

# Filière Systèmes industriels

Orientation Design & Materials

## Travail de bachelor Diplôme 2023

*Robin Rittiner*



*Influence de la cavitation sur les efforts  
supportés par une lentille d'une vanne  
papillon*

-  Professeur  
Cécile Münch-Alligné
-  Expert  
Steven Roth-Stojanovic
-  Date de la remise du rapport  
18.08.2023



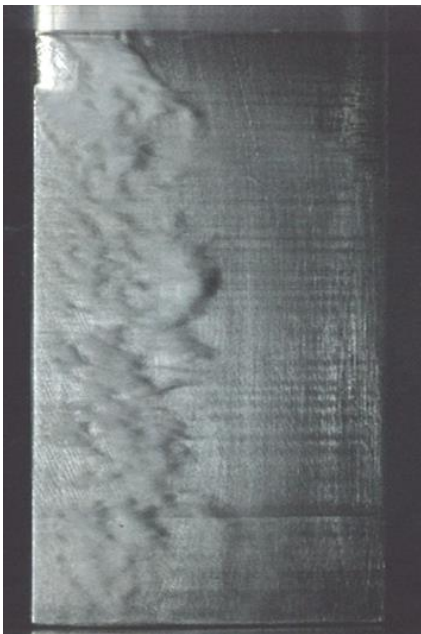
Filière / Studiengang <b>SYND</b>	Année académique / Studienjahr <b>2022-23</b>	No TB / Nr. BA <b>DM/2023/76</b>
Mandant / Auftraggeber <input type="checkbox"/> HES—SO Valais <input checked="" type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>	Etudiant / Student <b>Robin Rittiner</b> <hr/> Professeur / Dozent <b>Cécile Münch-Alligné</b>	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire <i>Partnerinstitution</i>
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte (données complètes) <b>Steven Roth-Stojanovic</b> , srs@hydro-exploitation.ch HYDRO Exploitation SA, Rue de l'Industrie 10, 1950 Sion	

Titre / Titel <b>Influence de la cavitation sur les efforts supportés par une lentille d'une vanne papillon</b>
Description / Beschreibung <p>Dans le cadre du Hydro Alps Lab, l'amélioration de la compréhension de l'influence de la cavitation sur le comportement des vannes de type papillon est un des axes de recherche mené en collaboration avec Hydro Exploitation. L'objectif de ce travail de Bachelor sera d'étudier expérimentalement ce phénomène en installant une lentille de vanne papillon sur la veine de cavitation du banc DN100 du laboratoire d'hydraulique de la HES SO Valais. Les efforts hydrodynamiques s'exerçant sur la lentille seront mesurés grâce à une balance pour plusieurs incidences de la lentille, plusieurs vitesses d'écoulement jusqu'à 11m/s et plusieurs niveaux de pression entre -1 bar et 5 bars. Des mesures de vibrations et de bruits viendront compléter l'instrumentation. En parallèle, les parois de la veine étant en Plexiglas, le type de cavitation apparaissant pour ces différentes conditions sera observé.</p> Objectifs / Ziele — Etat de l'art sur la cavitation et les vannes papillons. — Prise en main de la veine de cavitation et de son instrumentation. — Définition d'un protocole de mesures. — Réalisation et analyses des mesures. — Synthèse.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum  Responsable de l'orientation / <i>Leiter der Vertiefungsrichtung:</i>  <hr/> 1 Etudiant / Student:  <hr/>	Délais / Termine  Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: <b>15.05.2023</b>  Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation: <b>19 - 20.06.2023</b>  Remise du rapport final / Abgabe des <i>Schlussberichts:</i> <b>18.08.2023, 12:00</b>  Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: <b>25.08.2023</b> – HEI <b>28.08.2023</b> – Monthey <b>31.08.2023</b> – Visp  Défense orale / Mündliche Verfechtung: <b>Semaine/Woche 36 (04-07.09.2023)</b>
--	--

<sup>1</sup> Par sa signature, l'étudiant-e s'engage à respecter strictement la directive DI.1.2.02.07 liée au travail de diplôme.  
 Durch seine Unterschrift verpflichtet sich der/die Student/in, sich an die Richtlinie DI.1.2.02.07 der Diplomarbeit zu halten.





## Influence de la cavitation sur les efforts supportés par une lentille de vanne papillon

Diplômant/e Robin Rittiner

### Objectif du projet

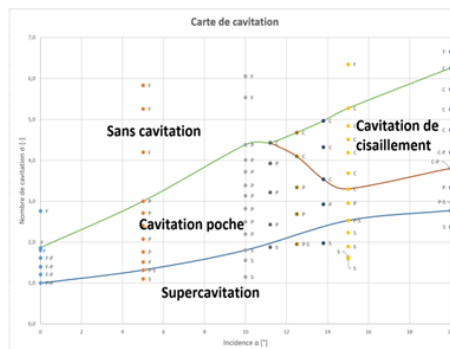
L'objectif de ce projet est d'améliorer la compréhension de l'impact de la cavitation sur la lentille d'une vanne papillon. Les mesures expérimentales ont lieu dans la veine de cavitation installée sur le banc DN100 du laboratoire d'hydraulique de la HES-SO Valais.

### Méthodes | Expériences | Résultats

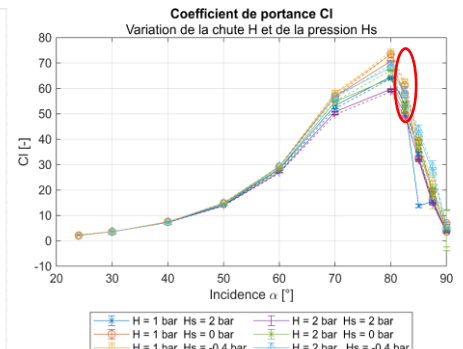
La première étape du projet a été la prise en main du banc de test DN100 ainsi que celle de la balance 6 axes permettant de mesurer les efforts supportés par le profil de la lentille. Dans un second temps, les paramètres limites d'utilisation du banc ont été fixés et le profil a été calibré dans la veine d'essai.

Ensuite, une carte de cavitation (voir figure ci-dessous) de la lentille montée dans la veine d'essai a pu être établie. Cette carte définit les zones d'apparitions des différents régimes de cavitation en fonction de l'angle d'incidence du profil et du paramètre de cavitation  $\sigma$ . Des tests ont également été effectués pour des régimes cavitants et d'autres non-cavitants afin de constater l'influence de la cavitation sur le profil. Les résultats indiquent que pour des angles d'incidence élevés, la présence de cavitation augmente le coefficient de portance  $C_L$ . Ce phénomène est observable pour une incidence de  $80^\circ$  où  $C_L$  varie de 60 à 75 en fonction de l'intensité de cavitation. (voir figure ci-dessous).

Dans le futur, une analyse fréquentielle des signaux d'efforts bruts permettrait de compléter les premières conclusions en renseignant sur les fréquences d'apparition des différents types de cavitation. Une analyse plus approfondie du couple aurait aussi un intérêt sur le dimensionnement du système de fermeture.



Carte de cavitation montrant les zones où les différentes formes de cavitation se produisent en fonction de sigma et de l'incidence alpha.



Influence de la cavitation sur le coefficient de portance selon l'incidence du profil pour une ouverture et une fermeture complète de vanne.

Travail de diplôme  
| édition 2023 |

Filière  
Systèmes industriels

Domaine d'application  
Design & Materials

Professeur responsable  
Cécile Münch-Alligné  
cecile.muench@hevs.ch

Partenaire  
HYDRO Exploitation SA



## Table des matières

1	Nomenclature.....	4
2	Introduction .....	6
2.1	Cadre du projet.....	6
2.2	Objectifs.....	6
2.3	Cahier des charges.....	7
2.4	Méthodologie.....	7
3	État de l'art.....	8
3.1	Les vannes.....	8
3.1.1	Les vannes papillons.....	10
3.2	La cavitation .....	12
3.2.1	Situations d'apparition et de développement de la cavitation.....	13
3.2.2	Types de régimes.....	13
3.2.3	Nombre de cavitation .....	14
3.2.4	Type de cavitation .....	14
3.2.5	Les effets de la cavitation .....	16
3.3	Aérodynamique .....	16
3.3.1	Géométrie .....	16
3.3.2	Force de portance, de traînée et moment.....	16
3.3.3	Régime d'écoulement.....	19
3.4	Moyennes et écarts-types .....	20
4	Méthode expérimentale .....	21
4.1	Infrastructure expérimentale.....	21
4.1.1	Banc de test .....	21
4.1.2	Veine de cavitation.....	22
4.1.3	Profil de la lentille.....	26
4.1.4	Instrumentation et schéma hydraulique.....	28
4.1.5	Balance .....	29
4.1.6	Accéléromètre .....	32
4.2	Visualisation .....	32
4.3	Préparation du banc.....	34
4.3.1	Effort sur les vis .....	34
4.3.2	Paramètres limites .....	36
4.3.3	Calibration profil.....	37
4.4	Plan d'expérience .....	39
5	Résultats.....	40
5.1	Répétabilité .....	41

