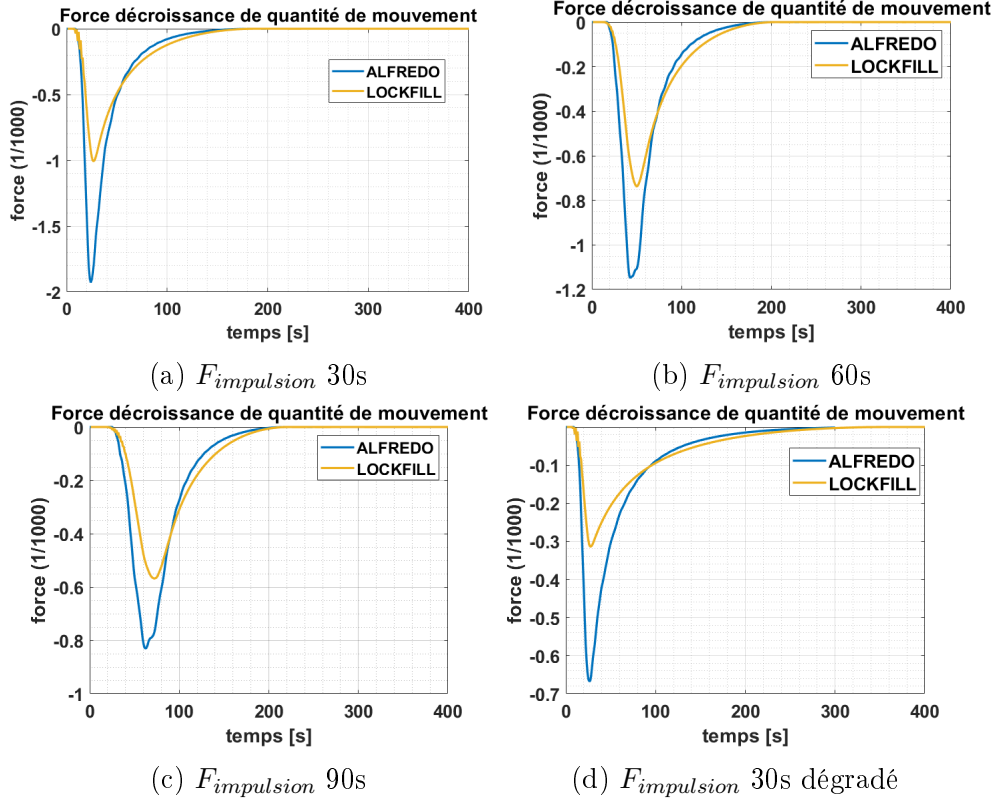
TABLE 5.6 – Valeurs de forces hydrostatiques obtenues

5.5.3 Composante de décroissance d'impulsion

simulations	unités	ALFREDO	LOCKFILL
$F_{impuls30s}$	max [‰]	0.1	0
	min [‰]	-1.2	1
$F_{impuls30s}$	max [‰]	0.1	0
	min [‰]	-0.38	-0.73
$F_{impuls90s}$	max [‰]	0.1	0
	max [‰]	-0.38	-0.56
$F_{impuls30sdgrad}$	max [‰]	0.024	0
	min [‰]	-0.3	-0.43

TABLE 5.7 – valeurs de force due à la décroissance d'impulsion obtenues

Nous avons constaté que le calcul de la composante due à la décroissance de quantité de mouvement de l'eau fait par ALFREDO différerait de celui fait par LOCKFILL du fait que les volumes de contrôle définis n'étaient pas identiques pour les deux programmes. L'analyse des graphes semble confirmer cette constatation car il existe encore des écarts entre les deux résultats. Ces écarts vont également accentuer le pic négatif de la force longitudinale d'ALFREDO par rapport à celui de LOCKFILL



5.5.4 Composante de friction

Comme mentionné au chapitre 3.4, pour effectuer une analyse pertinente des forces de friction entre les deux programmes, des rugosités équivalentes doivent être implémentées.

Pour rappel, la force de friction implémentée dans ALFREDO est donnée par Stockstill (2003)

$$F_f = \frac{1}{2} C_f \rho A_v V_m |V_m| \quad (5.3)$$

Expression dans laquelle on retrouve un coefficient de frottement.

$$C_f = [1.55 - 0.105(\frac{h_{coque}}{h_s})][0.075(\log(\frac{V_m l_s}{\nu}))^2 + \Delta c_f] \quad (5.4)$$

avec Δc_f la rugosité du bateau.

LOCKFILL fait quant à lui apparaître les termes de rugosité dans l'équation de friction sur la coque du bateau (Vrijbrucht et al., 1988)

$$F_{fric.coque} = \rho g \frac{V_m^2}{C_I^2 R_I} R_{II} P_{II} l_s \left(\frac{k_{II}}{k_I} \right) \left(\frac{1}{4} \right) \quad (5.5)$$

avec k_{II} et k_I respectivement les rugosités du bateau et du sas, laissées à introduire par l'utilisateur dans le programme.

ALFREDO implémente une rugosité du bateau Δc_f égale à 0.00025m dans son code, on introduira donc dans LOCKFILL un $k_{II} = \Delta c_f = 0.00025m$.

Pour la rugosité du sas, dans le cas d'ALFREDO, il faut se pencher sur l'équation de conservation de la quantité de mouvement des équations de Saint-Venant (cfr ANNEXE D) dans laquelle est définie la pente de friction :

$$S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{4/3}} \quad (5.6)$$

où "n" est le coefficient de Manning du sas. ALFREDO propose la valeur de 0,016 pour le radier en béton d'une écluse.

La relation proposée par Strickler et confirmée par Machiels (2008) relie le coefficient de Manning à la rugosité au sens de Nikuradse telle que retrouvée dans LOCKFILL.

$$K_s = 26 \left(\frac{1}{k_I} \right)^{1/6} \quad (5.7)$$

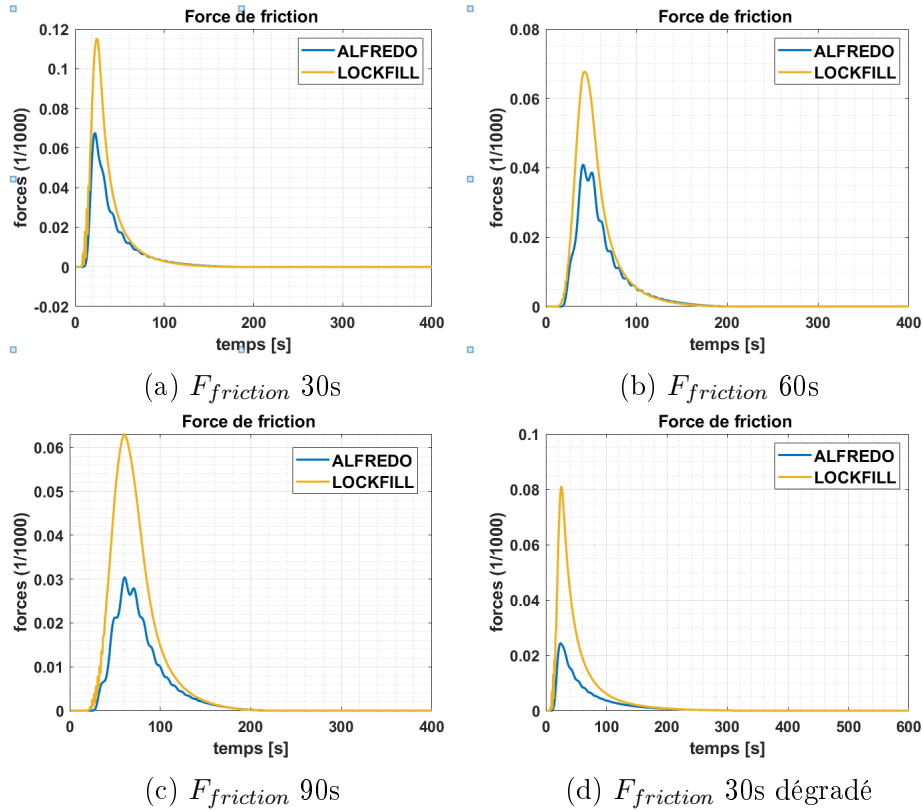
avec K_s le coefficient de Strickler tel que

$$K_s = \frac{1}{n} \quad (5.8)$$

en isolant k_I , on obtient une valeur pour la rugosité du sas à introduire dans LOCKFILL de 0.001625.

On obtient alors les valeurs de forces de friction reprises au tableau 5.8.

On remarque après simulations que la force de friction est la composante la plus faible de la force longitudinale. Elle ne possède pas une influence significative sur la valeur de force totale appliquée sur le bateau. ALFREDO la donne généralement plus faible que LOCKFILL mais ceci n'engendre que peu d'écarts dans le calcul final de la force totale.



$F_{friction}$ [‰]	ALFREDO	LOCKFILL
30 sec.	0.068	0.115
60 sec.	0.042	0.067
90 sec.	0.032	0.064
30 sec. dégradé	0.024	0.082

TABLE 5.8 – valeurs de forces de friction obtenues

5.5.5 Conclusion

On conclura donc que le calcul de la force longitudinale réalisé par ALFREDO et LOCKFILL est globalement en adéquation avec les mesures effectuées en laboratoire, avec une tendance d'ALFREDO à évaluer le un peu plus le pic négatif, écart provenant de la composante hydrostatique et de décroissance d'impulsion. Une force de friction non significative est obtenue, avec une tendance de LOCKFILL à toujours l'évaluer plus forte qu'ALFREDO.

Chapitre 6

Canal Bruxelles-Charleroi

L'ensemble des simulations de cette section sont basées sur les mesures in-situ d'opérations de sassement réalisées sur les écluses de Marchienne, Gosselies et Viesville du canal Bruxelles-Charleroi. Ces mesures ont été réalisées par un groupe de travail mis en place en septembre 2016 au sein de la Direction générale de la Mobilité et des Voies hydrauliques du Service Public de Wallonie (SPW) (Bousmar et Libert, 2018).



FIGURE 6.1 – Canal Bruxelles-Charleroi, emplacement des trois écluses étudiées

6.1 Géométrie et système d'alimentation des écluses

Les dimensions principales de la géométrie des écluses sont reprises à titre d'information dans le tableau (6.1).

.	longueur sas [m]	largeur sas [m]	h_{amont} initiale [m]	h_{aval} finale [m]
Marchienne	87.1	11.5	106.4	100.2
Gosselies	85.9	11.5	113.6	106.4
Viesville	85.9	11.5	121.10	113.6

TABLE 6.1 – Géométrie des écluses de Marchienne, Gosselies et Viesville

Au niveau des systèmes d'alimentation, les trois écluses étudiées possèdent en amont des aqueducs de contournement de têtes avec vannes cylindres suivis d'une chambre de dissipation. L'alimentation en aval est quant à elle composée de vantelles.

6.2 Simulations

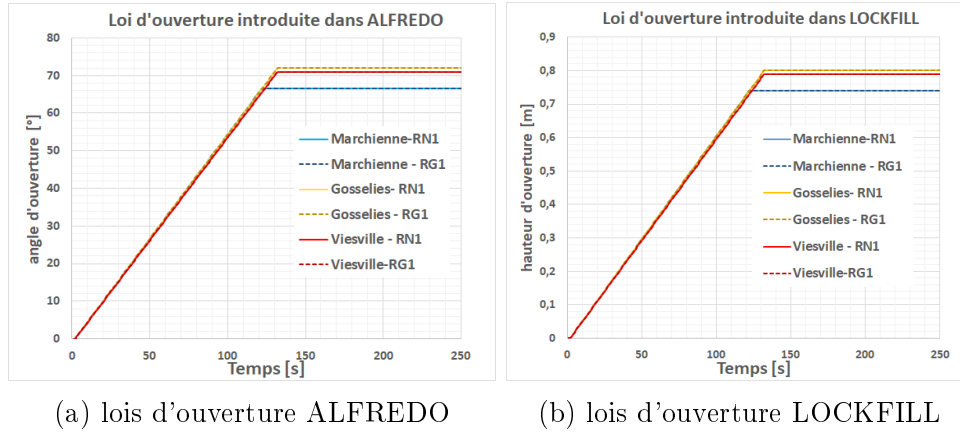
Le tableau (6.2) reprend l'ensemble des simulations effectuées avec ALFREDO et LOCKFILL, chacune d'elles comprenait la présence d'un bateau de classe IV dans le sas de l'écluse à l'exception du remplissage en mode normal de Viesville qui a vu le passage d'un bateau de classe I.

écluse	nom	type	dim. bateau
Marchienne	RG1	dégradé	$80m \times 9.5m$
	RN1	normal	$80m \times 9.5m$
Gosselies	RG1	dégradé	$80m \times 9.5m$
	RN2	normal	$80m \times 9.5m$
Viesville	RG1	dégradé	$80m \times 9.5m$
	RN1	normal	$38m \times 5.05m$

TABLE 6.2 – Ensemble des simulations effectuées avec ALFREDO et LOCKFILL

6.3 Lois d'ouverture des vannes

Les lois d'ouverture utilisées pour les vannes cylindres de chacune des écluses sont linéaires, d'une durée de 120s ou 130s. Ces lois peuvent directement être implémentées dans LOCKFILL tandis qu'ALFREDO nécessite de convertir les hauteurs d'ouverture en angle d'ouverture des vannes papillon, comme aux sections précédentes.



6.3.1 Coefficient de perte de charge

A Marchienne, la perte de charge totale en amont K_{amont} est donnée par l'étude sur modèle réduit réalisée en 1954 au Laboratoire de Recherche hydrauliques de Borgerhout (LRH, 1954 ; Bousmar et Libert, 2016). Dans ce rapport, il est supposé que les mêmes équations peuvent être réutilisées pour les écluses de Gosselies et Viesville, celles-ci ayant des systèmes d'alimentation similaires. La formule tirée du rapport est la suivante :

$$K_{amont} = K_{fixe} + \frac{\zeta_{vanne}}{2gA^2} \quad (6.1)$$

avec

$$\frac{\zeta_{vanne}}{2gA^2} = 10^{(-3,2904ouv^3 + 8.8103ouv^2 - 8.5968ouv + 0.81395)} \quad (6.2)$$

expression dans laquelle

- *ouv* est l'ouverture de la vanne cylindrique exprimée en mètre (= 1m à pleine ouverture de vanne).
- K_{fixe} est déterminé pour chaque écluse après calibration.
- Pour le mode dégradé on utilise des relations identiques mais avec une partie fixe des pertes de charge égale à 0.0032
- Le diamètre des vannes cylindres utilisées est de 2,3m

Après calcul des coefficients pour chaque degré d'ouverture des vannes, les lois pour ouvertures simples et dégradées sont implémentées dans ALFREDO et dans LOCKFILL. Ces lois comprennent donc également l'entierité des pertes de charge dues aux conduites, il n'est pas nécessaire de modéliser ces dernières.

6.4 Résultats - arrêt d'ALFREDO

Lors de nos simulations avec ALFREDO, nous avons rencontré un fait surprenant : le programme va arrêter la simulation avant d'atteindre la fin du remplissage dans la quasi-totalité des cas. ALFREDO semble donc se stopper prématurément lorsqu'un bateau est introduit dans le sas. Il ne rencontre par contre aucun problème lorsque la simulation se fait avec un sas vide. Aucun problème similaire ne sera rencontré avec LOCKFILL qui simule pourtant des opérations de sasement aux conditions identiques.

écluse	simulation	temps remplissage	temps simu ALFREDO
Marchienne	RG1	650s	650s
	RN1	300s	75s
Gosselies	RG1	700s	250s
	RN2	375s	75s
Viesville	RG1	750s	750s
	RN1	400s	50s

TABLE 6.3 – Temps de simulation avant arrêt d'ALFREDO

A la figure (6.3) sont représentés en exemple les hydrogrammes obtenus dans le cas de Marchienne. Nous pouvons apercevoir qu'ALFREDO finit sa simulation en mode dégradé mais avec une forte instabilité. Dans le cas du mode normal nous n'arrivons pas au bout de la simulation .