5.2	Temps d'acquisition .....	42
5.3	Carte de cavitation.....	43
5.4	$\sigma$ fixe et incidence $\alpha$ variable.....	46
5.4.1	Description .....	46
5.4.2	Coefficient de portance, de traînée et de moment.....	47
	Accélération $A_x, A_y, A_z$ .....	50
5.4.3	Coefficient de débit $K_v$ .....	52
5.5	Incidence $\alpha$ fixe et $\sigma$ variable.....	53
5.5.1	Description .....	53
5.5.2	Coefficient de portance, de traînée et de moment.....	54
5.5.3	Coefficient de débit $K_v$ .....	57
5.6	Fermeture et ouverture .....	57
5.6.1	Description .....	57
5.6.2	Coefficient de portance, de traînée et de moment.....	58
5.6.3	Accélération $A_x, A_y, A_z$ .....	62
5.6.4	Coefficient de débit $K_v$ .....	66
6	Conclusion et perspectives .....	67
6.1	Conclusion .....	67
6.2	Perspectives.....	68
7	Durabilité.....	69
8	Remerciements .....	70
9	Références.....	71
9.1	Bibliographie .....	71
9.2	Liste des figures .....	71
9.3	Liste des tableaux.....	73
10	Annexes .....	74
10.1	Protocole d'utilisation du banc .....	74
10.2	Procédures.....	74
10.2.1	Procédure 0.1 – Mise en route du banc DN100 .....	74
10.2.2	Procédure 0.2 – Vidange du banc DN100 .....	74
10.2.3	Procédure 3.1 – Montage de la lentille dans la veine .....	74
10.3	Protocoles de mesure .....	74
10.3.1	Protocole de mesure 3.2 – Paramètres limites .....	74
10.3.2	Protocole de mesure 3.3 – Calibration de la lentille d'une vanne papillon .....	74
10.3.3	Protocole de mesure 3.4 – Carte de cavitation .....	74
10.3.4	Protocole de mesure 3.5 – Test de répétabilité .....	74
10.3.5	Protocole de mesure 3.6 – Temps d'acquisition .....	74

10.3.6	Protocole de mesure 4.1 – Mesure pour $\sigma$ constant et variation de l'incidence	74
10.3.7	Protocole de mesure 4.2 – Mesure pour l'incidence constante et variation de $\sigma$	74
10.3.8	Protocole de mesure 4.3 – Mesure des efforts pour une ouverture et une fermeture complète de la vanne	74
10.4	Liste des capteurs	74
10.5	Certificats de l'instrumentation et fiche technique	74
10.5.1	Balance	74
10.5.2	Accéléromètre	74
10.5.3	Amplificateur	74
10.6	Feuille Excel	74
10.6.1	Calculs de résistance des vis	74
10.6.2	Calculs de pertes de charges	74
10.6.3	Validation de la calibration	74
10.6.4	Répétabilité	74



# 1 Nomenclature

A	: surface du profil	[m <sup>2</sup> ]
C	: vitesse de l'écoulement	[m/s]
C <sub>l</sub>	: coefficient de portance	[-]
C <sub>d</sub>	: coefficient de trainée	[-]
C <sub>M</sub>	: coefficient du moment	[-]
D	: diamètre de conduite	[m]
F <sub>l</sub>	: force de portance	[N]
F <sub>d</sub>	: force de trainée	[N]
f <sub>acqu</sub>	: fréquence d'acquisition	[Hz]
g	: accélération de la pesanteur	[m/s <sup>2</sup> ]
H	: hauteur de chute	[mCE]
H <sub>s</sub>	: niveau de pression dans le réservoir	[bar]
K <sub>v</sub>	: coefficient du débit	[-]
L	: longueur de corde du profil	[m]
M <sub>z</sub>	: moment autour de l'axe Z	[Nm]
M <sub>x</sub>	: moment autour de l'axe X	[Nm]
M <sub>vis</sub>	: moment vu par les vis	[Nm]
M <sub>1</sub>	: pression en amont de la veine	[bar]
M <sub>4</sub>	: pression en aval de la veine	[bar]
n	: vitesse de rotation des pompes	[tr/min]
p	: pression	[Pa]
Δp	: pertes de charge	[Pa]
p <sub>v</sub>	: pression de vaporisation	[Pa]
Q	: débit	[m <sup>3</sup> /h]
Re	: nombre de Reynolds	[-]
T <sub>w</sub>	: température de l'eau	[°C]
t <sub>acqu</sub>	: temps d'acquisition	[s]
α	: incidence du profil	[°]
ζ	: coefficient de perte de charge	[-]
μ	: viscosité dynamique	[kg/m/s]
ν	: viscosité cinématique	[m <sup>2</sup> /s]

$\rho$	: masse volumique	$[\text{kg/m}^3]$
$\sigma$	: nombre de cavitation	$[-]$
ref	: indice de référence	$[-]$
Up ou $\infty$	: indice de conditions à l'infini	$[-]$
X, Y, Z	: référentiel de la veine	$[-]$
X', Y', Z'	: référentiel de la balance	$[-]$

## 2 Introduction

### 2.1 Cadre du projet

La topographie montagneuse et les grands fleuves de la Suisse ainsi que son taux de précipitation moyen important ont permis le développement de centrales hydroélectriques qui exploitent la force hydraulique. L'exploitation de cette source énergétique débute à la fin du XIXe siècle. De nombreuses centrales au fil de l'eau ainsi que de plus grands ouvrages à accumulation ont vu le jour entre 1945 et 1970, ce qui correspond à l'âge d'or de l'hydroélectricité en Suisse. Dans les années 70, la production d'électricité en Suisse provenait à 90 % de l'énergie hydraulique. Ce pourcentage a diminué lors de la mise en service des centrales nucléaires suisses. Le pourcentage actuel de production d'électricité grâce à l'hydraulique en Suisse s'élève à 58 %, ce qui représente la principale source d'énergie renouvelable de notre pays [1].

Actuellement, la Suisse compte 693 centrales de plus de 300 kW qui produisent annuellement 37'000 GWh. Cette production est divisée en 3 catégories : les centrales au fil de l'eau, qui représente 48,4 % de la production. 47,4 % sont produites par des centrales à accumulation et les 4,2 % restant proviennent des centrales de pompage-turbinage. 63 % de la production totale provient des cantons alpins d'Uri, des Grisons, du Tessin et du Valais [1].

Cependant, avec le temps, la question du vieillissement des infrastructures et la nécessité de renouveler certains composants des centrales sont devenus des sujets importants. L'un des éléments clés de cette modernisation réside dans les éléments de sécurité, en particulier les vannes qui jouent un rôle crucial dans le contrôle du flux d'eau dans les conduites.

Un phénomène qui apparaît de manière récurrente dans le domaine de l'hydraulique est celui de la cavitation. Lorsque la pression diminue fortement dans un écoulement, le fluide change de phase et devient gazeux. La cavitation a des effets néfastes, comme la baisse de rendement, les efforts parasites ainsi que l'érosion. Évidemment, les vannes n'échappent pas à ce phénomène. Le but de ce projet est de mieux comprendre les effets que peut avoir la cavitation sur une lentille de vanne papillon afin de mieux les dimensionner.

Une compréhension approfondie de ces aspects est essentielle pour maintenir la durabilité, la sécurité et l'efficacité des installations hydroélectriques suisses à l'heure où les défis environnementaux et énergétiques continuent d'évoluer.

La vanne sélectionnée pour ce TB est la vanne papillon se trouvant sur l'aménagement de la Grande Dixence. C'est la vanne de tête qui se situe sur la conduite qui achemine l'eau du lac des Dix jusqu'à la centrale de production de Fionnay.

### 2.2 Objectifs

Le but de ce projet est d'améliorer la compréhension du phénomène de cavitation ainsi que son influence sur la lentille d'une vanne de type papillon. Cette étude est menée en collaboration avec l'entreprise HYDRO Exploitation SA. Il faudra pour cela réaliser une série de mesures expérimentales grâce à la veine de cavitation du banc DN100 du laboratoire d'hydraulique de la HES-SO Valais.

En effet, les efforts hydrodynamiques qui s'exercent sur la lentille pourront être mesurés à l'aide d'une balance 6 axes. Lors des mesures, il sera possible de faire varier l'incidence du profil, la vitesse de l'écoulement allant jusqu'à 11 m/s ainsi que le niveau de pression allant de -1 bar à 5 bars. De plus, la veine de cavitation est montée avec des parois en Plexiglas, ce qui

permet d'observer le type de cavitation sur le profil de la lentille sur toute la plage de variation de ces paramètres.

## 2.3 Cahier des charges

Un cahier des charges composé de 5 objectifs a été mis en place afin de répondre à l'objectif fixé pour ce projet :

- Réalisation d'un état de l'art sur la cavitation et les vannes papillons
- Prise en main de la veine de cavitation et de son instrumentation
- Définition d'un protocole de mesures
- Réalisation et analyses des mesures
- Synthèse des résultats

## 2.4 Méthodologie

Afin de mener à bien ce projet, il est impératif de bien comprendre le phénomène de cavitation dans sa globalité en effectuant des recherches sur ce qui est déjà existant dans ce domaine. Il est aussi important de comprendre le fonctionnement ainsi que la conception d'une vanne papillon afin de déterminer de façon optimale l'influence de la cavitation sur cet organe de fermeture. De plus, quelques bases en aérodynamique sont nécessaires afin de comprendre comment se comporte un écoulement autour d'un profil et quelles sont les forces qui agissent sur ce même profil lorsque l'on varie certains paramètres. Toutes ces recherches auront pour but de rédiger un état de l'art complet permettant de bien comprendre la démarche ainsi que d'avoir une base théorique solide pour la suite du projet.

Ensuite, la prise en main de la veine de cavitation et de son instrumentation est une étape nécessaire au bon déroulement du projet. Dans un premier temps, il est important de nettoyer la veine de cavitation afin d'éviter de perturber l'écoulement du fluide. Puis vient l'étape du montage de la veine sur le banc DN100 en prenant soin de faire une étanchéité parfaite pour éviter toute fuite. Lorsque que le banc est prêt à l'emploi, des mesures sont faites dans un premier temps sur un profil NACA0015. Ces mesures ont pour but de prendre en main le banc de test ainsi que de pouvoir calibrer correctement les instruments de mesure. En effet, le profil NACA0015 est un profil sur lequel plusieurs études ont déjà été faites. Il est donc facile de comparer les résultats des mesures et de déterminer si les instruments de mesure sont bien calibrés.

Après avoir pris en main le banc de test, il s'agit de remplacer le profil NACA par celui de la lentille de la vanne papillon. Ce changement de profil s'accompagne d'une calibration de la lentille ainsi qu'une définition des paramètres limites liés au profil. Il est important d'établir une carte de cavitation qui nous permettra, dans un second temps, de choisir quelques points plus intéressants à étudier en profondeur.

À la suite de la carte de cavitation, il faut définir un plan d'expérience de mesure qui permettra d'avoir une marche à suivre complète de la prise de mesure. Il est aussi question de décider quels points sont intéressants à mesurer. Chaque mesure est accompagnée d'un protocole de mesure. Le protocole de mesure permet de garantir que toutes les mesures ont été prises dans les mêmes conditions et permet aussi de reproduire l'expérience ultérieurement tout en garantissant les mêmes résultats.

Ensuite, il est question de mettre en pratique les protocoles de mesure sur un profil de lentille de vanne papillon. À la suite de la prise de mesure, il faudra traiter et analyser les résultats bruts afin d'en tirer les meilleures conclusions.

Pour finir, une synthèse sera faite afin de présenter les résultats ainsi que les conclusions sur la base des mesures expérimentales.

La méthodologie de ce travail est synthétisée sur la figure suivante.

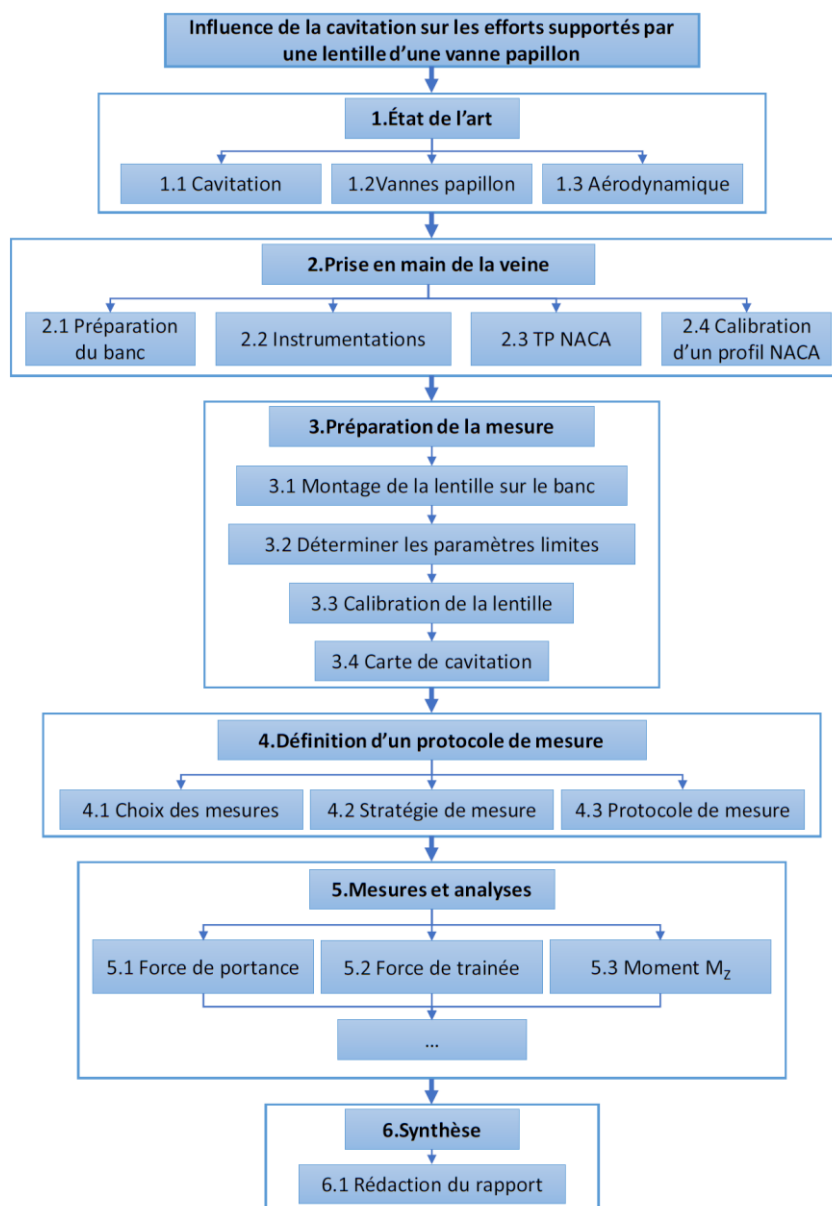


Figure 1 : Méthodologie

## 3 État de l'art

### 3.1 Les vannes

Les vannes sont des systèmes permettant la régulation ou l'arrêt d'un fluide. Plusieurs organes d'obturation sont utilisés dans un aménagement hydraulique [Figure 2]. En cas de rupture de conduite, il doit être possible d'interrompre l'écoulement le plus rapidement possible. Il est aussi nécessaire, lors de révision, de pouvoir éviter de vider la conduite sur toute sa longueur. Et pour finir, il doit être possible d'isoler la machine lors d'un arrêt plus ou moins long. En effet, les injecteurs ou les aubages ne sont pas étanches.[2, p. 105]

- 5. Vanne de pied de barrage
- 6. Vanne de tête (sécurité)
- 12. Vanne de pied

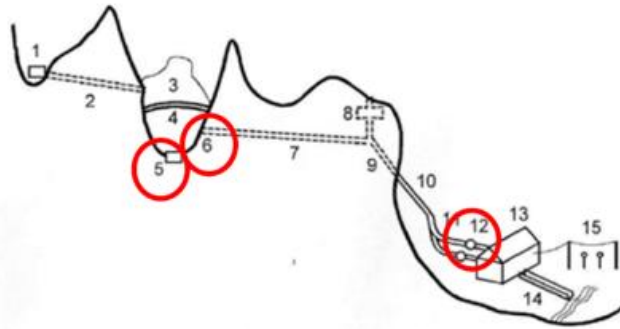


Figure 2 : Schéma simplifié d'une installation hydraulique avec position des vannes principales[3, p. 11]

Les organes d'obturation des centrales hydrauliques doivent remplir certaines conditions essentielles, à savoir : grande sécurité de fonctionnement, bonne étanchéité, manœuvre aisée, entretien et surveillance restreints, bonne résistance à l'usure, révision facile et perte de charge réduite au minimum. L'encombrement est aussi un point important non-négligeable. Évidemment, toutes ces conditions ne peuvent pas être remplies par un seul type de vanne. Il existe à ce jour 4 types de vannes utilisées pour les conduites forcées et les répartiteurs [Figure 3][4, Chap. 3.1] :

- Les vannes tiroir
- Les vannes papillon
- Les vannes sphériques
- Les vannes pointeau

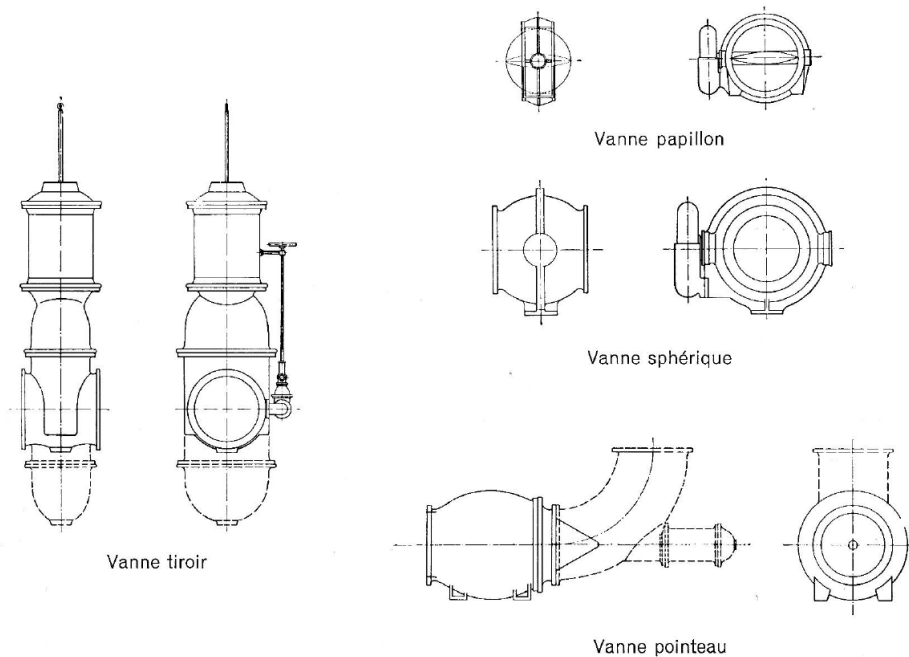


Figure 3 : Les types de vannes les plus courants. Encombrement pour le même diamètre nominal[4]

Les organes de fermeture et de régulation de conduites sont dimensionnés selon :

- Le débit
- La pression de service
- La surpression due aux transitoires hydrauliques
- Le temps de fermeture et d'ouverture

### 3.1.1 Les vannes papillons

Le faible poids et encombrement de ce type de vanne sont deux qualités essentielles qui contribuent à une large utilisation pour l'équipement de basses et moyennes chutes. En effet, l'excavation et le bétonnage nécessaire à l'installation d'une vanne papillon sont moindres comparé à d'autres types de vanne. En termes d'intégration sur une conduite, la vanne papillon ne pose aucune difficulté constructive. Cependant, l'écoulement est passablement perturbé après le passage de la lentille et engendre de plus ou moins grandes pertes de charge selon la hauteur de chute [Figure 4]. Certaines solutions ont été développées afin de réduire cette perte de charge, principalement en changeant la géométrie de la lentille comme par exemple les lentilles de type treillis [Figure 5] ou biplan [Figure 6].