L'étude des forces et pentes d'eau doit donc pour le moment être abandonnée en raison du nombre insuffisant de résultats donnés par ALFREDO. Nous nous concentrerons donc dans la section suivante à trouver l'origine des instabilités rencontrées dans ALFREDO.

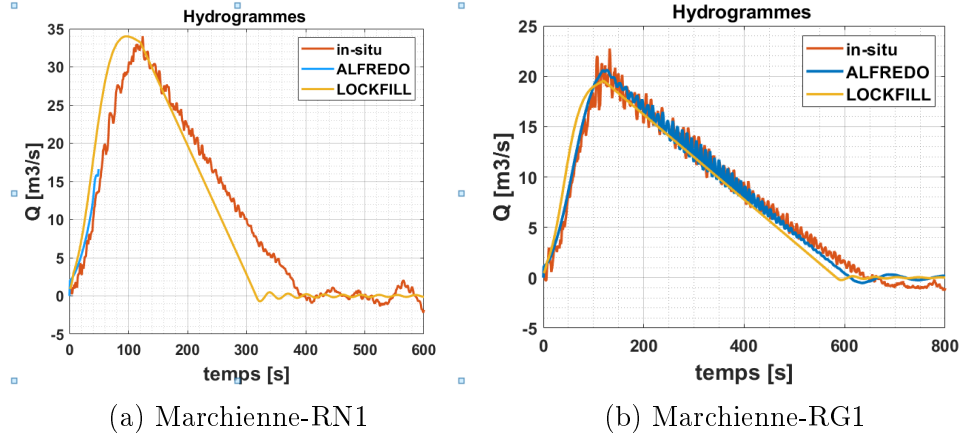


FIGURE 6.3 – instabilité rencontrées par ALFREDO

6.5 Etude de sensibilité aux paramètres d'entrée de la simulation

La présente section propose de vérifier si une modification de certains paramètres de la simulation permettrait à celle-ci de se dérouler sans arrêt prématuré. Dans les comparaisons suivantes, le temps " t " représente le temps nécessaire au remplissage de l'écluse (première valeur atteinte telle que $Q = 0 \text{ m}^3/\text{s}$), soit le temps de simulation minimale qu'ALFREDO devrait effectuer. Il est comparé au temps de simulation réellement effectué. Notons que l'ensemble de ces simulations sont réalisées sur le modèle du remplissage RN1 de Marchienne.

6.5.1 Dimensions du bateau

Les temps des simulations réalisés par ALFREDO lorsque la largeur et la longueur du bateau sont réduits sont repris dans les histogrammes (6.4) et (6.5). Une modification du tonnage du bateau est également apportée afin de garder un enfoncement du bateau acceptable ($\approx 2m$).

Nous remarquons qu'aucun changement significatif n'est apporté au temps de la simulation.

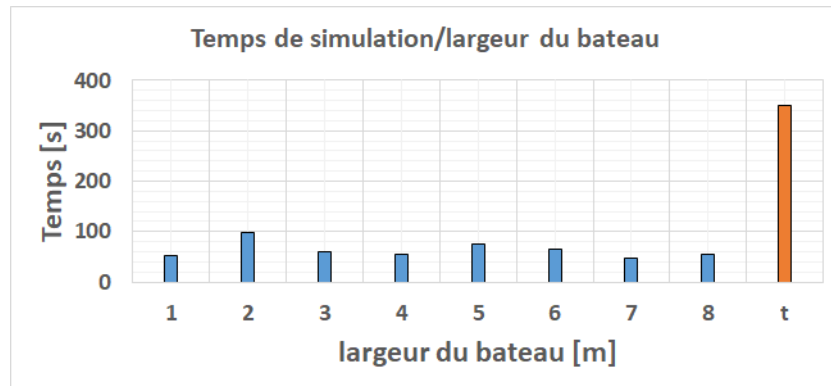


FIGURE 6.4 – temps de simulation en fonction de la largeur du bateau

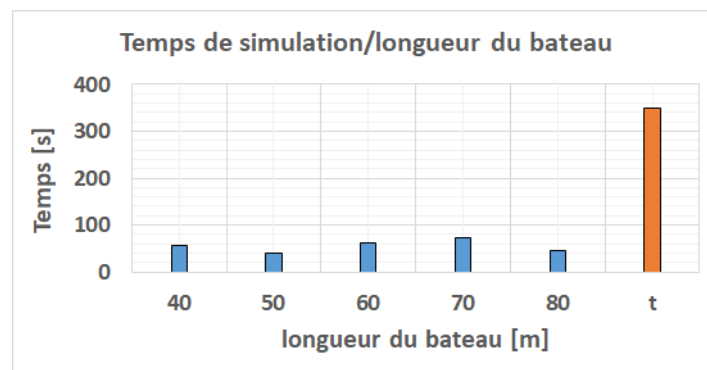


FIGURE 6.5 – temps de simulation en fonction de la longueur du bateau

6.5.2 Inclinaison de la poupe et de la proue du bateau

L'ensemble des simulations précédentes ont été réalisées avec un angle de poupe et de proue considéré comme plat (180° dans ALFREDO). Si nous décidons de profiler la poupe et la proue en changeant leur angle d'inclinaison, Nous obtenons les résultats repris à la figure (6.6).

Nous observons encore une fois peu de changement quant au fait qu'ALFREDO ne termine pas ses simulations.

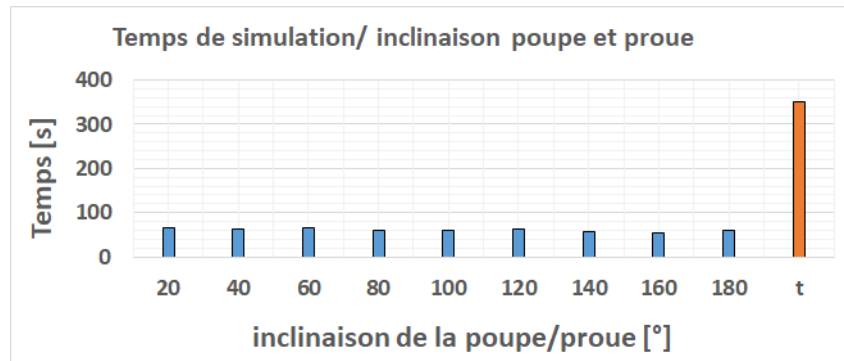


FIGURE 6.6 – temps de simulation en fonction de l’inclinaison du bateau

6.5.3 Nombre de cellules constituant le sas

Pour le calcul de la ligne d’eau dans le sas de l’écluse ainsi que de l’ensemble des paramètres de sortie proposés par ALFREDO, une discrétisation du sas est effectuée. La longueur des cellules de discrétisation est définie par l’utilisateur.

Jusqu’à présent nous avons considéré des cellules de 1m de long, soit une centaine de cellules au vu des longueurs du sas des écluses. Qu’en est-il si nous considérons des cellules plus petites ?

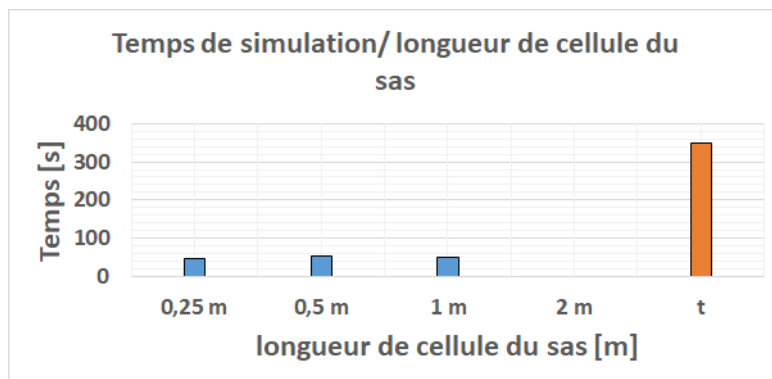


FIGURE 6.7 – temps de simulation en fonction de la taille des cellules du sas

Des simulations ont été réalisées pour des cellules de longueurs égales à 0.25m, 0.5m, 1m et 2m mais aucun résultat concluant n’est obtenu, la simulation ne se lançant même pas pour des cellules de 2m.

6.5.4 Pas de temps de l'itération de la simulation

Nous pouvons réduire le pas de temps avec lequel ALFREDO réalise chacune des itérations de sa simulation. Celui-ci se définit dans les fichiers d'entrée en donnant une valeur à la condition CFL ("Courant - Friedrichs-Léwy")

$$\Delta t = CFL \frac{\Delta x}{|V + c|} \quad (6.3)$$

où

- Δx est la longueur d'une cellule du sas
- V est la vitesse de l'eau dans chaque cellule du sas
- c est la célérité des ondes d'eau $c = \sqrt{gH}$

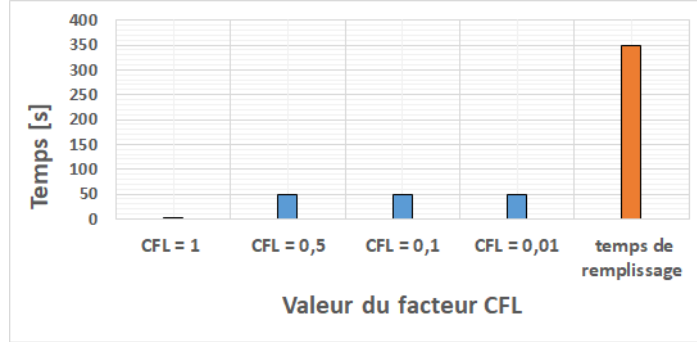


FIGURE 6.8 – temps de simulation en fonction du temps d'itération

Un calcul rapide nous donne une valeur de $\Delta t \approx 0.2s$, si nous réduisons cette valeur en réduisant CFL sur plusieurs ordres de grandeur nous obtenons les temps de simulations repris à la figure (6.8). On remarque alors qu'un pas de temps plus court pour chaque itération de la simulation ne résout pas le problème d'instabilité rencontré.

6.5.5 Equation de conservation de quantité de mouvement

Nous avons modifié dans la section sur Roselies, la valeur du coefficient de Boussinesq $\beta = \frac{\int \int v^2 dA}{V^2 A}$ dans le calcul des forces dues à la décroissance de quantité de mouvement et plus spécifiquement dans son utilisation faite de la formule d'Euler. Une analyse approfondie du code d'ALFREDO nous montre que la valeur du coefficient de Boussinesq utilisé dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement (équation 6.4) qui modélise la ligne d'eau dans le sas (cfr ANNEXE D), prête aussi à discussion.

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(S_0 - S_f) + gI_2 \quad (6.4)$$

Si nous introduisons la valeur nouvellement calculée de $\beta = \frac{5}{3}$ nous remarquons alors qu'ALFREDO finit l'ensemble de ses simulations, et que plus aucune instabilité n'est rencontrée. Il semble donc que la valeur du coefficient de Boussinesq était bien la source du problème que nous constatons. Nous observons finalement une bonne reproductibilité des hydrogrammes entre LOCKFILL et ALFREDO. Ceux de Marchienne simulés en mode normal et dégradé sont ainsi repris à titre d'exemple (figure 6.9).

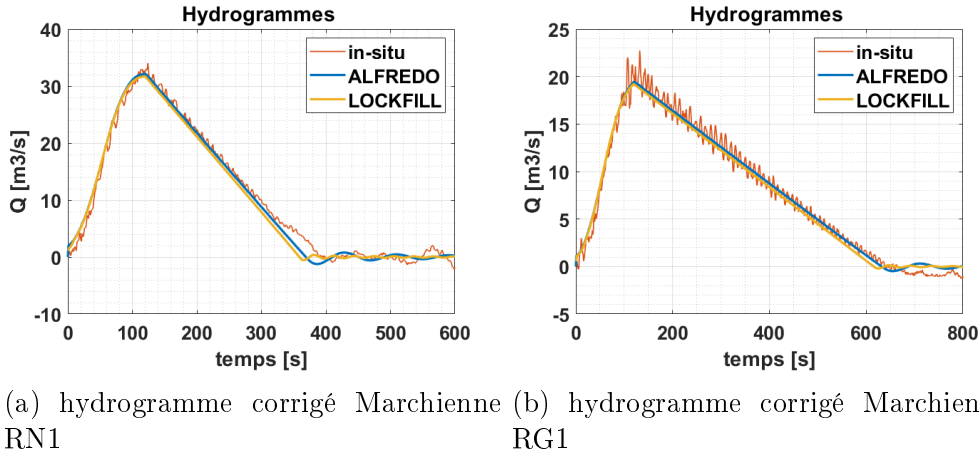


FIGURE 6.9 – hydrogrammes - coefficient de Boussinesq corrigé

6.6 Nouveaux résultats - calcul de la pente d'eau dans le sas

Pour les écluses du canal Bruxelles-Charleroi, nous possédons des mesures terrains des pentes de la ligne d'eau dans le sas (Bousmar et Libert 2018), effectuées lors de chacune des opérations de sassement précédemment citées. L'annexe sur le chapitre 3 au sujet de l'implémentation des forces nous renseigne en outre que la composante de force hydrostatique (normalisée par le poids du bateau) égale la pente de ce dernier.

Si nous faisons l'hypothèse que la pente du bateau équivaut à celle de la ligne d'eau dans le sas, nous pouvons également comparer ces mesures de pente d'eau avec la composante de force hydrostatique calculée par AL-

FREDO et celle calculée par LOCKFILL (qui ne permet pas de calculer la pente d'eau car il modélise une ligne d'eau horizontale dans le sas de l'écluse).

Les résultats sont repris dans les tableaux (6.4) et (6.5).

écluse	nom	pente min/max mesurée [‰]	pente min/max ALFREDO [‰]
Marchienne	RG1	-1.02/0.52	-0.43/0.5
	RN1	-1.41/0.70	-0.80/0.92
Gosselies	RG1	-0.8/0.4	-0.7/0.4
	RN1	-1.25/1.10	-1.5/1.15
Viesville	RG1	-1.35/0.5	-0.42/0.5
	RN1	-1.2/0.6	-0.7/0.9
écluse	nom	fréquence mesurée [Hz]	fréquence ALFREDO [Hz]
Marchienne	RG1	0,033	0,025
	RN1	0,05	0,05
Gosselies	RG1	0,04	0,028
	RN1	0,033	0,033
Viesville	RG1	0,025	0,033
	RN1	0,033	0,05

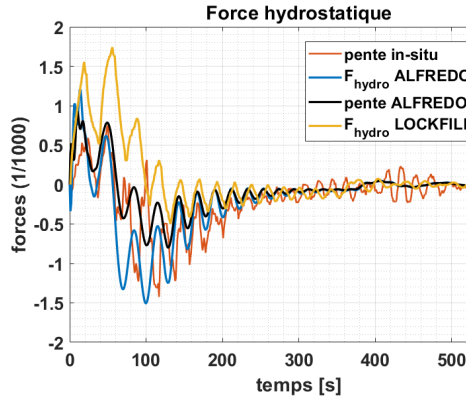
TABLE 6.4 – Pentes maximales et fréquences calculées par ALFREDO

écluse	nom	F_{hydro} ALFREDO [‰]	F_{hydro} LOCKFILL [‰]
Marchienne	RG1	-0.8/0.6	-0.4/1
	RN1	-1.5/1.2	-0.5/1.75
Gosselies	RG1	-2.5/0.5	-0.2/1.2
	RN1	-5/1	-1/2
Viesville	RG1	-0.9/0.6	-0.1/0.7
	RN1	-2.2/2.2	-0.4/2.2

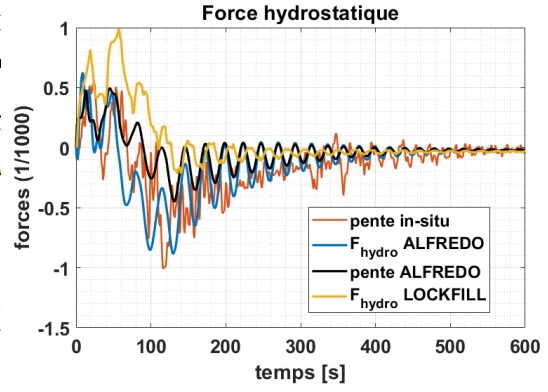
TABLE 6.5 – Forces hydrostatiques calculées par ALFREDO et LOCKFILL

Dans un premier temps nous pouvons remarquer que dans l'ensemble, les simulations donnent des résultats qui correspondent à nos attentes, les quelques écarts rencontrés entre les différents paramètres étudiés ne sont jamais excessifs, et ceux-ci restent du même ordre de grandeur. Les fréquences présentent peu ou pas de déphasage. Nous noterons que :

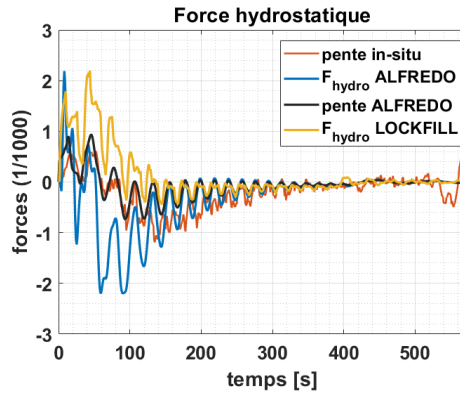
- Le pic positif de force hydrostatique calculé par ALFREDO est proche du pic positif de la pente mesurée in-situ.