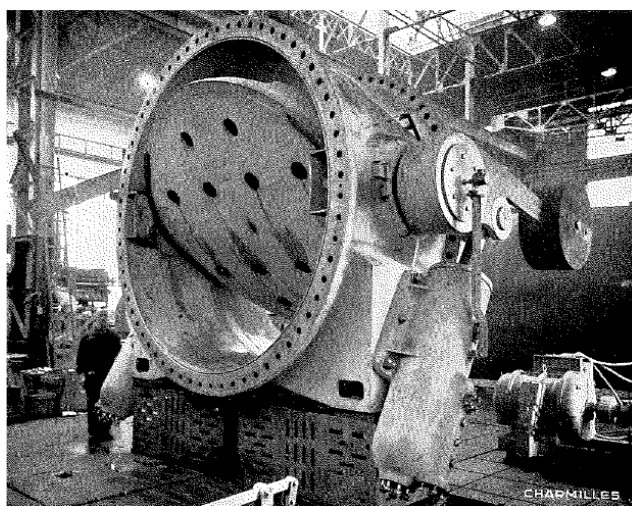


Figure 4 : Vanne papillon avec lentille standard[4]

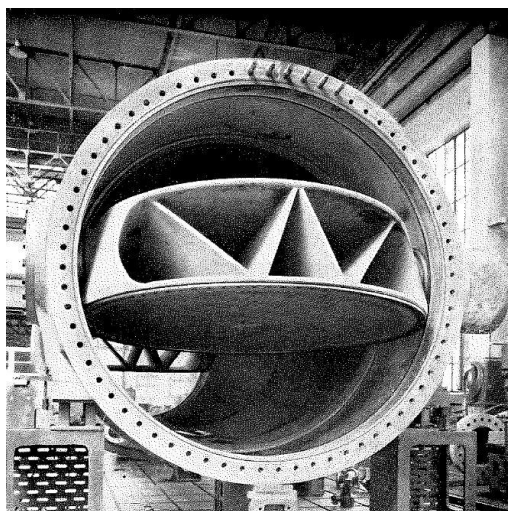


Figure 5 : Vanne treillis, barrage de l'Hongrin[4]

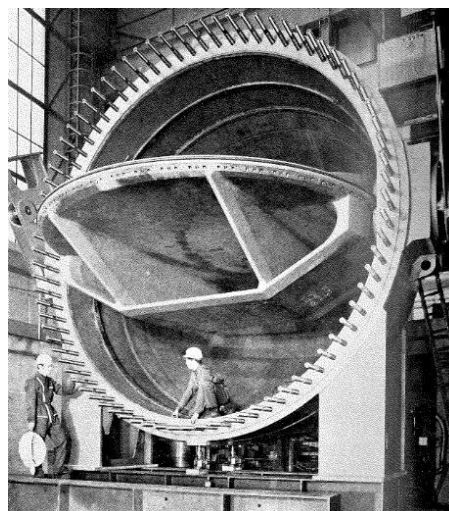


Figure 6 : Vanne biplan, centrale de Xavantes[4]

Les vannes papillons sont constituées de plusieurs éléments garantissant son fonctionnement [3, p. 34] :

1. Actuateur
2. Corps de la vanne
3. Disque ou lentille
4. Joint
5. Siège
6. Support du joint
7. Axe de l'obturateur ou tourillons
8. Palier
9. Joint du palier

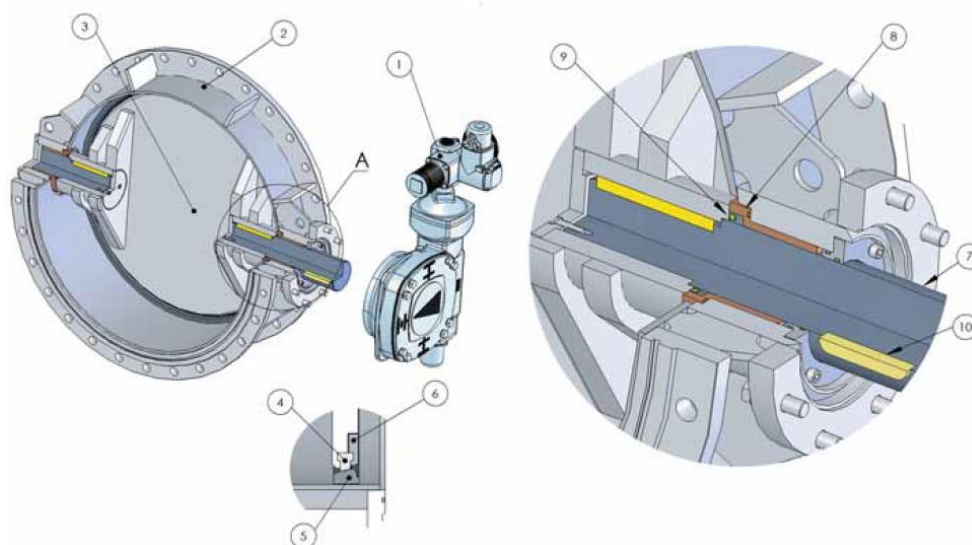


Figure 7 : Vue en coupe d'une vanne papillon[3]

Le principe de fonctionnement d'une vanne papillon consiste à faire pivoter une lentille à l'intérieur de la conduite pour la fermer ou l'ouvrir. Cette lentille est à 0° par rapport au sens de l'écoulement lors de l'ouverture et à 90° lors de la fermeture. Cette lentille peut avoir plusieurs formes : une simple plaque circulaire, en treillis ou biplan. La forme en treillis permet d'augmenter le moment d'inertie en flexion de la lentille et donc permet de mieux résister aux efforts de flexion. Sa forme permet aussi de réduire le sillage créé par la lentille. La structure biplan permet elle aussi d'augmenter la rigidité de la lentille ainsi que de réduire sa perte de charge. Il est donc possible d'utiliser ce type de vanne pour de plus grandes pressions et grands diamètres comparé à une lentille standard.

Les vannes papillon sont utilisées principalement dans les conduites sous pression. Ce n'est pas un élément utilisé pour réguler un débit. Elles servent d'élément de sécurité, de protection et de maintenance. Ces vannes ont la particularité d'être autoclave. Ce qui veut dire qu'elle se ferme sans énergie. L'axe de rotation de la lentille est légèrement décalé vers le haut [Figure 8], ce qui engendre un moment propice à la fermeture de la vanne. En effet, les forces résultantes dues au fluide ont une composante vers le bas ainsi que vers la droite. Il faut donc ouvrir la vanne dans le sens horaire et elle se fermera dans le sens anti-horaire.

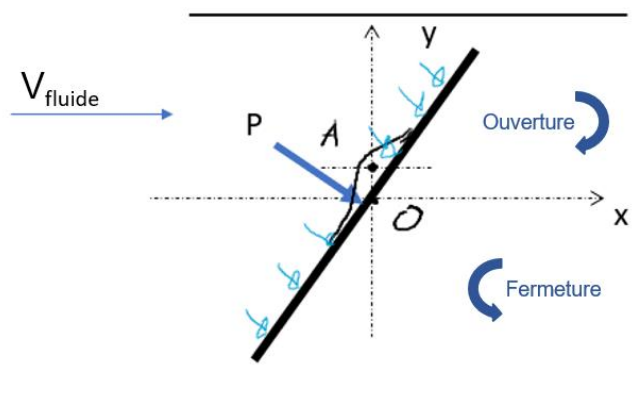


Figure 8 : Sens de fermeture de la vanne

### 3.2 La cavitation

Pour commencer, il est important de comprendre ce qu'est le phénomène de cavitation et pourquoi il apparaît. Lorsque dans un écoulement la pression diminue jusqu'à devenir égale à la pression de dégagement de vapeur, il se forme des bulles de vapeur à l'intérieur de l'écoulement, qui en est complètement modifié. Ce phénomène qui se produit porte le nom de cavitation.[2, p. 10] Lorsque la pression remonte un peu plus en aval dans l'écoulement, les bulles de vapeur implosent et disparaissent.[2, p. 101]