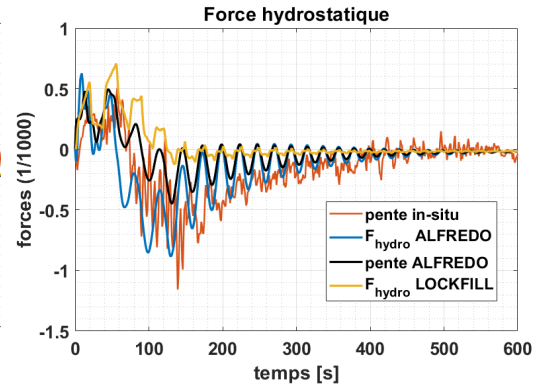
(a) Marchienne - RN1



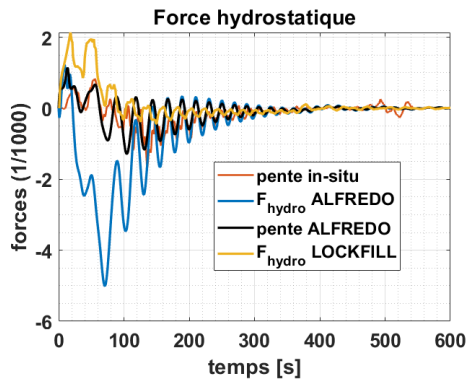
(b) Marchienne - RG1



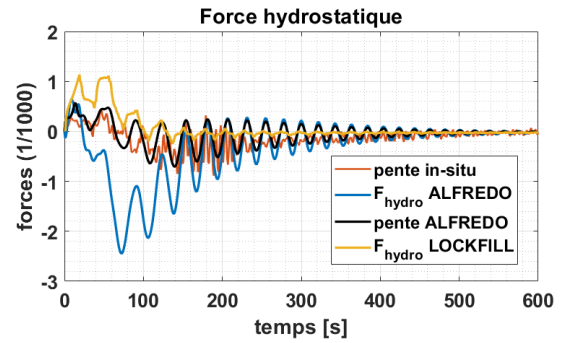
(c) Viesville - RN1



(d) Viesville - RG1



(a) Gosselies - RN1



(b) Gosselies - RG1

- Le pic négatif de force hydrostatique calculé par ALFREDO est proche du pic négatif de la pente mesurée. Cependant, dans le cas de Gosselies, nous remarquons que ce pic est surévalué par ALFREDO. Nous avons déjà fait cette constatation lors des simulations sur Lanaye à

la section précédente.

Nous noterons donc que la force hydrostatique calculée par ALFREDO est proche de la pente d'eau mesurée dans le sas, ce qui confirme que le calcul de force hydrostatique effectué par ALFREDO est globalement correct, en tenant compte du pic négatif parfois surévalué dont nous tenterons de donner une explication dans la section suivante.

Nous remarquons dans un second temps que :

- Le pic positif de force hydrostatique calculé par LOCKFILL est dans l'ensemble des cas plus élevé que la valeur du pic positif de pente d'eau dans le sas.
- Le pic négatif de force hydrostatique calculé par LOCKFILL est également plus faible par rapport au pic négatif de la pente mesurée in-situ.

Nous pouvons donc en conclure que de manière général la force hydrostatique calculée par LOCKFILL est légèrement surévaluée par rapport à sa valeur mesurée sur terrain mais reste malgré tout une bonne évaluation de la composante hydrostatique.

Finalement nous observerons que :

- Le pic positif de pente calculé à partir des résultats d'ALFREDO est dans l'ensemble des cas proche du pic positif de pente mesurée in-situ.
- Le pic négatif de pente calculé à partir des résultats d'ALFREDO reste globalement assez proche du pic négatif de la pente mesurée in-situ. Bien que dans certains cas le calcul de composante hydrostatique se rapproche de manière plus fidèle de la pente mesurée in-situ, le calcul de pente semble moins sujet à des variations (comme dans le cas de Gosselies ou nous observons que le calcul de composante hydrostatique ne conviendrait pas à faire office de calcul de pente).

Nous concluerons que, pris ensemble, le calcul de pente à partir des résultats de hauteur d'eau d'ALFREDO et de la composante hydrostatique calculée par ALFREDO également donnent de bons indicateurs de la valeur de pente d'eau réel dans le sas. Les résultats de LOCKFILL permettent également une telle comparaison mais se rapprochent moins de la réalité et ce pour les 6 cas étudiés.

6.6.1 Pente du bateau dans le sas

Nous allons à présent donner un début d'explication à la surévaluation du pic négatif de la force hydrostatique donné par ALFREDO, qui a des

répercussions sur le calcul de la force totale.

Pour rappel, ALFREDO calcule sa composante de force hydrostatique à l'aide de la formule suivante (Christiaens et al., 2014) :

$$F_{hs.tot} = \frac{1}{2} \rho g b_s h_{proue}^2 + \int_{L_{coque}} \rho g b_s h_s (-\theta) dx - \frac{1}{2} \rho g b_s h_{proue}^2 \quad (6.5)$$

Dans laquelle θ est l'angle d'inclinaison du bateau. Une pente du bateau calculée trop grande dans le cas de Gosselies pourrait expliquer la valeur du pic négatif surévalué par ALFREDO.

Après observations des résultats, nous observons les valeurs de pente reprises au tableau (6.6).

écluse	nom	pente bateau ALFREDO [%o]
Marchienne	RG1	0.7
	RN1	1.2
Gosselies	RG1	1.5
	RN1	3.5
Viesville	RG1	0.46
	RN1	1.2

TABLE 6.6 – valeurs d'inclinaison du bateau calculées par ALFREDO

Les valeurs de pentes du bateau les plus élevées (Gosselies RN1 et RG1 et Viesville RN1) coïncident bien avec les pics négatifs plus élevés de force hydrostatique relevés pour les mêmes cas de remplissage. Nous noterons également qu'elles sont en opposition de phase avec les valeurs de pentes d'eau, ce qui accentue encore plus le pic de force négatif (augmentation de la pression sur la proue). La surévaluation faite par ALFREDO peut donc s'expliquer par un calcul plus élevé de la pente du bateau lors du remplissage du sas. La figure (6.14), qui compare l'inclinaison du bateau Cassidy calculée par ALFREDO et celle mesurée in-situ par un inclinomètre (Savary et al., 2016) nous confirme un peu plus que l'inclinaison du bateau est surévaluée par ALFREDO. Un travail ultérieur sur le tangage du bateau est à envisager pour expliquer cette plus forte inclinaison.

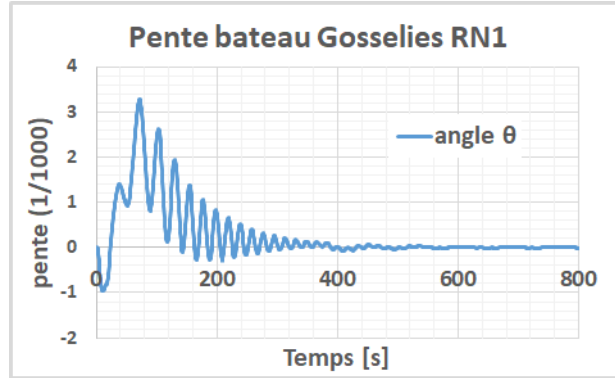


FIGURE 6.12 – pente bateau Gosselies RN1

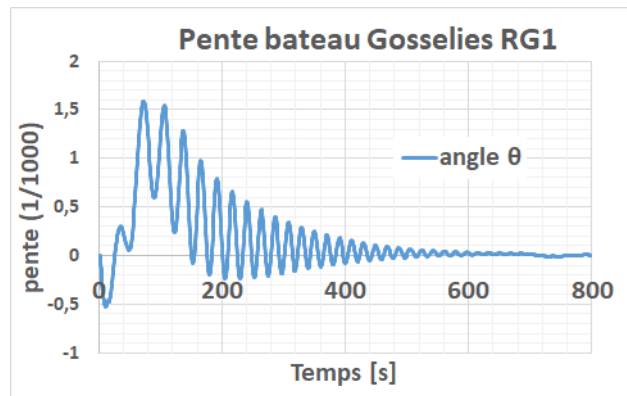


FIGURE 6.13 – pente bateau Gosselies RG1

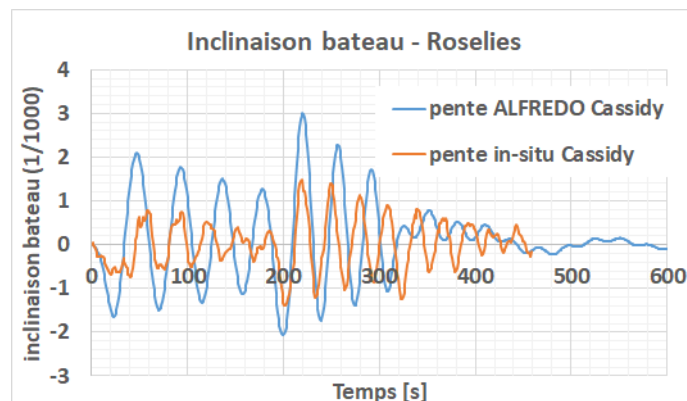


FIGURE 6.14 – pente bateau Cassidy - Roselies

Chapitre 7

Ecluse d'Ampsin-Neuville (Vb)

En attente de la construction d'une nouvelle écluse de 225mx25m (classe VIb) sur le site d'Ampsin-Neuville, une écluse plus petite est préalablement construite (classe Vb) pour assurer la continuité du trafic le temps des travaux. Le rapport rédigé par Bousmar (2016) et sa note complémentaire (Bousmar, 2019), reprennent l'ensemble des données utilisées dans les sections suivantes.

7.1 Données géométriques

Les données géométriques nécessaires à la réalisation des simulations sont reprises dans le tableau (7.1) , tirées du rapport de Bousmar (2016).

longueur totale	244,50 m
largeur totale	12,50 m
hauteur de chute	4,70m
NFN amont	69,15 m
NFN aval	64,45 m
niveau seuils amont-radier-aval	59,45m

TABLE 7.1 – Données géométriques de l'écluse d'Ampsin Vb

7.2 Remplissage et pertes de charge

Pour le remplissage de l'écluse, sont envisagées dans un premier temps 6 vannes de 1m de haut et de 1,7 m de large, placées sur la face aval de la

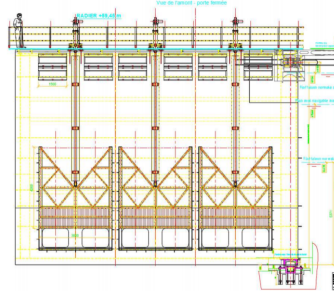


FIGURE 7.1 – Vue amont de la porte de l'écluse

porte.

Pour les modéliser dans ALFREDO (qui n'accepte que le remplissage par contournement des têtes/ aqueducs larrons), une vanne papillon de même aire est implémentée avec un coefficient de perte de charge équivalent à celui des vannes pour chaque degré d'ouverture de celles-ci.

Pour LOCKFILL on utilisera également un coefficient de perte de charge équivalent, équivalence plus évidente à réaliser car ce programme permet l'utilisation de vannes.

L'équation de débit pour un remplissage directement par les têtes est donnée par :

$$Q = \sqrt{2g\mu^2 A^2 (H_{amont} - H_{aval})} \quad (7.1)$$

Bousmar (2016) nous fournit le coefficient de débit du système de vannes complet (après étude de sensibilité, celui-ci est calculé égal à 0,65 pour l'ensemble des simulations).

$$\mu = \sqrt{1/\zeta} \quad (7.2)$$

On en déduit donc

$$\zeta = \frac{1}{\mu^2} \quad (7.3)$$

Pour tenir compte de l'ouverture des vannes dans le calcul du débit nous allons créer une loi pour la vanne telle que

$$\zeta_{vanne} = \frac{\zeta A_{tot}^2}{A_{ouv}^2} \quad (7.4)$$

Nous ferons l'hypothèse que $A_{tot} = 1m^2$ donc pour ALFREDO, le diamètre de la vanne sera égale à $1.129m$.

Pour respecter le fait que les vannes soient directement placées sur la porte, nous réduirons au minimum la perte de charge présente dans l'aqueduc. La longueur de l'aqueduc servira donc uniquement à donner une valeur correcte à l'inertie du système (terme $\frac{L}{gA}$, qui tient compte également de l'inertie de l'eau dans le sas).

7.2.1 Hydrogrammes

Le critère retenu pour le remplissage du sas est de ne pas dépasser une durée de sasement de $T = 10min$.

Dans un premier temps, une simulation avec des vannes de $1,4m$ de largeur est envisagée. Elle demande une ouverture rapide des vannes (125s) provoquant un gradient de débit important résultant en des pentes significatives ($Sw_{max} = 0,73 \text{ ‰}$).

Des essais avec une largeur de vannes augmentée à $1,7m$ (à bords carrés ou chanfreinés) permettent alors une ouverture plus lente des vannes tout en respectant le temps de sasement.

Les résultats du rapport Bousmar (2016) ainsi obtenus avec des tableaux Excel, sont reproduits à l'aide des simulations d'ALFREDO et LOCKFILL. Les valeurs obtenues sont reprises dans les figures et tableaux (7.2).

Nous observons une très bonne reproduction des résultats réalisés par ALFREDO et LOCKFILL. Les écarts obtenus par ALFREDO (de l'ordre de 1% pour les maxima de débits) peuvent s'expliquer par les imprécisions amenées par la transposition vanne papillons/vannes.

LOCKFILL est légèrement plus proche des données modèles car, comme mentionné précédemment, le programme permet une modélisation des ouvertures à l'aide des vannes. Ces légers écarts n'auront aucune influence significative sur les résultats qui suivront.

Vantelle	Grandeur	ALFREDO	LOCKFILL	MOD 059
RN0 1,4 x 1,0 carré	ouverture	125s	125s	125s
	T(Q=0)	619s	614s	617s
	Q_{max}	$45,85m^3/s$	$46,2m^3/s$	$46,1 m^3/s$
RN0 1,7 x 1,0 carré	ouverture	250s	250s	250s
	T(Q=0)	586s	582s	584s
	Q_{max}	$45,75 m^3/s$	$45,72m^3/s$	$46,0 m^3/s$
RN0 1,7 x 1,0 arrondi	ouverture	167s	167s	167s
	T(Q=0)	610s	607s	606s
	Q_{max}	$49,68 m^3/s$	$49,72m^3/s$	$49,8 m^3/s$
RN0 1,7 x 1,0 arrondi	ouverture	200s	200s	200s
	T(Q=0)	587s	582s	581s
	Q_{max}	$47,25 m^3/s$	$47,707m^3/s$	$47,8 m^3/s$
RN0 1,7 x 1,0 arrondi	ouverture	250s	250s	250s
	T(Q=0)	567s	564s	564s
	Q_{max}	$44,42m^3/s$	$44,68m^3/s$	$44,7 m^3/s$

TABLE 7.2 – Résultats des simulations sur l'écluse d'Ampsin Vb

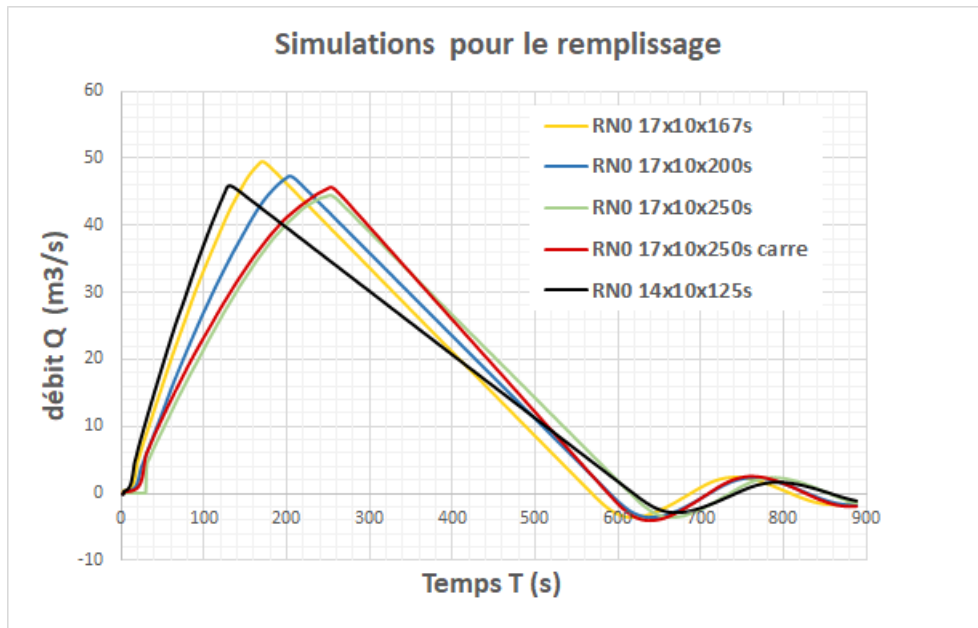


FIGURE 7.2 – hydrogramme ALFREDO

7.2.2 Calcul des pentes

Pour l'étude des pentes d'eau, l'hydrogramme calculé par Bousmar (2016) est injecté dans un modèle de l'écoulement à surface libre dans le sas réalisé

au moyen du logiciel TELEMAC2D. Les pentes sont alors calculées dans l'axe de l'écluse à l'aide des hauteurs d'eau prises aux extrémités amont et aval du sas.

En comparaison, un calcul des pentes est alors réalisé à l'aide d'ALFREDO, en prenant également des points extrêmes amonts et aval du niveau d'eau donnés pour chaque cellule du sas défini par ALFREDO. Nous calculons alors

$$S_w = \frac{h_{aval} - h_{amont}}{l_{sas}} \quad (7.5)$$

Comme expliqué précédemment, LOCKFILL ne permet pas de calculer la pente d'eau dans le sas. Nous pouvons cependant effectuer une comparaison des pentes d'eau avec la composante de force hydrostatique calculée sur un bateau introduit dans le sas, en normalisant celle-ci par le poids du bateau, comme réalisé au chapitre 5. Le calcul des pentes ayant été effectué pour les remplissages RN0 17x10x167s,200s et 14x10x250s, nous présentons les résultats donnés par chacun des programmes aux figures (7.3) à (7.5) et au tableau (7.3).

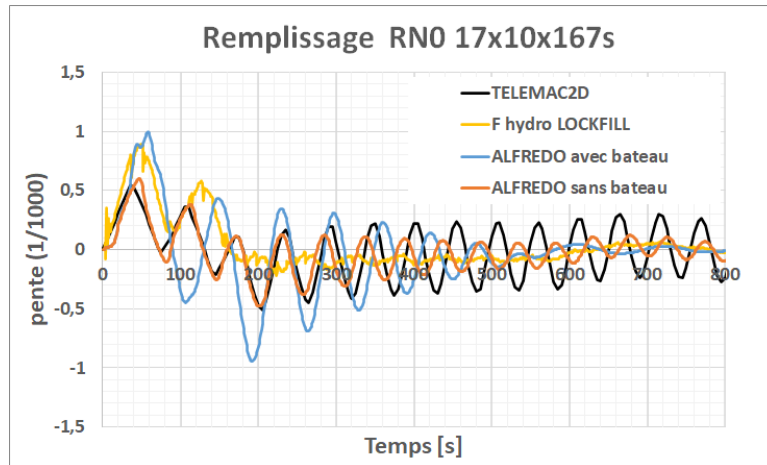


FIGURE 7.3 – pente pour le remplissage 17x10x167s

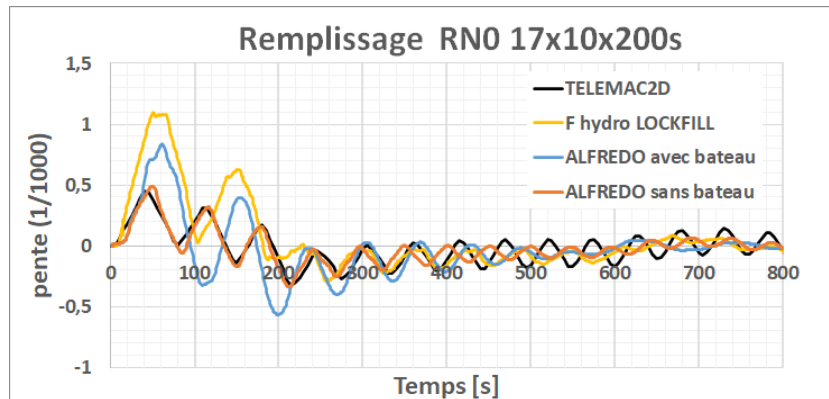


FIGURE 7.4 – pente pour le remplissage RN0 17x10x200s

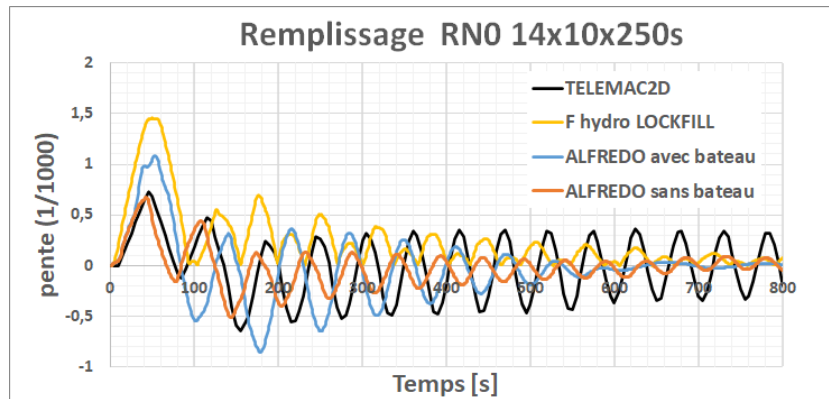


FIGURE 7.5 – pente pour le remplissage 14x10x125s

Nous observons alors les points suivants :

- Si aucun bateau n'est introduit dans le sas, ALFREDO calcule des valeurs de pic très proches de celles données par TELEMAC2D (seul le pic pour RN0 14x10x125s est légèrement sous-évalué).
- La différence est par contre notable lors de l'introduction d'un bateau dans le sas, les valeurs de pentes sont alors beaucoup plus élevées et se rapprochent comme attendu de la valeur de la force hydrostatique calculée par LOCKFILL. Nous en concluons que la présence d'un bateau est un facteur important à prendre en compte dans le calcul de pente avec ALFREDO.
- Nous remarquons finalement que l'amortissement calculé par ALFREDO et LOCKFILL est plus important que celui de TELEMAC2D, ce qui

doit s'expliquer par une plus grande diffusion des modèles numériques d'ALFREDO et LOCKFILL.

pente max S_w ‰	ALFREDO (sans bateau)	ALFREDO (bateau)	LOCKFILL (bateau)	Telemac2d
RN0 14x10x125s	0,62	1,1	1,45	0,73
RN0 17x10x200s	0,47	0,85	1,07	0,45
RN0 17x10x167s	0,60	1,0	0,88	0,55

TABLE 7.3 – Résultats de calcul de pentes d'eau

7.3 Modification de la géométrie des vantelles

La conception finale de l'écluse d'Ampsin Vb utilise finalement un système de remplissage légèrement différent qui demande de compléter les calculs précédents (Bousmar, 2019).

L'écoulement à travers la porte s'opère par un tunnel de même section que la vantelle à pleine ouverture mais les dimensions des vantelles sont désormais fixées à une hauteur de 1,36 m et une largeur de 1,25 m. La section à pleine ouverture est, quant à elle, restée identique.

C'est dans ce cadre qu'un ensemble d'hydrogrammes pour différentes configurations de remplissages ont été calculés à l'aide de tableaux Excel. Les simulations d'ALFREDO et de LOCKFILL permettront ici de confirmer ces hydrogrammes mais également d'ajouter un calcul de pente qui n'a pas pu être réalisé par le SPW par manque de temps. L'introduction d'un bateau de classe Vb dans le sas des écluses permettra également d'effectuer un calcul de force longitudinale.

Les différentes opérations de sasement devront dès lors respecter les deux critères d'acceptabilité suivants :

- temps de sasement plus petit que 10 min.
- pente d'eau plus petite que 0,5 ‰.

7.3.1 Perte de charge

Des simulations (Bousmar, 2019) sont donc réalisées pour un coefficient de débit des vantelles :

- tel qu'il avait été évalué au point précédent, c'est à dire $\mu = 0,65$.
- recalculé à partir de l' Idel'cik (1963 diagramme 3.11) pour une van-telle à ouverture partielle $\zeta = \zeta_{in} + \zeta_{out}$ avec $\zeta_{in} = (1,707 - f)^2 / f^2$ où f est le rapport de la section ouverte sur la section libre et $\zeta_{out} = 1,00$, nous les noterons μ_{var1} .
- également à partir de Idel'cik (1963, diagramme 3.11) mais cette fois avec un $\zeta_{out} = 2,00$, nous les noterons μ_{var2} .

7.3.2 Hydrogrammes

Les résultats obtenus (figure 7.6 et tableau 7.4) concordent parfaitement avec les données du rapport de Bousmar (2019), et ce pour les deux programmes. Les calculs qui suivront ne seront donc pas biaisés par une imprécision dans la valeur du débit d'entrée.

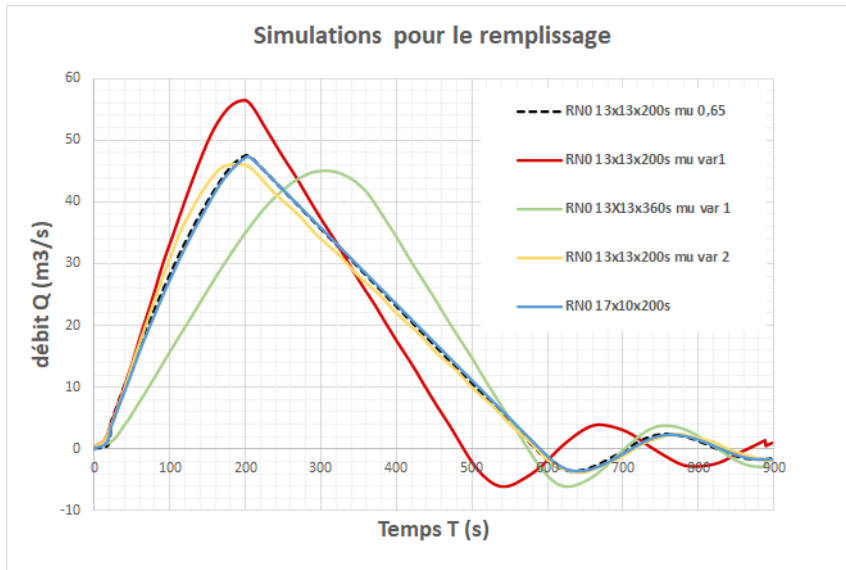


FIGURE 7.6 – hydrogramme ALFREDO LOCKFILL pré-dimensionnement

Vantelle	Grandeur	ALFREDO	LOCKFILL	MOD 059
RN0 1,3x1,3x200s mu 0,65	ouverture	125s	125s	125s
	T(Q=0)	585s	584s	581s
	Q_{max}	47,46 m^3/s	47,85 m^3/s	47,8 m^3/s
RN0 13x13x200s mu var 1	ouverture	250s	250s	250s
	T(Q=0)	489s	487s	490s
	Q_{max}	56,44 m^3/s	56,93 m^3/s	57,1 m^3/s
RN0 1,3x1,3x360s mu var 2	ouverture	167s	167s	167s
	T(Q=0)	574s	579s	574s
	Q_{max}	45,1 m^3/s	45,34 m^3/s	45,4 m^3/s
RN0 1,3x1,3x200s mu var 2	ouverture	200s	200s	200s
	T(Q=0)	586s	587s	586s
	Q_{max}	46,04 m^3/s	46,27 m^3/s	46,4 m^3/s
RN0 1,7 x 1,0x200S	ouverture	250s	250s	250s
	T(Q=0)	588s	586s	581s
	Q_{max}	47,25 m^3/s	47,7 m^3/s	47,8 m^3/s

TABLE 7.4 – Résultats des simulations pour une géométrie modifiée des vantes

7.3.3 calcul des pentes

Nous observons encore une fois que l'introduction d'un bateau dans le sas d'ALFREDO augmente la valeur de pic de la pente d'eau.

En outre, résultat important : la solution proposée à 360s d'ouverture permet de respecter le critère de pente d'eau $< 0,5/1000$ avec ALFREDO. Il est cependant légèrement dépassé par LOCKFILL sans prendre des valeurs critiques. Les autres solutions sont, quant à elles, à exclure car elles dépassent largement le critère d'acceptabilité.

S_w max [‰]	ALFREDO (sans bateau)	ALFREDO (bateau)	LOCKFILL (bateau)
RN0 13x13x200s mu var 1	0,46	0,85	1,2
RN0 13x13x200s mu var 2	0,45	0,85	1,17
RN0 13x13x200s mu 0.65	0,60	0,95	1,09
RN0 13x13x360s mu var 1	0,20	0,4	0,57

TABLE 7.5 – Résultats de calcul de pente avec ALFREDO et LOCKFILL - géométrie modifiée des vantes

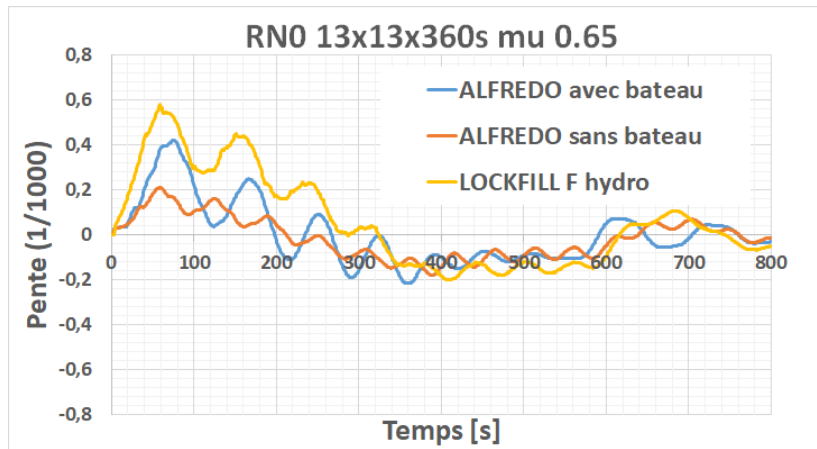


FIGURE 7.7 – pente - 13x13x360s mu 0.65

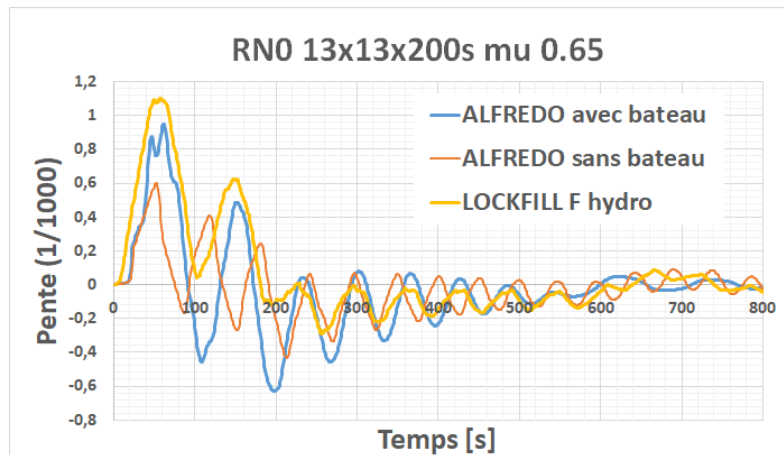


FIGURE 7.8 – pente - 13x13x200s mu 0.65

7.3.4 Introduction d'un bateau dans les simulations - calcul des efforts sur le bateau

Pour le calcul des efforts lors de ces opérations de remplissage, nous allons introduire dans le sas un bateau de classe CEMT Vb (longueur de 185m, largeur de 11,40 m, masse de 6000 tonnes)

Force longitudinale totale

Nous observons que la solution avec une ouverture en 360s est la seule qui respecte le critère d'acceptabilité (plus petit que 1 ‰) et ce pour LOCKFILL et ALFREDO, ce qui n'est pas le cas des autres solutions avancées.