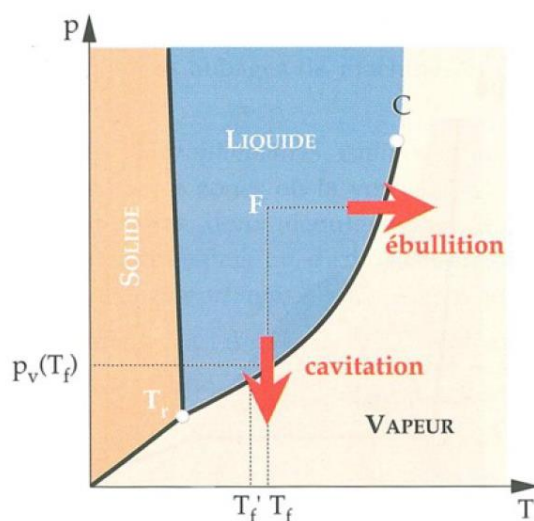


Figure 9 : Diagramme des états d'un corps et courbes de changement de phase[5, p. 25]

La Figure 9 présente un diagramme de phase. On peut y voir deux flèches en rouge nommées ébullition et cavitation. Ce sont les deux chemins simples permettant d'effectuer le changement de phase. Dans le cas de la flèche ébullition, le principe est le même que pour faire bouillir de l'eau. On augmente simplement la température en gardant la pression constante jusqu'à ce que le point F, qui se déplace de la gauche vers la droite, passe de la phase liquide à la phase vapeur et crée donc de la vapeur. Dans le cas de la flèche cavitation, la température du fluide reste constante et la pression diminue jusqu'à ce que le point F, qui se déplace de haut en

bas, passe de la phase liquide à la phase vapeur. C'est à ce moment-là que la cavitation apparaît.

Il est aussi important de souligner que la pression de vaporisation  $p_v$  varie en fonction de la température du fluide. La pression de vaporisation de l'eau peut se calculer par la formule empirique suivante [Équation 1] pour des températures de fluide allant de 0°C à 40°C en garantissant une erreur inférieure à  $\pm 7$  Pa :

*Équation 1 : Formule empirique de la pression de vapeur [6, p. 176]*

$$p_v = 10^{(2.7862 + 0.0312 \theta - 0.000104 \theta^2)}$$

À titre indicatif, pour une température de **20 °C**, la pression de vaporisation est de **23,38 mbar**.

### 3.2.1 Situations d'apparition et de développement de la cavitation

Maintenant que l'on sait que la cavitation apparaît lorsque que la pression d'un liquide atteint la pression de vaporisation; dans quel cas la pression diminue assez pour voir apparaître de la cavitation ? La pression à l'intérieur de la machine baisse quand, comme le montre l'équation de Bernoulli, la vitesse augmente. Par conséquent, la cavitation est fortement influencée par la géométrie des conduites et par les conditions dans lesquelles la machine fonctionne, en particulier par le débit. Les pertes dues au frottement, aux décollements, aux tourbillons et aux chocs sont également la cause de diminutions de pression et favorisent la cavitation. Enfin, les propriétés du liquide transporté jouent un rôle : une teneur élevée en gaz, dissous ou non dissous, et en particules solides augmente le danger de cavitation.[2, p. 101]

### 3.2.2 Types de régimes

Il est possible de distinguer plusieurs types de régimes qui peuvent se produire dans un écoulement :

Les régimes *limites* qui se trouvent entre le fonctionnement non cavitant et le fonctionnement cavitant. On s'intéresse surtout à la détection et la définition du seuil d'apparition ou de disparition.

Le régime de cavitation *développée* où l'on suppose que le seuil d'apparition et de disparition de la cavitation est largement franchi.

Dans le cas de la cavitation poche, on distingue d'autres régimes comme celui de la cavitation *partielle* ou la *supercavitation*. Le régime de cavitation est dit *partielle* lorsque qu'une cavité prend naissance près du bord d'attaque et se referme sur la paroi [Figure 10]. Le régime *supercavitant* est dit lorsque la cavité se referme au sein de l'écoulement en l'aval du corps [Figure 11][5, p. 30].

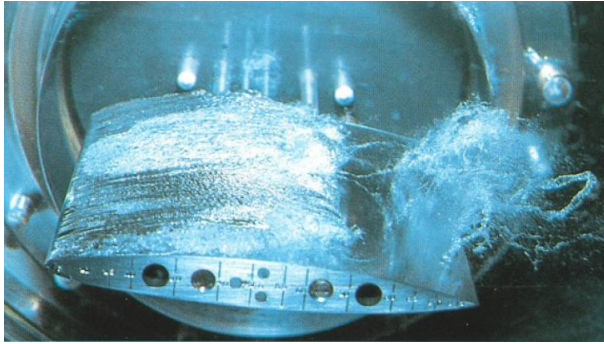


Figure 10 : Cavitation partielle sur un profil NACA 16-012 [5, p. 141]

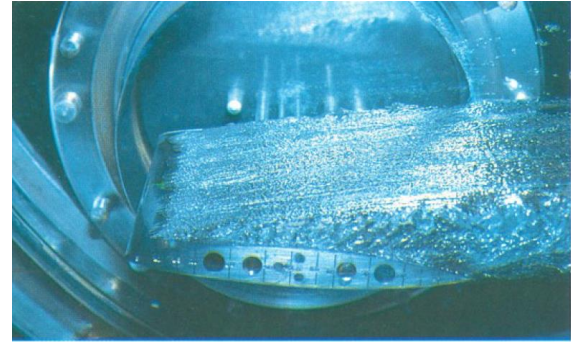


Figure 11 : Supercavitation sur un profil NACA 16-012 [5, p. 141]

### 3.2.3 Nombre de cavitation

Le nombre, ou le paramètre de cavitation  $\sigma$  est un paramètre adimensionnel permettant de caractériser la cavitation en choisissant arbitrairement un point de référence qui se trouve proche de la zone sensible à la cavitation. La vitesse et la pression doivent pouvoir y être mesurées [5, p. 37]. Pour un écoulement autour d'un profil, le paramètre de cavitation se calcule comme suit [Équation 2] :

Équation 2 : Nombre ou paramètre de cavitation

$$\frac{p_{\infty} - p_v(T)}{\frac{1}{2} \rho C_{\infty}^2}$$

Avec :

- $p_{\infty}$  : Pression dans l'écoulement à l'infini
- $p_v(T)$  : Pression de vaporisation du fluide pour une certaine température T
- $C_{\infty}$  : Vitesse de l'écoulement à l'infini
- $\rho$  : Masse volumique du fluide

### 3.2.4 Type de cavitation

Il est possible de distinguer 3 principales formes de cavitation dans un écoulement : [5, p. 27]

- Les bulles isolées : elles sont emportées par l'écoulement et sont issues de germes microscopiques qui se trouvent dans le liquide [Figure 12].
- Les poches : elles restent accrochées aux parois, plus spécialement l'extrados d'un profil [Figure 13].
- Les filaments tourbillonnaires : causés par de basses pressions engendrées dans les zones où la vorticité est fortement concentrée [Figure 14].

De ces 3 formes principales de cavitation, plusieurs sous-types peuvent être aussi identifiés.

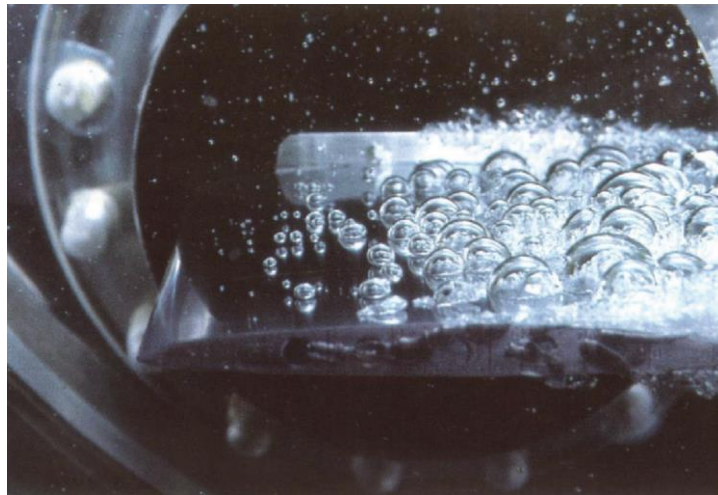


Figure 12 : Bulles sur un profil d'aile [5, p. 28]

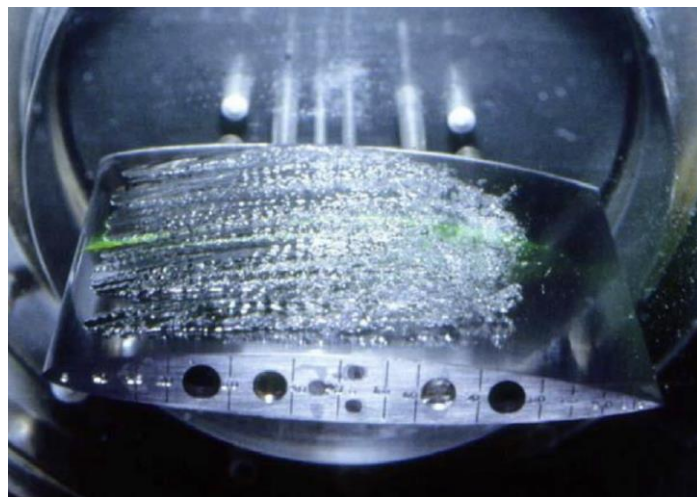


Figure 13 : Poche sur un profil d'aile [5, p. 28]



Figure 14 : Tourbillon d'extrémité d'aile [5, p. 29]

### 3.2.5 Les effets de la cavitation

La cavitation a pour principaux effets :

- La baisse des performances du système comme la diminution de la portance d'un profil, l'augmentation de la traînée d'un profil ou bien encore la baisse du rendement d'une machine hydraulique.
- L'apparition d'efforts parasites sur les structures solides.
- Mouvements vibratoires et nuisances sonores
- Érosion de cavitation

Il est cependant courant d'accepter le phénomène de cavitation dans un système hydraulique. En effet, le fonctionnement en régime non cavitant limite fortement les capacités d'un système hydraulique. C'est pourquoi il est important de bien appréhender ce phénomène qu'est la cavitation.[5, p. 32]

La cavitation n'a pas que des aspects négatifs. Elle est utilisée dans plusieurs domaines comme par exemple le nettoyage de surface, la dispersion de particules dans des liquides, la production d'émulsions, etc.

## 3.3 Aérodynamique

L'aérodynamique est la science qui étudie les effets d'un écoulement sur un solide. Elle permet de comprendre le comportement d'un objet en mouvement dans un fluide ou à l'inverse, un fluide en mouvement autour d'un corps fixe.

### 3.3.1 Géométrie

Pour commencer, il est important de définir la géométrie d'un profil [Figure 15] :

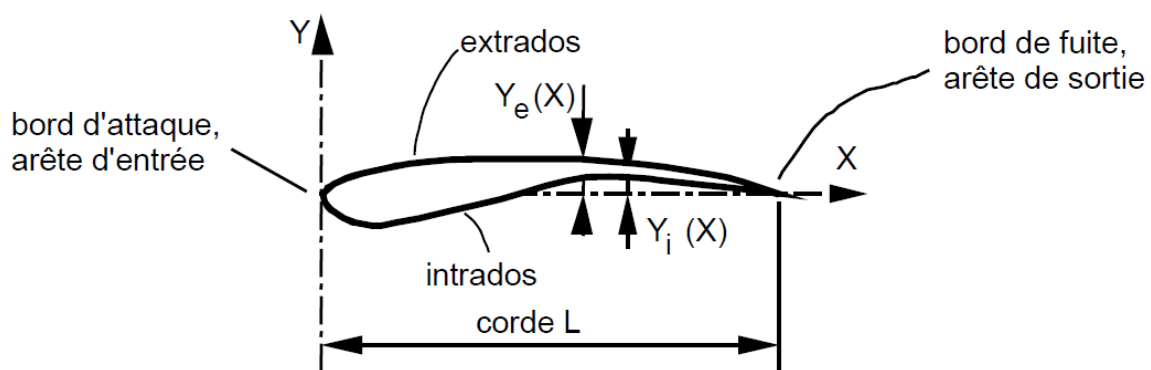


Figure 15 : Définition de la géométrie d'un profil d'aile ou d'aube [2, p. 66]

### 3.3.2 Force de portance, de traînée et moment

La Figure 16 est un schéma représentant un profil dans un écoulement. La vitesse du fluide  $C_\infty$  est une vitesse qui se trouve en amont du profil et qui n'est pas perturbée par celui-ci. On distingue en général deux forces : celle de portance ( $F_L = \text{lift}$ ) et celle de traînée ( $F_D = \text{drag}$ ). Il en résulte aussi un moment  $M_z$  agissant sur le profil. La force de traînée est toujours parallèle

à la vitesse  $C_\infty$ . La force de portance est quant à elle toujours perpendiculaire à la vitesse  $C_\infty$ . On appelle l'incidence l'angle  $\alpha$  entre la corde du profil et l'écoulement.

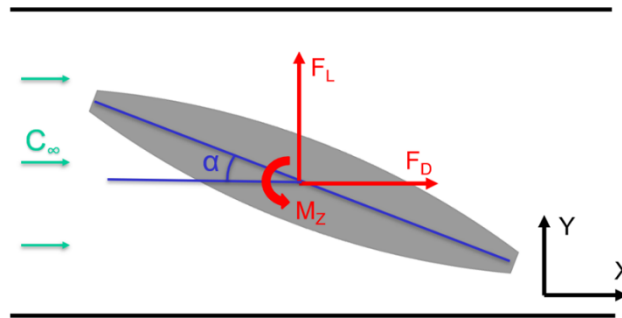


Figure 16 : Schéma d'un profil dans un écoulement

Ce qui nous amène aux formules permettant de calculer la force de portance et la force de traînée.

Équation 3 : Formules de calcul de  $F_L$  et  $F_D$

$$F_L = \frac{1}{2} * c_L * \rho * C_\infty^2 * A$$

$$F_D = \frac{1}{2} * c_D * \rho * C_\infty^2 * A$$

$$M_z = \frac{1}{2} * c_M * \rho * C_\infty^2 * A * L$$

Avec :

- $c_L$  : Coefficient de portance
- $c_D$  : Coefficient de traînée
- $c_M$  : Coefficient de moment
- $C_\infty$  : Vitesse de l'écoulement à l'infini
- $\rho$  : Masse volumique du fluide
- $A$  : Surface par laquelle le corps s'oppose à l'écoulement
- $L$  : Longueur de corde du profil

Le phénomène de force de traînée est plus intuitif que le phénomène de portance. En effet, la traînée est une force qui s'oppose au mouvement d'un objet dans un fluide. Elle est en partie due aux frottements et aussi à la différence de pression qui se situe avant et après le profil. Pour ce qui est de la portance, la vitesse du fluide sur l'intrados est plus grande que celle sur l'extrados [Figure 17]. Cette augmentation de vitesse induit une diminution de la pression sur l'extrados ce qui implique que  $P_e < P_i$  et cela crée une force de portance vers le haut.

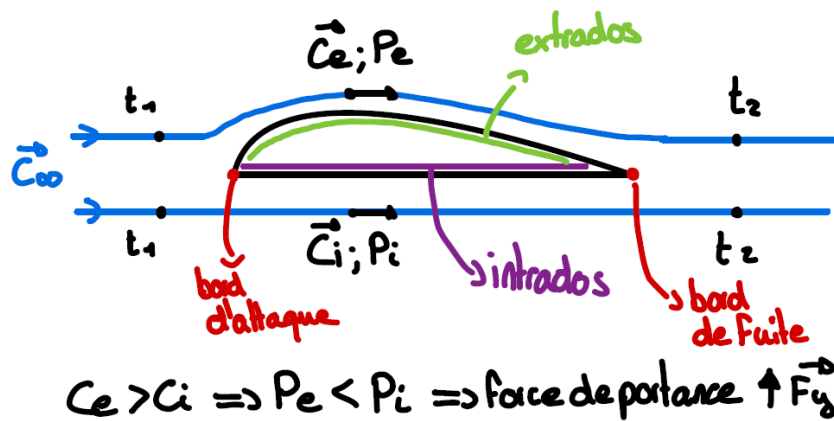


Figure 17 : Schéma d'explication de la portance

De plus, la distribution de pression le long de l'intrados et de l'extrados du profil joue un rôle important lors de l'apparition de la cavitation. En effet, sur la Figure 18, on peut voir au niveau de l'intrados une augmentation de la pression sur une large zone tout en ayant un maximum de pression au niveau du bords d'attaque (zone rouge). Au niveau de l'extrados, on constate cette fois-ci une baisse de pression sur une large zone avec un minimum de pression au niveau du bord d'attaque (zone bleue). Ce qu'il est possible de dire, c'est que la cavitation apparaîtra dans la zone de pression la plus faible, c'est-à-dire la zone bleue.

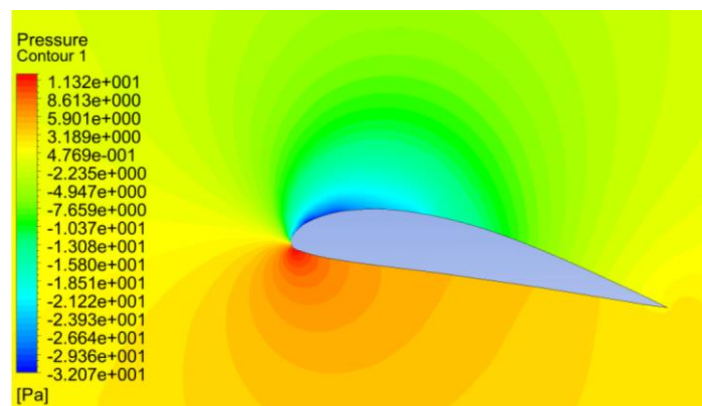


Figure 18 : Distribution de pression sur un profil GOE 387 à 10 degrés d'incidence[7, p. 3]

Il est intéressant de représenter les courbes de coefficient de portance  $C_L$ , de traînée  $C_D$  et de moment  $C_M$  en fonction de l'incidence [Figure 19, Figure 20, Figure 21]. Cela permet de se représenter le comportement du profil dans l'écoulement.