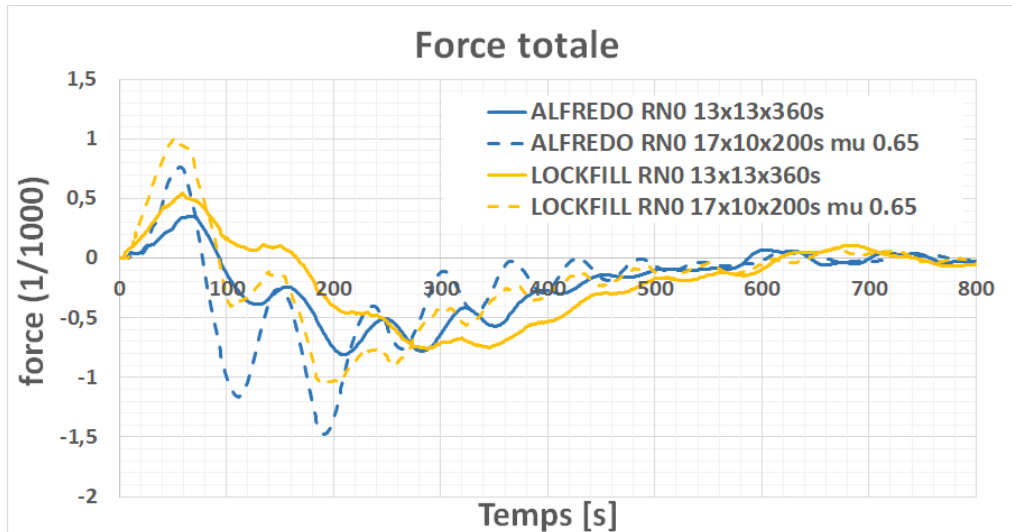


FIGURE 7.9 – Force longitudinale totale ALFREDO-LOCKFILL

$F_{totalemax}$	ALFREDO	LOCKFILL
RN0 13x13x360s mu var 2	-0.8	-0.8
RN0 13x13x200s mu var 2	-1.9	-1.1
RN0 13x13x200s mu var 1	-2.3	-1.45
RN0 13x13x200s mu 0.65	-2.2	-1.0
RNO 17x10x200s mu 0.65	-2.02	-1.05

TABLE 7.6 – Force longitudinale totale ALFREDO-LOCKFILL pour géométrie modifiée des vanelles

Composante hydrostatique

Nous observons un pic négatif plus prononcé dans l'évaluation de cette composante par ALFREDO. On peut avancé l'explication retenue dans les sections précédentes, qui mentionne que ce pic provient de l'évaluation de la pente du bateau qui s'avère être légèrement surévaluée lors du remplissage du sas.

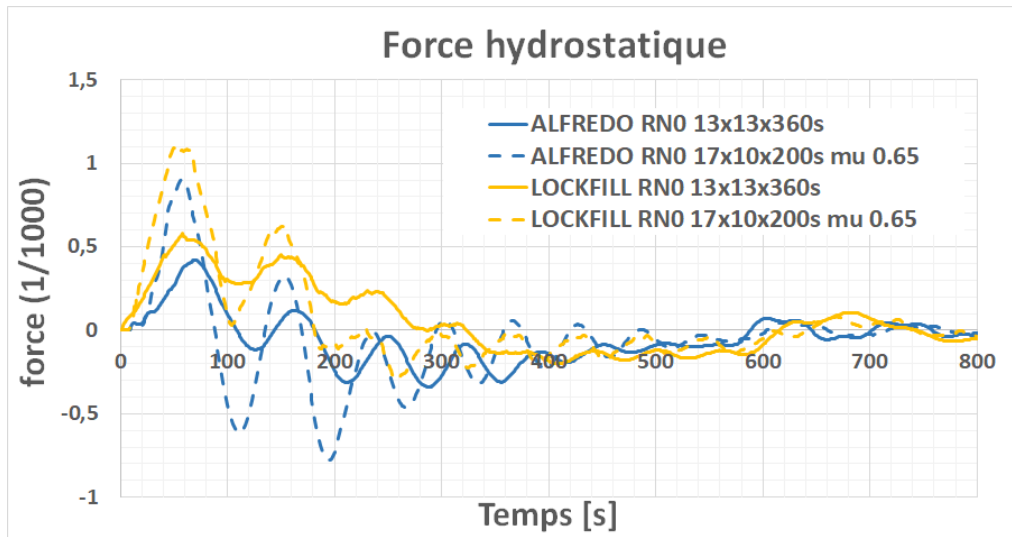


FIGURE 7.10 – Composante hydrostatique ALFREDO-LOCKFILL

$F_{hydrostatique}$	ALFREDO	LOCKFILL
RN0 13x13x200s mu var 2	-1.45	1.2
RN0 13x13x200s mu var 1	-1.4	1.2
RN0 13x13x200s mu 0.65	-1.5	1.1
RN0 13x13x360s mu var 2	0.42	0.57
RNO 17x10x200s mu 0.65	-1.3	1.09

TABLE 7.7 – Force hydrostatique ALFREDO-LOCKFILL pour une géométrie modifiée des vantelles

Composante de décroissance d'impulsion

Nous remarquons que LOCKFILL évalue plus fortement cette composante d'impulsion. L'écart peut s'expliquer comme présenté dans les sections précédentes, par le volume de contrôle défini sur la coque.

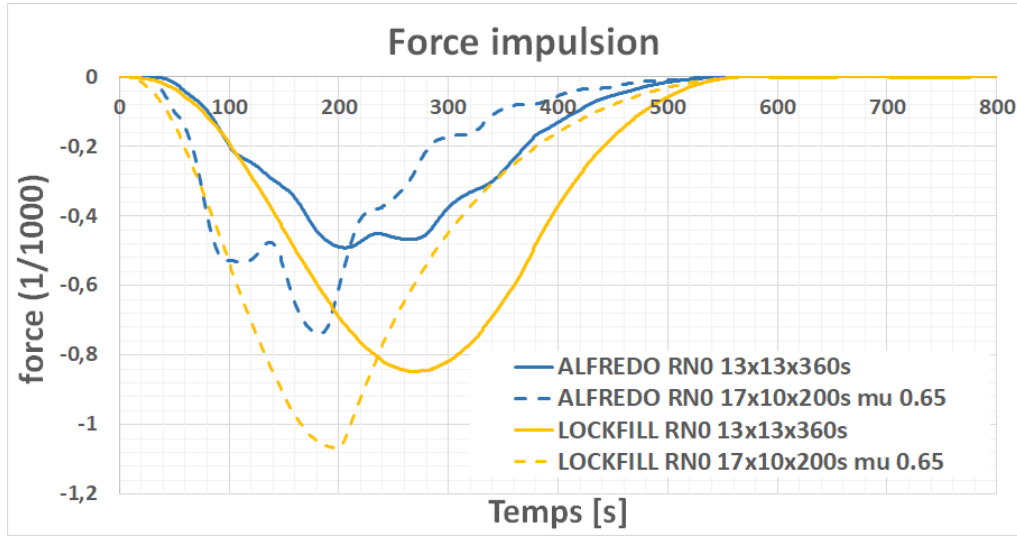


FIGURE 7.11 – composante d'impulsion ALFREDO-LOCKFILL

$F_{impulsion}$	ALFREDO	LOCKFILL
RN0 13x13x200s mu var 2	-0.7	-1.45
RN0 13x13x200s mu var 1	-0.9	-1.5
RN0 13x13x360s mu var 2	-0.5	-0.83
RNO 17x10x200s mu 0.65	-0.8	-1.07
RN0 13x13x200s mu 0.65	-1.0	-1.07

TABLE 7.8 – Force impulsion ALFREDO-LOCKFILL pour une géométrie modifiée des vanelles

Composante de friction

Comme lors des simulations effectuées sur le modèle de Lanaye, nous introduisons des rugosités équivalentes pour les deux programmes (0,00025m pour la surface du bateau et 0,001625 m pour la surface du sas). Nous remarquons que l'effort reste encore une fois négligeable dans l'évaluation de la force longitudinale totale mis en comparaison de l'apport de la composante hydrostatique et de la composante de décroissance d'impulsion. Nous noterons encore une fois que le résultat de LOCKFILL évalue une force de friction plus élevée que celle d'ALFREDO.

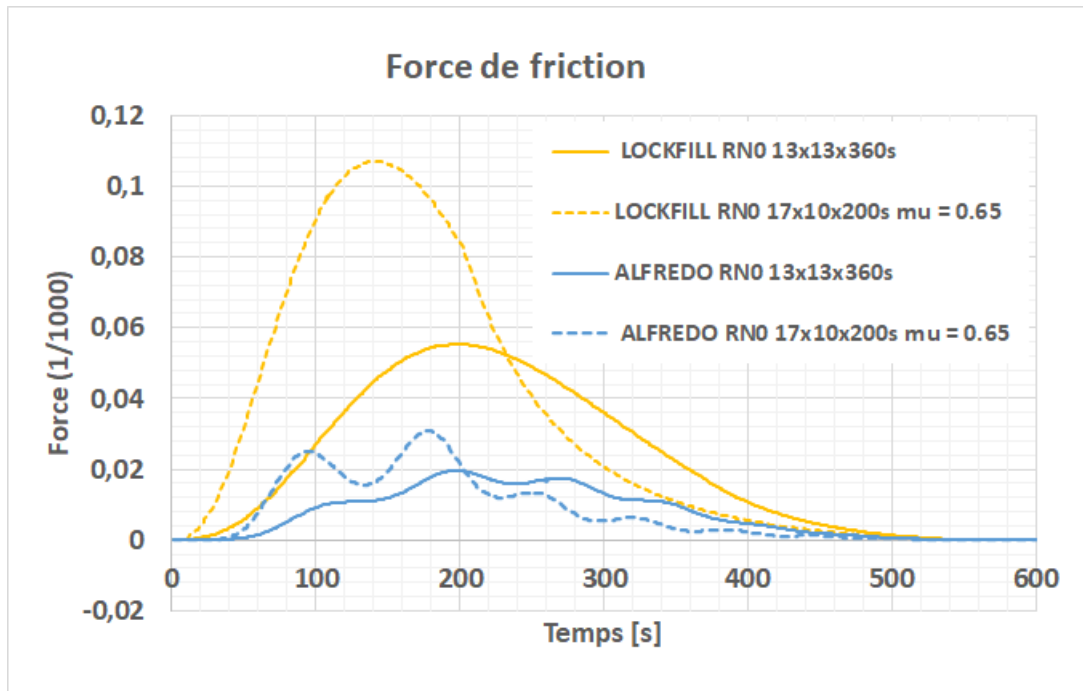


FIGURE 7.12 – Composante de friction ALFREDO-LOCKFILL

$F_{friction}$	ALFREDO	LOCKFILL
RN0 13x13x360s mu var 2	0.012	0.11
RN0 13x13x200s mu var 2	0.017	0.18
RN0 13x13x200s mu var 1	0.021	0.22
RN0 13x13x200s mu 0.65	0.09	0.16
RN0 17x10x200s	0.018	0.16

TABLE 7.9 – Force de friction ALFREDO-LOCKFILL pour une géométrie modifiée des vannes

Effet dû au jet de remplissage

Comme expliqué au chapitre 3, un remplissage s'effectuant directement à travers les portes de l'écluse implique une composante due au jet de remplissage qui vient heurter le bateau. Après simulation avec LOCKFILL du remplissage RN0 1,3x1,3x360S en incluant cette composante de jet, nous observons que celle-ci a une importance significative sur la force totale. Le pic positif atteint par LOCKFILL est alors de 0,92 ‰ contre 0,4 ‰ pour ALFREDO. La solution en ouverture des vannes en 360s pour un coefficient de

débit tel que $\zeta_{out} = 2,00$ reste cependant acceptable ($F_{tot} < 1\text{‰}$).

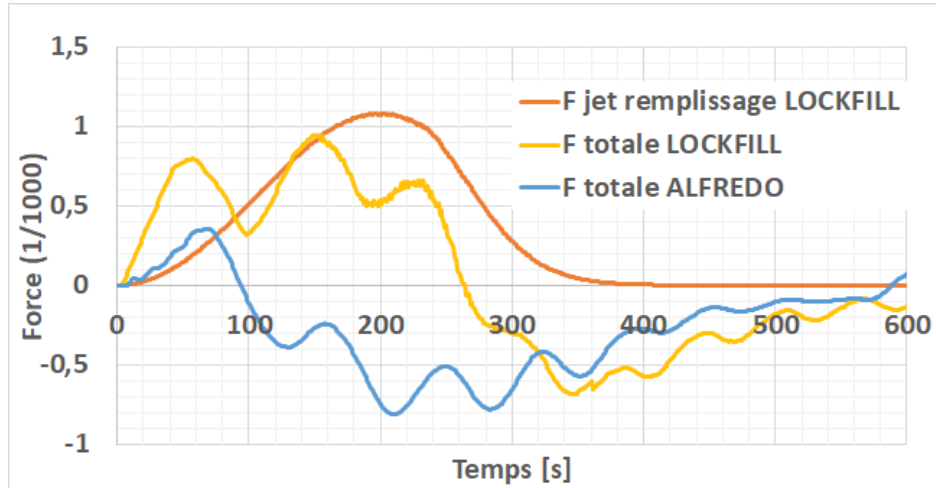


FIGURE 7.13 – RN0 1,3x1,3x360s mu var 2 composante jet de remplissage - LOCKFILL

Nous pouvons donc conclure qu'ALFREDO, pour pouvoir traiter correctement des remplissages directement au travers des portes, ne peut pas se passer d'une évaluation de la composante due au jet de remplissage. Une implémentation de cette dernière dans le code d'ALFREDO serait donc bienvenue pour compléter son algorithme.

Chapitre 8

Conclusion

Dans un premier temps, nous nous sommes occupé à rendre le code d'ALFREDO fonctionnel en supprimant les instabilités causées par une mauvaise évaluation du coefficient de Boussinesq.

Nous avons par la suite constaté, au niveau des simulations d'écoulements que :

- Pour l'écoulement à travers les conduites d'alimentation, ALFREDO et LOCKFILL utilisent tous deux la même équation. Une fois les pertes de charge et lois d'ouvertures implémentées de façon identique pour les deux programmes, des hydrogrammes et limnigrammes semblables sont obtenus. Ceux-ci sont en adéquation avec les mesures effectuées in-situ et en laboratoire.
- Pour l'écoulement dans le sas, on a constaté qu'ALFREDO utilise les équations de Saint-Venant tandis que LOCKFILL considère une ligne d'eau horizontale. LOCKFILL doit donc utiliser une variation linéaire du débit le long du sas et calculer la pente d'eau de façon théorique à partir de l'onde d'eau. ALFREDO permet, quant à lui, une utilisation directe des solutions de Saint-Venant dans chaque cellule de discrétisation du sas pour évaluer ces deux paramètres. Nous avons alors constaté qu'un pic de débit plus élevé pouvait survenir pour ALFREDO en fin d'ouverture du fait des oscillations de l'eau dans le sas.

Les simulations nous ont alors permis de constater que le calcul de pente d'eau effectué à partir des résultats d'ALFREDO :

- Évalue correctement la fréquence d'oscillation.

- Évalue également de manière précise le premier pic positif de pente d'eau.
- Évalue précisément le pic négatif de pente d'eau si aucun bateau n'est placé dans le sas, peut cependant surévaluer ce pic si un bateau est introduit dans le sas, tout en gardant une allure correcte par rapport aux mesures in-situ ou laboratoires.

Pour LOCKFILL, aucun résultat de pente d'eau n'est disponible, il faut alors se référer au calcul de force hydrostatique, celui-ci possède une allure globale qui correspond bien aux mesures, avec cependant une surévaluation du premier pic positif.

Si nous observons maintenant le calcul des forces s'exerçant sur le bateau lors des opérations de sassement, nous pouvons tirer les conclusions suivantes :

- La composante de force hydrostatique peut voir son pic négatif surévalué par ALFREDO, essentiellement dû à une inclinaison trop importante du bateau dans le sas.
- La composante de décroissance d'impulsion diffère de LOCKFILL du fait que les volumes de contrôle utilisés dans la formule d'Euler ne sont pas identiques, un volume de contrôle appliqué à la coque manquant à ALFREDO. Nous remarquons aussi qu'une surévaluation de Q_{sas} dans les premoères cellules du sas d'ALFREDO peut entraîner un léger écart.
- Si nous voulons simuler un remplissage directement par les portes, alors il manque à ALFREDO une composante due au jet de remplissage, cette composante n'est pas négligeable dans le calcul de la force totale, comme montré par les résultats donnés par LOCKFILL.
- Les forces de friction sont négligeables dans le calcul de la force totale, LOCKFILL et ALFREDO n'implémente pas les même équations pour le calcul de cette composante, les résultats données par LOCKFILL étant toujours plus élevés que ceux d'ALFREDO.
- Ces constatations amènent à un calcul de force totale qui possède un premier pic positif identique entre ALFREDO et LOCKFILL, coïncidant avec les mesures in-situ, et une surévaluation du pic négatif par ALFREDO, provenant des écarts amenés par la composante hydrostatique et la composante due à la décroissance d'impulsion.

Nous pouvons donc imaginer que des travaux futurs devraient pour compléter ce mémoire traiter des points suivants :

- Effectuer un calcul précis du coefficient de Boussinesq au niveau du bateau et dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement.
- Compléter le calcul de force due à la décroissance d'impulsion de l'eau en prenant en compte un troisième volume de contrôle appliqué à la coque du bateau.
- Vérifier le tangage du bateau et la surévaluation de la force hydrostatique qui en découle.
- Ajouter une évaluation de la composante de fore due au jet de remplissage dans ALFREDO pour une évaluation précise en cas de remplissage directement à travers les portes.
- Effectuer des mesures laboratoires des efforts de friction s'appliquant sur une barge lors d'opérations de sassement, et ce afin de trancher sur l'exactitude ou pas des résultats d'ALFREDO et de LOCKFILL.

Bibliographie

Beem, R. C. A., Boogaard, A., Glerum, A., de Graaf, M. A., Henneberque, S. D., Hiddinga, P. H., Kranenburg, D., van der Meer, M. T. J., Nagtegaal, G., Van der Paverd, M., Smink, L. M. C., Vrijburcht, A., et Weijers, J. (2000), *Design of locks*. Ministry of Transport, Public Works and Water Management. Civil Engineering Division, Utrecht.

Bousmar, D., Heinz, T. et Christiaens, D. (2013), *Experimental investigation of mooring forces in an inland navigation lock : comparison between through the head and longitudinal filling systems*. Third International Conference on Ship Manoeuvring in Shallow and Confined Water, Ghent, Belgium

Bousmar, D. (2016). *MOD. 059, Nouvelle écluse d'Ampsin-Neuville, Etude du sasement de l'écluse Vb*, Direction des recherches hydrauliques, Service Public de Wallonie (SPW), Châtelet, Belgique.

Bousmar, D. et Libert, Y. (2016), *Liaison Seine-Escaut Est. Ecluses d'Havré, Pommeroeul et Hensies. Détermination des lois de sasement*, Mod. 058/10, Rapport final, SPW-DO.222.

Bousmar, D. (2018), *AUCE 2152 : Cours d'ouvrages d'art hydrauliques*. Université Catholique de Louvain - EPL, Belgique.

Bousmar, D. et Libert, Y. (2018), *Mod 075 / Capacité d'évacuation des crues à Marchienne, Gosselies et Viesville*, Direction des recherches hydrauliques, Service Public de Wallonie (SPW), Châtelet, Belgique.

Bousmar, D. (2019), *MOD. 059 Nouvelle écluse d'Ampsin-Neuville Etude du sasement de l'écluse Vb Modification de la géométrie des vantelles*, Direction des recherches hydrauliques, Service Public de Wallonie (SPW), Châtelet, Belgique.

Christiaens, D. (2015), *Evaluation of the mooring forces acting on a vessel in a navigation lock acting on a vessel in a navigation lock*. Université Catholique de Louvain, Belgique.

Christiaens¹, D., Bousmar², D. et Soares-Fraza¹, S. (2014), *Simplified numerical model of a navigation lock levelling with a ship in the lock chamber*, 1 Université catholique de Louvain, Institute of Mechanics, Materials

and Civil Engineering, Belgique et 2 Service Public de Wallonie, Hydraulic Research Laboratory, Belgique, , PIANC Congress San Francisco, USA 2014

De Loor, A., Weiler, O., Kortlever, W. (2013), *LOCKFILL – a mathematical model for calculating forces on a ship while levelling through the lock head*, Proceedings of the PIANC-Smart Rivers conference, Liege, Belgium, Maastrich, the Nederland

Glerum, A., Vrijburch, A. (2000), *Design of Locks*, Bouwdienst Rijkswaterstaat, the Netherlands

Heinz, T., (2013), *Mesure sur modèle réduit des efforts d'amarrage lors du remplissage d'une écluse Comparaison entre une alimentation par contournement des têtes et par aqueduc larron.*, Université Catholique de Louvain, Belgique.

Idel'cik, I.E. (1969). *Mémento des pertes de charge*. Eyrolles, Paris.

K. Verelst¹, J. Vercruysse¹, T. De Mulder² (2018), *Comparison of software for computation of longitudinal forces on a ship in a lock chamber during levelling with openings in the lock gate*, 1Flanders Hydraulics Research, Antwerp, Belgium 2 Hydraulics Laboratory, Department of Civil Engineering, Ghent University, Ghent, Belgium

LOCKFILL, (2016), *User technical manual version 0.00*, Deltares, 2600 MH Delft, Netherlands.

LRH (1954). *Canal de Charleroi à Bruxelles. Vannes de la tête amont de l'écluse 1F. Mod. 123bis*, Rapport, Borgerhout-Anvers.

Machiels, O., (2008), *Analyse théorique et numérique de l'influence de la formulation des termes de production et de dissipation dans les équations d'écoulement à surface libre (TFE)*, Université de Liège -Faculté des sciences appliquées, Belgique.

Savary, C., Bousmar, D., Zorzan, G., Libert, Y., (2016) *Mod. 058/6 – SEE Etude du système de remplissage des nouvelles écluses – Mesures hydrauliques in situ Ecluse de Roselies - Rapport final*, Service Public de Wallonie, Département des études et de l'appui à la gestion, direction des recherches hydrauliques, Châtelet, Belgique.

Service Public Fédéral (SPF) Mobilité et Transport, (2019), *Le réseau belge des voies navigables* tiré de <https://mobilité.belgium.be>, consulté le 16/12/2019

Service Public de Wallonie (SPW), (2019), *Les classes CEMT*, <http://voies-hydrauliques.wallonie.be>, consulté le 5/03/2020

Soares-Frazão, S., (2019), *LG CIV 2053 : cours d'Hydraulique fluviale*, Ecole Polytechnique de Louvain, Belgique.

Soares-Frazão, S., Christiaens, D., Dubois, N., Contino, F. (2013), *Mod. 059 – Ecluse 225 m × 25 m d'Ampsin-Neuville : Assistance à l'étude par modélisation physique et numérique du système d'alimentation en eau du sas.*, pôle de Génie Civil et Environnemental de l'Université catholique de Louvain (UCLGCE), Belgique

Vrijbrucht, A., Haas, R.G., (1988), Het vulproces van een schutsluis met een langsvulstelsysteem, Waterloopkundig Laboratorium.

Annexe A

Modification du code d'ALFREDO

Une première difficulté fut dans un premier temps de trouver un compilateur qui supporte les fichiers fortran d'ALFREDO. Notre choix fut porté sur Microsoft Visual Studio (version 2017). Une fois le code en état de fonctionner, les modifications suivantes y furent apposées.

A.0.1 Modification du coefficient de Boussinesq

Les modifications apportées aux coefficients de Boussinesq se trouvent dans le fichier d'ALFREDO qui s'occupe du calcul des forces sur le bateau "Forces.for". Un coefficient de Boussinesq (variable "beta") égale à $5/3$ est introduit à la ligne 74 en lieu et place de l'ancien coefficient codé par $\beta(i) = h_{sas}(i)/(0.11)$

```
do i = 1, ndx
  if (i<flag1)then
    ! beta(i) = hsas(i)/(0.11)
    beta(i) = 5/3
    !beta(i) = 2
    !beta(i) = 4/3
  else
    beta(i) = hsas(i)/((hsas(i)-he(i)))
  endif
enddo
```

L'opération est ensuite répétée dans le fichier "VolumesfinisShip1D.for" qui contient l'ensemble des routines liées au calcul de la ligne d'eau par volumes finis avec prise en compte de la présence d'un convoi dans

Annexe B

Coefficient de perte de charge vanne Hanrez 1B

Partons des deux relations suivantes

$$\Delta H = \frac{Q^2}{12510C_f D^2)^2 / 3600} \quad (\text{B.1})$$

relation qui nous est donnée par la fiche du constructeur de la vanne.

$$\Delta H = \frac{\zeta Q^2}{2gA^2} \quad (\text{B.2})$$

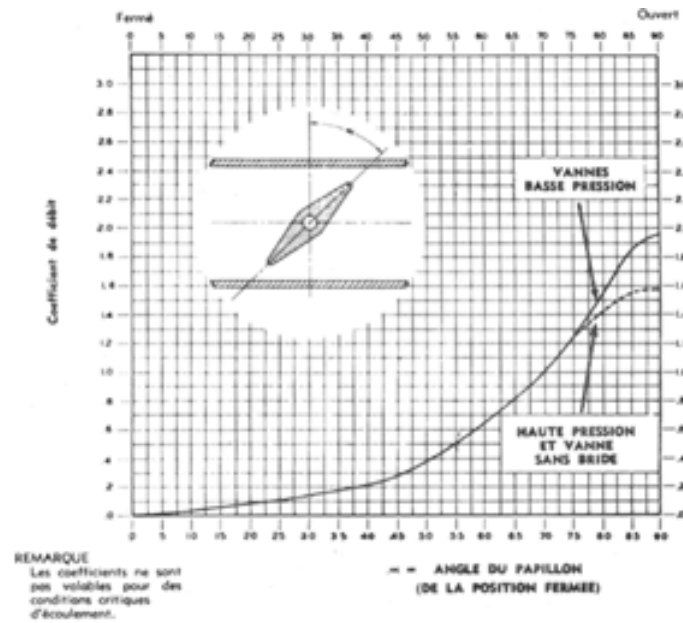
est la relation tirée de l'équation de Bernouilli.

En égalisant les termes de droites, et en sachant que $A = \frac{\pi D^2}{4}$ nous pouvons isoler le coefficient de perte de charge

$$\zeta = \frac{(2g \frac{\pi^2}{16} 3600^2)}{12510C_f)^2} \quad (\text{B.3})$$

Avec C_f un coefficient de débit qui nous est donné par le constructeur

ANNEXE B. COEFFICIENT DE PERTE DE CHARGE VANNE HANREZ 1B



angle d'ouverture [°]	C_f basse pression	C_f haute pression	ζ basse pression	ζ haute pression
0	0.0001	0.0001	100223403.037	100223403.037
10	0.04	0.04	626.396	626.396
20	0.1	0.1	100.223	100.223
30	0.150	0.150	44.543	44.543
40	0.220	0.220	20.707	20.707
50	0.380	0.380	6.941	6.941
60	0.650	0.650	2.372	2.372
70	1	1	1.002	1.002
80	1.400	1.550	0.511	0.417
90	1.590	1.900	0.396	0.277

Annexe C

Calcul du coefficient de Boussinesq

Le terme d'énergie cinétique étant calculé comme le carré de la vitesse moyenne et non la moyenne des vitesses au carré, un terme correctif doit y être apposé.

Ce terme, appelé coefficient de Boussinesq dépend de la distribution spatiale de vitesse dans l'écoulement et se calcule par la formule suivante :

$$\beta = \frac{\iint_A v^2 dA}{A V^2} \quad (C.1)$$

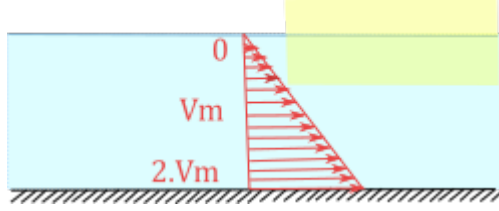
On considerera le profil de vitesse constant sur la largeur du sas, on peut donc se limiter à intégrer en 1 dimension sur la hauteur du sas h_{sas} :

$$\beta = \frac{\int v(y)^2 dy}{h_{sas} V_{sas}^2} \quad (C.2)$$

C.0.1 Répartition triangulaire de la vitesse

Soit V_{sas} la valeur de la vitesse moyenne, h_{sas} la hauteur d'eau dans le sas. Imaginons un cas extrême ou la vitesse de l'eau serait nulle au niveau de la surface libre (bloquée par le bateau) et maximum au niveau du sas (accélération sous la coque). On peut exprimer le profil de vitesse selon la hauteur y comme suit :

$$v(y) = 2V_{sas} - \frac{2V_{sas}}{h_{sas}}y \quad (C.3)$$



le numérateur du coefficient de Boussinesq s'intègre de la manière suivante

$$\int_{y=0}^{y=h_{sas}} v(y)^2 dy \quad (C.4)$$

$$= \int_{y=0}^{y=h_{sas}} \left(2V_{sas} - \frac{2V_{sas}}{h_{sas}}y\right)^2 dy \quad (C.5)$$

$$= \int_{y=0}^{h_{sas}} 4V_{sas}^2 - 8\frac{V_{sas}^2}{h_{sas}}y + 4\frac{V_{sas}^2}{h_{sas}^2}y^2 dy \quad (C.6)$$

$$= [4V_{sas}^2 y]_0^{h_{sas}} - [4\frac{V_{sas}^2}{h_{sas}}y^2]_0^{h_{sas}} + [\frac{4}{3}\frac{V_{sas}^2}{h_{sas}^2}y^3]_0^{h_{sas}} \quad (C.7)$$

$$= 4V_{sas}^2 h_{sas} - 4\frac{V_{sas}^2 h_{sas}^2}{h_{sas}} + \frac{4}{3}\frac{V_{sas}^2}{h_{sas}^2}h_{sas}^3 \quad (C.8)$$

$$= \frac{4}{3}V_{sas}^2 h_{sas} \quad (C.9)$$

$$\rightarrow \beta_{triangulaire} = \frac{\int_{y=0}^{y=h_{sas}} v(y)^2 dy}{V_{sas}^2 h_{sas}} = \frac{4}{3} \quad (C.10)$$