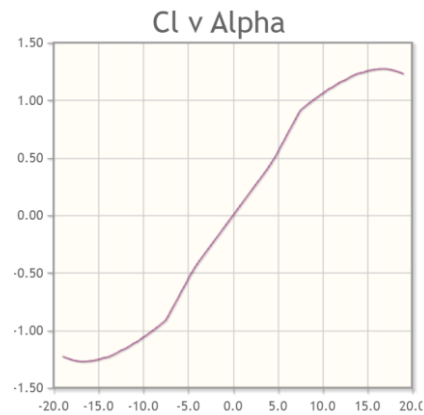


Figure 19 : Coefficient de portance en fonction de l'incidence pour  $Re=500$  [8]

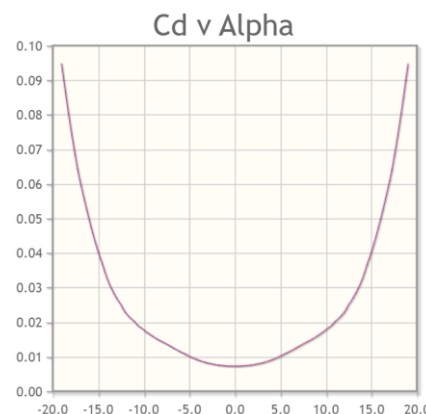


Figure 20 : Coefficient de trainée en fonction de l'incidence pour  $Re=500$  [8]

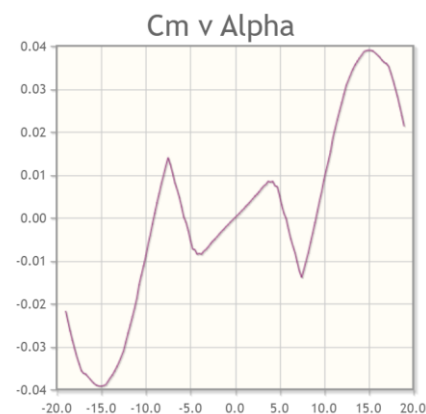


Figure 21 : Coefficient du moment en fonction de l'incidence pour  $Re=500$  [8]

### 3.3.3 Régime d'écoulement

Il est important de rappeler que l'écoulement change de régime lorsque la vitesse augmente. Le fluide passe d'un régime laminaire pour ensuite devenir turbulent lors de l'augmentation de vitesse [Figure 22]. Dans un régime laminaire, les particules se déplacent parallèlement à l'écoulement tandis que dans un écoulement turbulent, les particules bougent aussi bien dans le sens principal d'écoulement mais aussi perpendiculairement à celui-ci [2, p. 48].

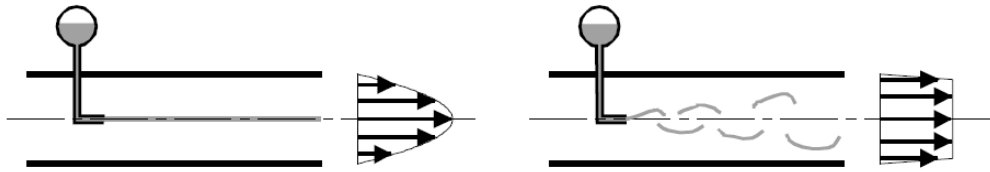


Figure 22 : Écoulement laminaire à gauche et écoulement turbulent à droite [2, p. 48]

Afin de savoir si l'écoulement est laminaire ou turbulent, il est possible de se baser sur le nombre de Reynolds. Si ce nombre dépasse les 2320 [-], le régime est turbulent. En dessous de cette valeur, l'écoulement est laminaire. Le nombre de Reynolds se calcule comme suit [Équation 4] :

Équation 4 : Formule du nombre de Reynolds

$$Re = \frac{\rho * \bar{C} * D}{\mu} = \frac{\bar{C} * D}{\nu}$$

Avec :

- $\bar{C}$  : Vitesse moyenne d'écoulement
- $D$  : Diamètre de la conduite
- $\mu$  : Viscosité dynamique
- $\nu$  : Viscosité cinématique
- $\rho$  : Masse volumique du fluide

### 3.4 Moyennes et écarts-types

Lors des mesures expérimentales, plusieurs données seront enregistrées afin de comprendre l'influence de la cavitation sur une lentille de vanne papillon. Pour chaque acquisition de données, une moyenne et un écart-type sont calculés.

La moyenne est une mesure statistique représentant la tendance centrale d'un ensemble de valeur. Elle se calcule comme suit [Équation 5] :

Équation 5 : Calculs de la moyenne

$$\text{Moyenne } \mu = \frac{\text{Somme des valeurs}}{\text{Nombre total de valeurs}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i$$

L'écart-type est une mesure statistique qui permet de quantifier la dispersion des valeurs autour de la moyenne. L'écart-type se calcule comme suit [Équation 6] :

Équation 6 : Calculs de l'écart-type

$$\text{Ecart type} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \mu)^2}{n}}$$

Comme exemple, un signal de force est enregistré à une certaine fréquence d'acquisition pour un temps de 200 secondes [Figure 23]. La courbe bleue représente le signal, tandis que la

ligne turquoise symbolise la moyenne, et les deux lignes rouges de part et d'autre de la moyenne représentent l'écart-type. Environ 68.3% des données se trouvent à l'intérieur de l'écart-type (entre les deux courbes rouges).

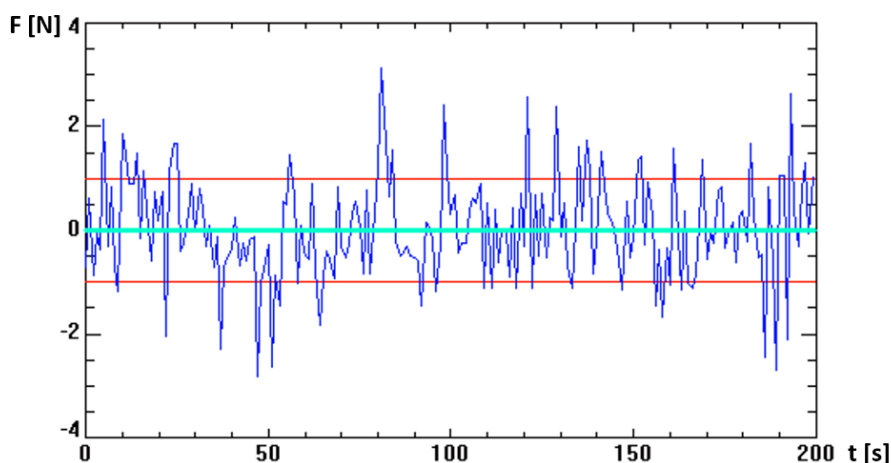


Figure 23 : Exemple d'un signal de force pris sur 200 secondes [9]

## 4 Méthode expérimentale

Dans ce chapitre, il sera question de présenter le banc de test ainsi que tous les éléments nécessaires à la prise de mesure.

### 4.1 Infrastructure expérimentale

#### 4.1.1 Banc de test

Le banc de test DN100 [Figure 24] se situe dans le laboratoire d'hydraulique de la HES-SO Valais/Wallis. Il est doté de 3 pompes montées en parallèle afin d'augmenter le débit dans les conduites. Le banc est équipé d'un réservoir pressurisable qui permet de varier le niveau de pression dans le circuit. Un deuxième réservoir (réservoir noir) permet de remplir le circuit d'eau. Lorsque le circuit ainsi que le réservoir pressurisable sont remplis, il est possible de fonctionner en circuit fermé.

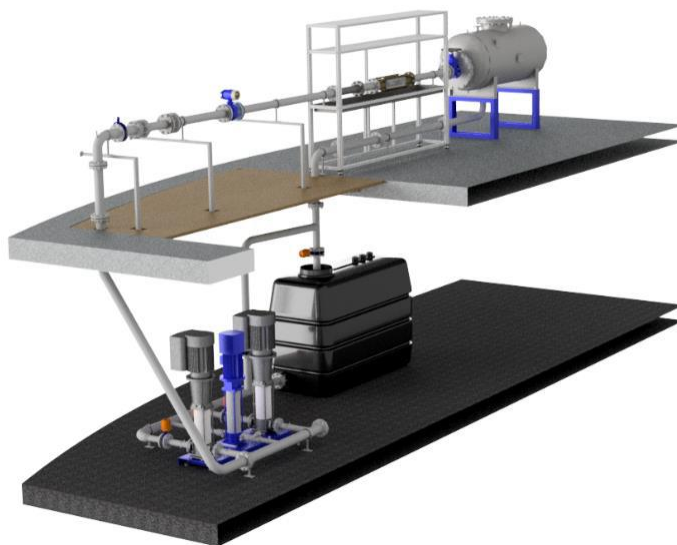


Figure 24 : Banc de test DN100

Le banc de test a les caractéristiques suivantes :

- Pression maximale : **160 mCE**
- Débit maximal : **130 m<sup>3</sup>/h**
- Puissances des pompes : **2x 18.5 kW & 1x 5.5 kW**
- Vitesses maximales des pompes : **3'500 / 3'000 tr/min**
- Volume du circuit total : **4.5 m<sup>3</sup>**

Une interface LabView permet de communiquer avec le banc de test directement depuis l'ordinateur [Figure 25]. L'interface permet entre autres de piloter les pompes, gérer le niveau de pression dans le réservoir en aval de la veine et de piloter la vanne de remplissage du système. Elle permet aussi d'afficher les valeurs de pression, de débit, de vitesse et de température en temps réel. Il est possible de réguler les pompes de 3 façons différentes :

Vitesse de pompes : Les trois pompes s'auto-régulent autour d'une certaine vitesse de rotation que l'on peut préciser séparément par pompe.

Débit : Les trois pompes s'auto-régulent de façon individuelle afin de toujours avoir le même débit dans la veine.

En hauteur de chute : Les trois pompes s'auto-régulent de façon individuelle afin d'avoir une chute constante H dans la veine de cavitation.