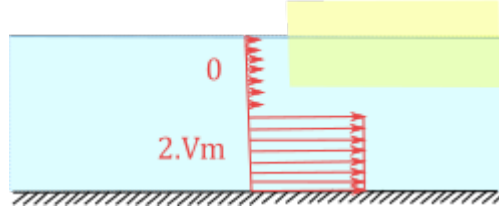
C.0.2 Répartition uniforme de la vitesse sur la moitié de la hauteur du sas

La deuxième borne que l'on peut donner à β se trouve en intégrant un profil de vitesse uniforme sur la moitié inférieure du sas et nul sur la moitié supérieure.

$$v(y) = \begin{cases} 0 & \text{si } y > \frac{h_{sas}}{2} \\ 2V_{sas} & \text{si } y < \frac{h_{sas}}{2} \end{cases} \quad (C.11)$$

l'intégrale se résout simplement et vaut

$$\frac{4V_{sas}^2 h_{sas}}{2} \quad (C.12)$$



$$\rightarrow \beta_{moitie} = \frac{\int_{y=0}^{y=h_{sas}/2} v(y)^2 dy}{V_{sas}^2 h_{sas}} = \frac{4}{2} = 2 \quad (C.13)$$

C.0.3 Conclusion

Nous avons donc trouver deux bornes pour les valeurs du coefficient de Boussinesq pour le calcul de l'énergie cinétique de l'eau

β_{min}	$\frac{4}{3}$
β_{max}	2

Annexe D

Ecoulement à travers les conduites d'alimentation

D.0.1 Ecoulements permanents

La conservation de l'énergie d'un fluide en mouvement nous amène à l'équation de Bernouilli qui permet de définir la charge hydraulique, soit l'énergie mécanique par poids du fluide :

$$H_i = z_i + \frac{p_i}{\rho g} + \frac{v_i^2}{2g} \quad (\text{D.1})$$

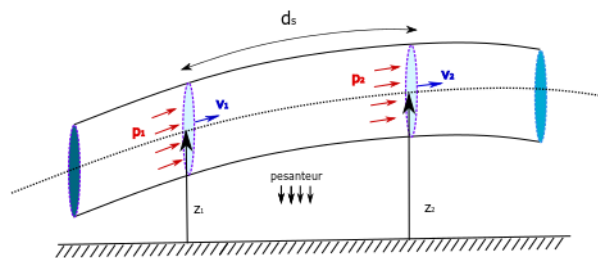


FIGURE D.1 – flux d'un fluide homogène

pour les écoulements permanents on a :

$$\frac{dH}{ds} = 0 \quad (\text{D.2})$$

L'équation de Bernouilli entre les points 1 et 2 s'écrit

$$H_1 = H_2 \quad (\text{D.3})$$

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} \quad (D.4)$$

Si maintenant on prends en compte les pertes de charge de la conduite d'alimentation entre le point 1 et le point 2 on trouve :

$$\frac{dH}{ds} = -j \quad (D.5)$$

où j est la perte de charge par unité de longueur. On a alors comme équation entre les points 1 et 2 :

$$z_1 + \frac{p_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} = z_2 + \frac{p_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + \zeta \frac{v_2^2}{2g} \quad (D.6)$$

où $\zeta \frac{v_2^2}{2g} = -j$ est la perte de charge entre les points 1 et 2 , ζ est le coefficient de perte de charge qui prend en compte les frottements dans les éléments de la conduite mais aussi les singularités de conduites (coudes, etc).

D.0.2 Ecoulements non-permanents : équation de conduite

Pour exprimer l'écoulement non-permanent dans une conduite, on part de la première loi de Newton

$$m \frac{dv}{dt} = \Sigma F_x \quad (D.7)$$

$$\rho AL \frac{dv}{dt} = \Sigma F_x \quad (D.8)$$

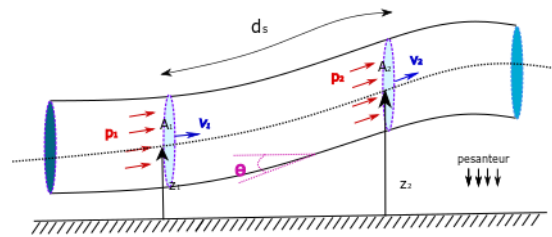


FIGURE D.2 – écoulement non permanent

si on développe ΣF_x :

- force due à la pression : $p_1A - p_2A$
 - composante de poids du flux : $mg\sin\theta = (\rho AL)g\frac{z_1-z_2}{L}$
 - friction des murs : $\tau\pi DL$ est la contrainte de friction
- L'équation devient :

$$\rho AL \frac{dv}{dt} = (p_1 - p_2)A + (\rho AL)g\frac{z_1 - z_2}{L} - \tau\pi DL \quad (D.9)$$

en divisant par ρAg et sachant que $v = \frac{Q}{A}$

$$\frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} = \frac{(p_1 - p_2)}{\rho g} + (z_1 - z_2) - \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (D.10)$$

$$\frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} = H_1 - H_2 - \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (D.11)$$

$$\Delta H = \frac{L}{gA} \frac{dQ}{dt} + \zeta \frac{v^2}{2g} \quad (D.12)$$

On obtient ainsi l'équation de conduite utilisée pour simuler l'écoulement au travers des aqueducs de contournement des têtes dans ALFREDO et LOCKFILL.

D.1 Ecoulement dans le sas - Les équations de Saint-Venant

Dans les paragraphes suivants sont repris les équations de Saint-Venant telles que développées par Christiaens (2014). Elles décrivent l'écoulement en eau peu profonde et en surface libre, condition dans laquelle se trouve l'eau dans le sas d'une écluse par exemple.

D.1.1 Equation de continuité

L'équation de continuité exprime la conservation de la masse lors de l'écoulement d'un fluide. Elle s'interprète comme le fait que la masse entrante dans un volume de contrôle sur un temps Δt vaut la masse sortante augmentée de l'accumulation de masse au sein du volume de contrôle :

$$\frac{dm}{dt} = dm_2 - dm_1 \quad (D.13)$$

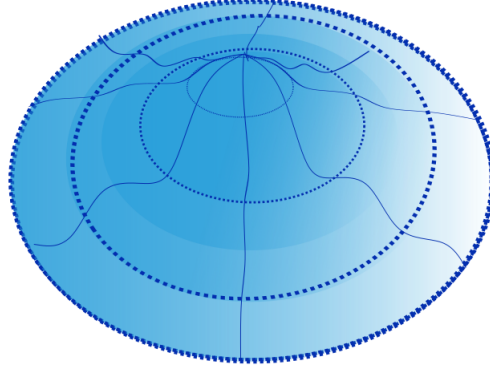


FIGURE D.3 – onde en surface libre - illustration

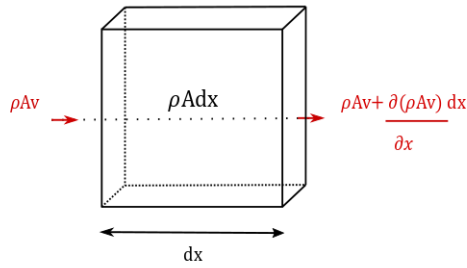


FIGURE D.4 – volume de contrôle

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} V = (\rho A v_x + \frac{\partial}{\partial x}(\rho A v_x) dx) - \rho A v_x \quad (D.14)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} V = \frac{\partial}{\partial x}(\rho A v_x) dx \quad (D.15)$$

or $V = A \times dx$ et $v_x = \frac{Q}{A}$ on a donc finalement

$$\boxed{\frac{\partial A}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} = 0} \quad (D.16)$$

D.1.2 Equation de quantité de mouvement

On exprime ici la conservation de la quantité de mouvement dans la direction longitudinale x , sous forme Lagrangienne (utilisation

de la dérivée matérielle) :

$$F_x = \frac{D(mv_x)}{D_t} \quad (\text{D.17})$$

Où le membre de gauche F_x représente l'ensemble des forces longitudinales s'exerçant sur un volume de contrôle comprenant :

- La différence de pression hydrostatique des deux côtés du volume.

$$F_p = F_{p,2} - F_{p,1} = -\frac{\partial}{\partial x}(\rho g I_1)dx = -\rho g A \frac{\partial h}{\partial x}dx - \rho g I_2 dx \quad (\text{D.18})$$

Où I_1, I_2 sont les moments des sections respectivement de début et fin du volume de contrôle.

$$I = \int_0^h (y - y_g)b(y_g)dy \quad (\text{D.19})$$

- Composante longitudinale de la pression hydrostatique qui s'exerce sur les faces latérales du volume de contrôle.

$$F_{(p,lat)} = (\rho g I_2)dx \quad (\text{D.20})$$

- La composante longitudinale de la force gravitationnelle.

$$F_G = (\rho g A)dx S_0 \quad (\text{D.21})$$

Où S_0 est la pente de fond du sas de l'écluse.

- Les forces de friction :

$$F_f = \rho g A S_f dx \quad (\text{D.22})$$

avec $S_f = \frac{n^2 V^2}{R^{\frac{4}{3}}}$ où n est le coefficient de Manning du sas, $R = \frac{A}{P}$ est le rayon hydraulique.

Le membre de droite de l'équation (1) peut être développé en explicitant le débit et l'aire du volume de contrôle comme suit, sachant que $m = \rho A dx$ et $V = \frac{Q}{A}$:

$$\frac{D}{D_t}(mV_x) = \rho g \left(\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\beta) \frac{Q^2}{A} \right) \quad (\text{D.23})$$

Avec $\beta = \frac{\int u^2 dA}{V^2 A}$ le coefficient de Boussinesq qui tient compte de la non-uniformité de la distribution de vitesse sur la hauteur de section, V est la vitesse moyenne et u la composante

longitudinale du vecteur de vitesse. En égalant la somme des forces longitudinales à l'expression développée ci-dessus, on finit par exprimer la conservation de la quantité de mouvement par l'équation suivante :

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\beta \frac{Q^2}{A} + gI_1 \right) = gA(S_0 - S_f) + gI_2 \quad (\text{D.24})$$

D.1.3 Expression sous forme vectorielle

On peut exprimer les deux équations de continuité et de quantité de mouvement sous forme vectorielle :

$$\boxed{\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F(U)}{\partial x} = S(U)} \quad (\text{D.25})$$

avec

$$U = \begin{pmatrix} A \\ Q \end{pmatrix}, F(U) = \begin{pmatrix} Q \\ \frac{Q^2}{A+gI_1} \end{pmatrix}, S(U) = \begin{pmatrix} 0 \\ gA(S_0 - S_f) + gI_2 \end{pmatrix} \quad (\text{D.26})$$

D.1.4 Introduction du bateau dans le sas de l'écluse

L'introduction d'un bateau dans le sas de l'écluse va engendrer une modification des équations de Saint-Venant, tout d'abord par la modification de la section d'aire mouillée :

Pour une section de l'écluse où il n'y a pas de présence du bateau on avait

$$A_{mouille} = b_k \times h_w \quad (\text{D.27})$$

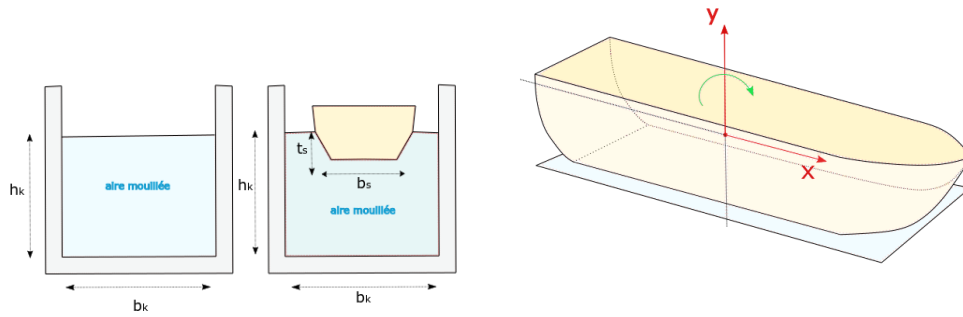
où h_w est la hauteur d'eau et b_k est la largeur de l'écluse tandis que la présence du bateau amène à :

$$A_{mouille} = b_k \times h_w - t_s \times b_s \quad (\text{D.28})$$

avec b_s qui représente la largeur du bateau et t_s son enfoncement. On aura également une modification des termes I_1 et I_2 introduits précédemment. Il faudra alors introduire une équation (équations par degré de liberté donné au bateau dans la modélisation. Pour une modélisation en 2D, on aura (Christiaens, 2014) :

ANNEXE D. ECOULEMENT À TRAVERS LES CONDUITES D'ALIMENTATION

- une équation de tangage ("pitching")
- une équation de soulèvement ("heaving")
- et une équation de levée ("surging").



(a) Aire mouillée avec/sans bateau (b) représentation des trois degrés de liberté utiles pour un modèle 2D

Annexe E

Formule d'Euler

La formule d'Euler permet de calculer la réaction de l'eau sur un élément, elle sera utilisée dans le calcul des forces s'exerçant sur le bateau. Elle s'obtient en développant la première loi de Newton (ici dans la direction longitudinale) sur un volume de contrôle, on a :

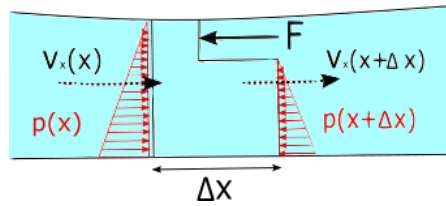


FIGURE E.1 – volume de contrôle pour la formule d'Euler

$$\Sigma F_x = m.a_x \quad (\text{E.1})$$

On peut développer le membre de droite d'accélération pure :

$$\rightarrow m.a_x = \rho dV \left(\frac{dv_x}{dt}(x, t) \right) \quad (\text{E.2})$$

$$= \rho dV \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} \right) \quad (\text{E.3})$$

$$= \rho dV \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + \frac{\partial v_x}{\partial x} v_x \right) \quad (\text{E.4})$$

si le régime est permanent on a $\frac{\partial v_x}{\partial t} = 0$, sur le volume de contrôle on peut également écrire que $\frac{\partial v_x}{\partial x} = (v_x(x + \Delta x) - v_x(x))$ le membre

de gauche s'écrit donc finalement

$$= \rho dV (v_x(v_x(x + \Delta x) - v_x(x))) \quad (\text{E.5})$$

or $v_x = \frac{Q}{A}$

$$= \frac{dV}{A} (\rho Q v_{x1} - \rho Q v_{x2}) \quad (\text{E.6})$$

Le membre de droite sera lui une somme des forces d'inerties longitudinales s'appliquant sur le volume de contrôle.

$$\Sigma F_x = F.dV + [(p_x + \frac{\partial p_x}{\partial x} dx).dydz] - p(x).dydz \quad (\text{E.7})$$

$$\Sigma F_x = F.dV + \frac{\partial p_x}{\partial x} dx dy dz \quad (\text{E.8})$$

$$\Sigma F_x = F.dV + \frac{\partial p_x}{\partial x} dV \quad (\text{E.9})$$

en égalant maintenant les deux membres on obtient la formule d'Euler dans une forme proche de celle qu'utiliseront ALFREDO et LOCKFILL :

$$(\rho Q v_{x1} - \rho Q v_{x2}) = F + \frac{\partial p_x}{\partial x} \quad (\text{E.10})$$

$$(\rho Q v_{x1} - \rho Q v_{x2}) = F + p_x(x + \Delta x) - p_x(x) \quad (\text{E.11})$$

Annexe F

Plans des écluses et modèles réduits

F.1 Roselies : Plans du sas et de la vanne d'alimentation

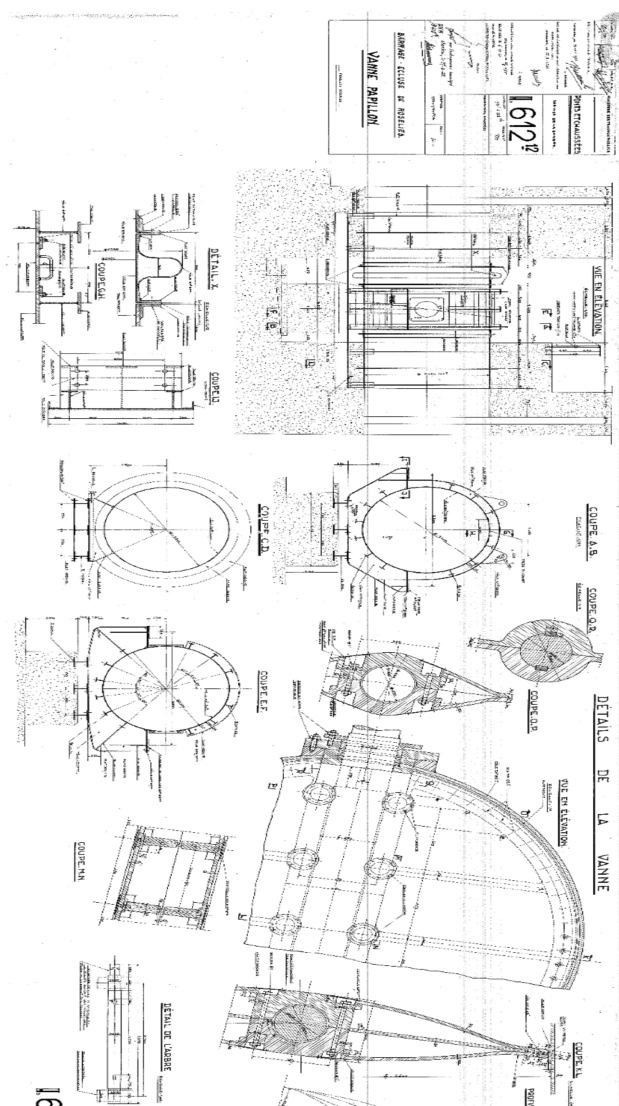


FIGURE F.1 – Roselies - vanne papillon de l'aqueduc de contournement des têtes

ANNEXE F. PLANS DES ÉCLUSES ET MODÈLES RÉDUITS

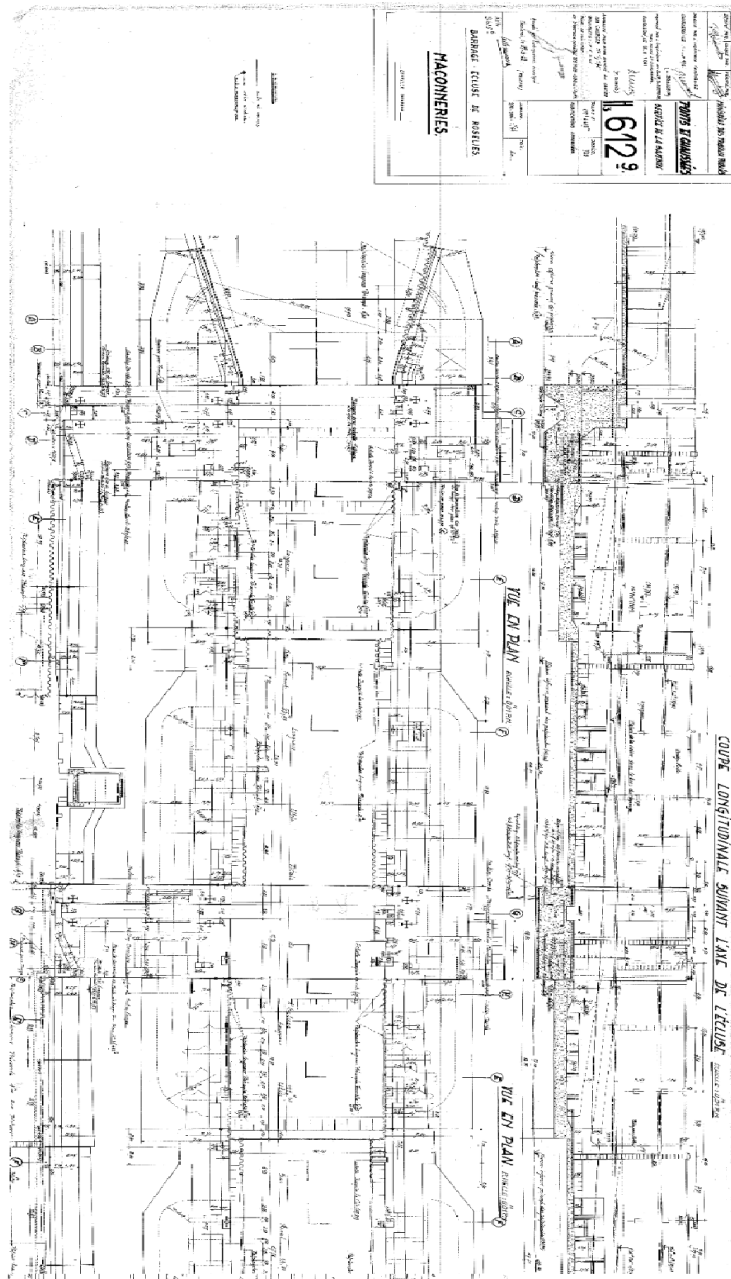


FIGURE F.2 – Roselies plan - partie 1

ANNEXE F. PLANS DES ÉCLUSES ET MODÈLES RÉDUITS

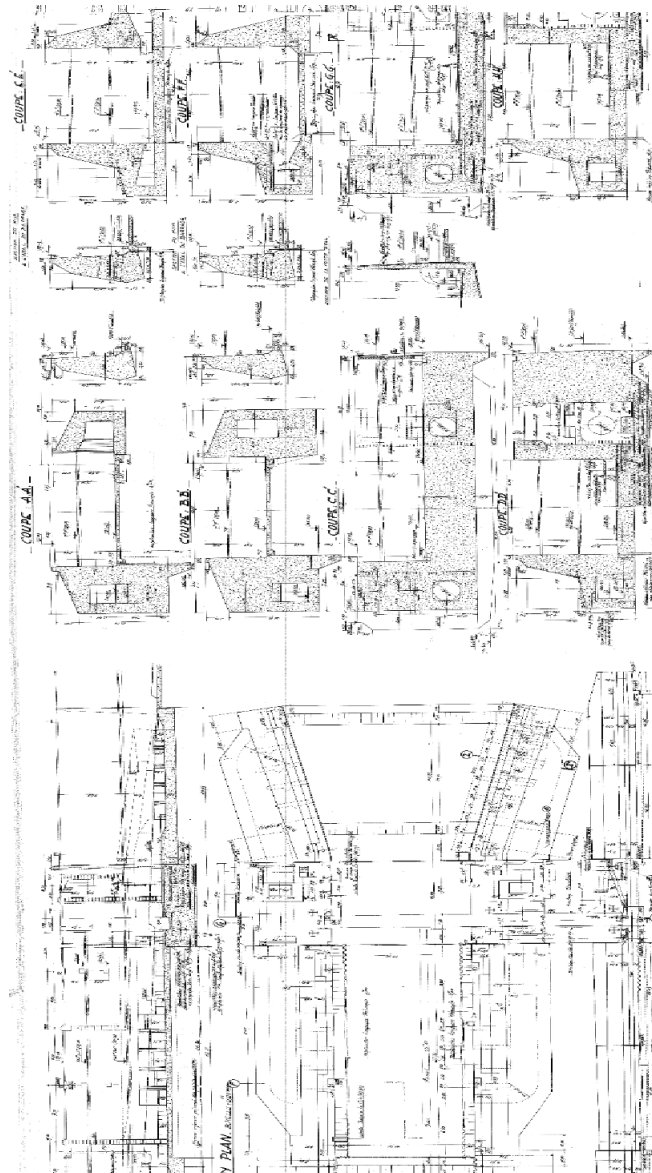


FIGURE F.3 – Roselies plan - partie 2

F.2 Lanaye : Plans du modèle réduit

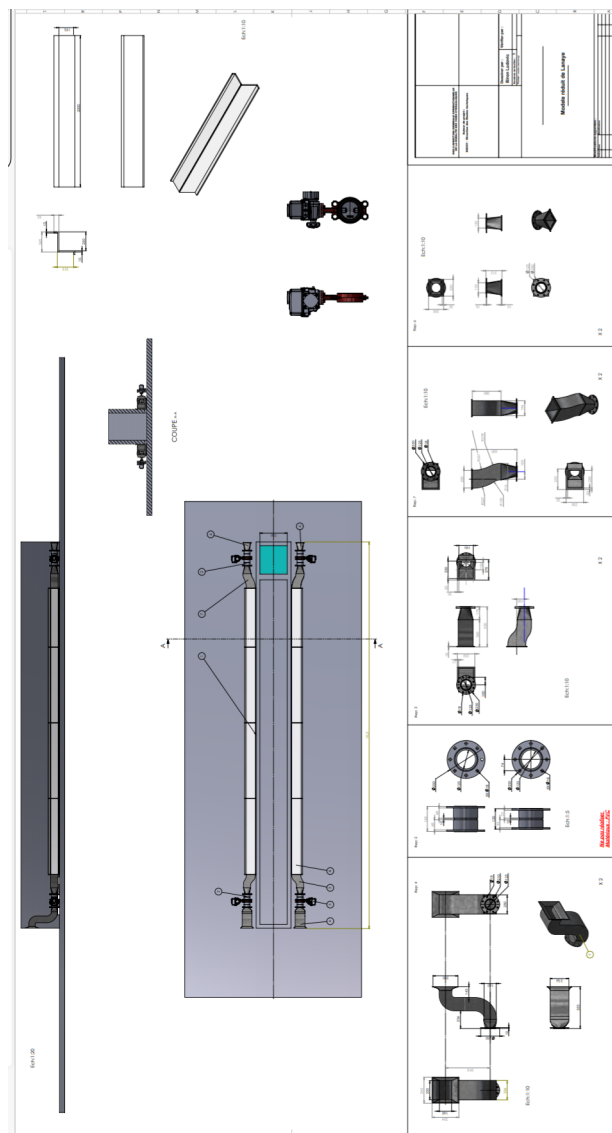


FIGURE F.4 – modèle réduit de Lanaye

F.3 PLAN MARCHIENNE

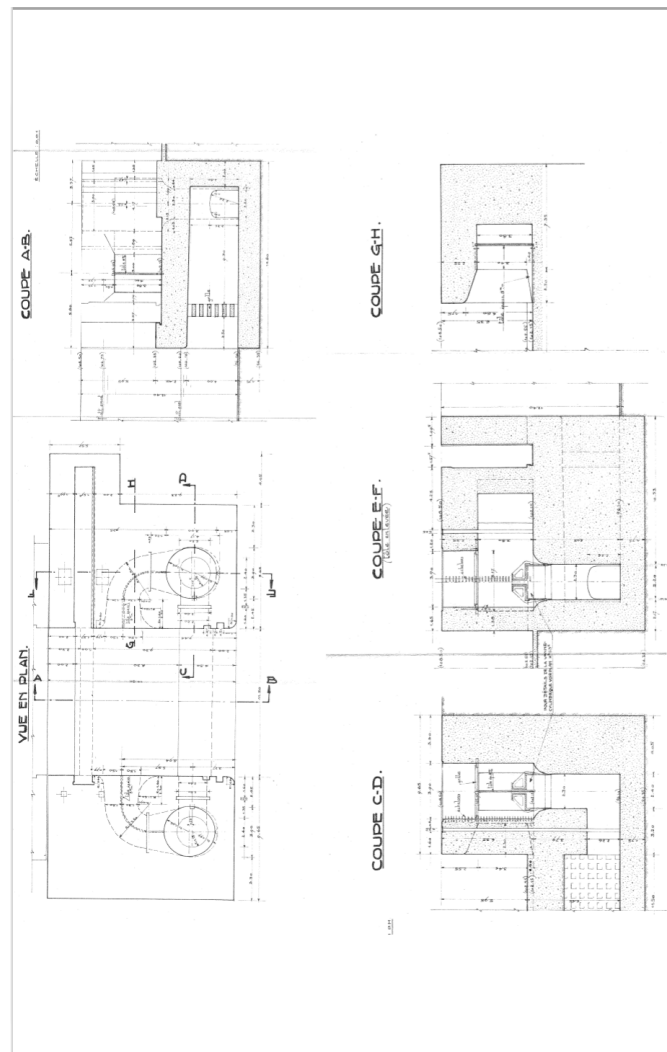


FIGURE F.5 – Plan des systèmes d'alimentation- écluse de Marchienne

F.4 PLAN GOSSELIES

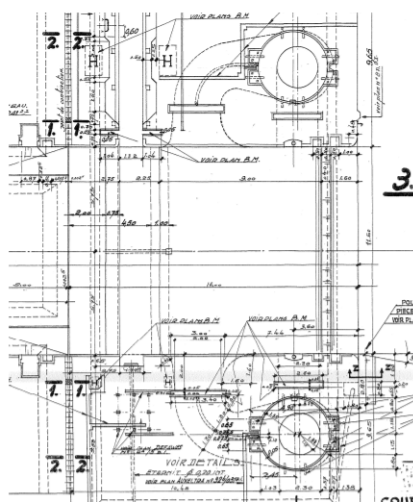


Figure A1.4 : Gosselies, Plan K³ 55° 201^E – Plan de l'écluse

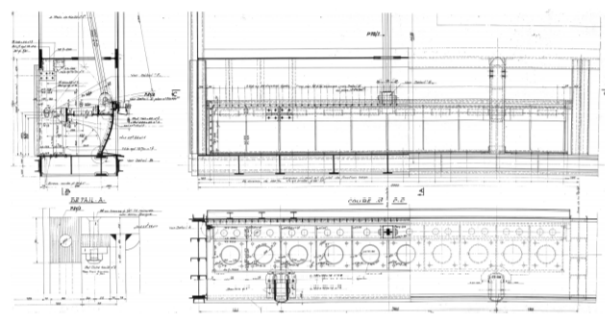


FIGURE F.6 – Plan de l'écluse de Gosselies

Annexe G

Pertes de charges à introduire dans LOCKFILL

G.1 Perte de charge des alimentations de Roselies

nom élément	$\zeta_{ALFREDO}$	$A_{ALFREDO} [m^2]$
1. Entrée à bords arrondis	0	5.76
2. Conduite rectiligne	0.017	5.76
3. Coude concentrique	0.453	5.76
4. Coude concentrique	0.453	5.76
5. Conduite rectiligne	0.0182	5.76
6. Diffuseur intermédiaire	1.07	4.52
7. Conduite rectiligne	0.0211	4.52
8. Vanne papillon	/	/
9. Conduite rectiligne	0.0211	4.52
10. Diffuseur intermédiaire	0.752	4.52
11. Conduite rectiligne	0.066	4.52

TABLE G.1 – perte de charge de chaque éléments constituant les aqueducs de contournement des têtes de Roselies - perte de charge équivalente à introduire dans LOCKFILL

On obtient finalement $\zeta_{LOCKFILL} = \sum_{i=0}^n (\frac{\zeta_i}{A_i^2}) A_{Lockfill}^2 = 2.52$ avec $A_{LOCKFILL} = 4.52$

G.2 Perte de charge des alimentations de Lanaye

nom élément	$\zeta_{ALFREDO}$	$A_{ALFREDO} [m^2]$
1. Entrée à bords arrondis	0	0.089
2. Conduite rectiligne	0.0295	0.04
3. Coude concentrique	0.85	0.04
4. Conduite rectiligne	0.049	0.04
5. Coude concentrique	0.84	0.04
6. Diffuseur intermédiaire	1.32	0.0123
7. Conduite rectiligne	0.104	0.0123
8. Vanne papillon	/	/
9. Diffuseur intermédiaire	1.44	0.0513
10. Coude concentrique	0.25	0.0414
11. Coude arrondi avec changement de section	0.46	0.0414

TABLE G.2 – perte de charge de chaque éléments constituant les aqueducs de contournement des têtes de Lanaye - perte de charge équivalente à introduire dans LOCKFILL

On obtient finalement $\zeta_{LOCKFILL} = \sum_{i=0}^n (\frac{\zeta_i}{A_i^2}) A_{Lockfill}^2 = 3.11$ avec $A_{LOCKFILL} = 0.0414$

ANNEXE G. PERTES DE CHARGES À INTRODUIRE DANS
LOCKFILL