Le protocole d'utilisation du banc se trouve en annexe 10.1 Protocole d'utilisation du banc.

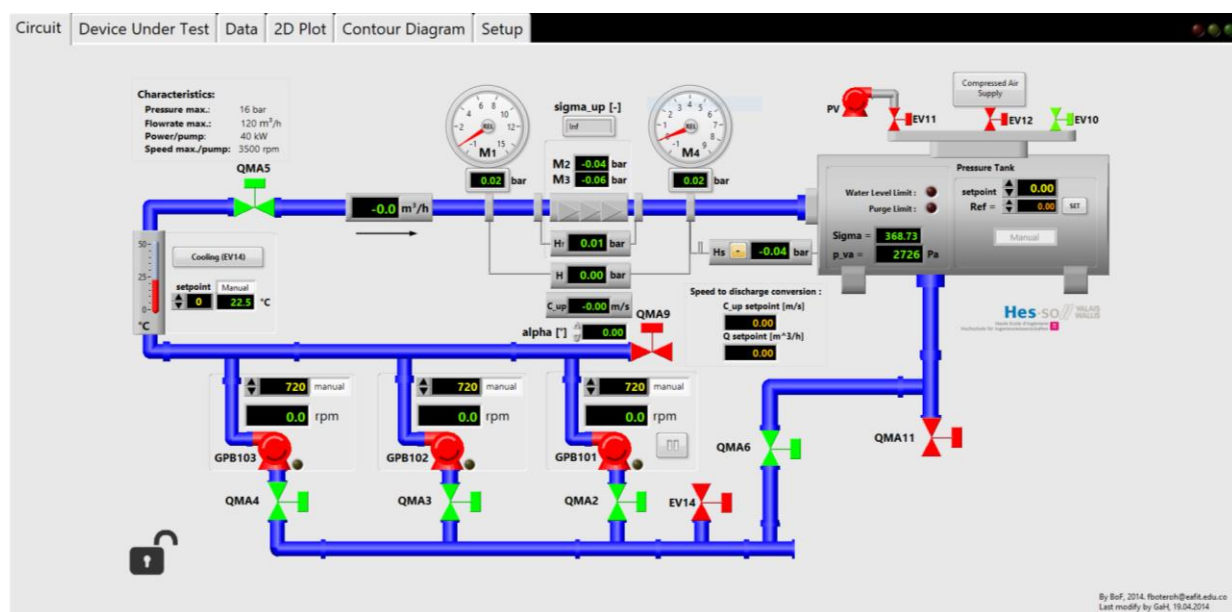


Figure 25 : Interface LabView de pilotage du banc de test DN100

#### 4.1.2 Veine de cavitation

La veine de cavitation est la partie principale de ce banc de test [Figure 26]. C'est dans cette veine que se situe le profil de la lentille et que toutes les mesures se font. La veine est constituée d'un corps principal sur lequel vient se visser 3 plexiglas (dessous, dessus et en

face) qui permettent de visualiser la cavitation. A l'arrière se trouve le dispositif qui permet la rotation du profil dans la veine [Figure 27].

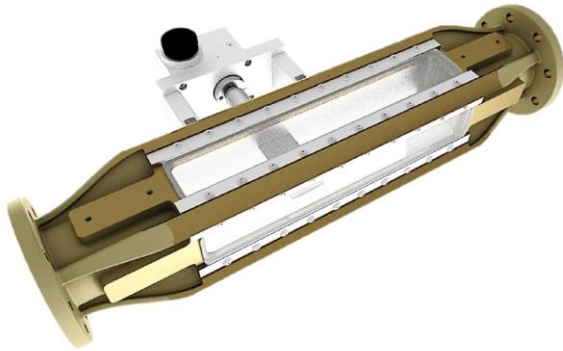


Figure 26 : Veine de cavitation



Figure 27 : Vue de dessus du dispositif de rotation du profil

La géométrie interne de la veine se présente comme suit [Figure 28] et a les caractéristiques suivantes :

- Section de base : **80 x 80mm**
- Section au niveau du profil : **40 x 80mm**
- Longueur : **500mm**
- Pression admissible : **-1 à 5bars**
- Vitesse d'écoulement maximale : **11.3 m/s**

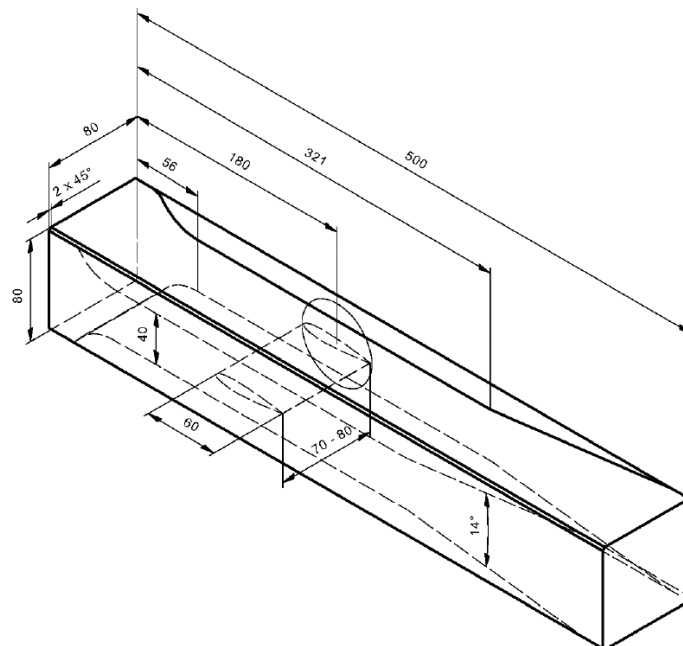


Figure 28 : Dimensions de la veine de cavitation

Il est important de souligner que les convergents (pos.1 et pos.2), la lentille de la vanne (pos.3), ainsi que les divergents (pos.4 et pos.5) engendrent des pertes de charge dans la veine qui se traduisent par une différence de pression que l'on nomme H [Figure 29]. Cette différence de pression équivaut à la mesure de pression M1 moins la pression M4.

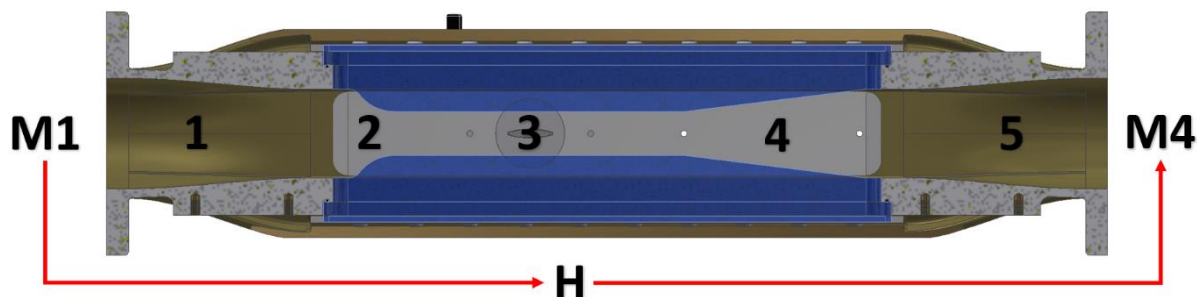


Figure 29 : Vue en coupe de la veine avec les différents divergents et convergents

La perte de charge intéressante lors de cette étude est celle de la vanne. C'est pourquoi il est important de déterminer les autres pertes de charge et de les soustraire à H afin de connaître uniquement la perte de charge engendrée par la lentille [Équation 7].

Équation 7 : Calculs de la perte de charge engendrée par la vanne

$$(M1 - M4) = H = \Delta p1 + \Delta p2 + \Delta p3 + \Delta p4 + \Delta p5$$

$$\Delta p3 = \Delta p_{\text{vanne}} = H - (\Delta p1 + \Delta p2 + \Delta p4 + \Delta p5)$$

Afin de déterminer la perte de charge pour chaque position, il est nécessaire de connaître le coefficient de perte de charge  $\zeta$ . La formule pour calculer les pertes de charge est la suivante [Équation 8] :

Équation 8 : Formule de calculs de la perte de charge

$$\Delta p = \zeta * \rho * \frac{\bar{C}^2}{2}$$

Toutes les valeurs des coefficients de perte de charge  $\zeta$  selon la géométrie de la veine sont tirées des abaques de « Handbook of Hydraulic Resistance [10] ».

Position 1 : correspond à un convergent rectiligne [Figure 32] avec une transition circulaire à rectangulaire (écoulement en sens inverse de la Figure 30). La perte de charge  **$\zeta1 = 0,169$** .

Position 2 : correspond à un convergent curviligne [Figure 33]. La perte de charge  **$\zeta2 = 0,01$** .

Position 4 : correspond à un divergent plan sur une ligne [Figure 31]. La perte de charge  **$\zeta4 = 0,09$** .

Position 5 : correspond à un divergent avec une transition rectangulaire à circulaire [Figure 30]. La perte de charge  **$\zeta5 = 0,09$** .

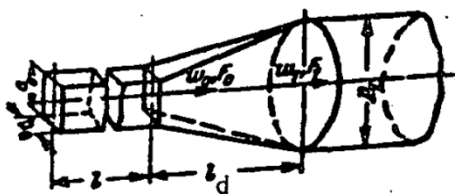


Figure 30 : Transition rectangulaire à circulaire

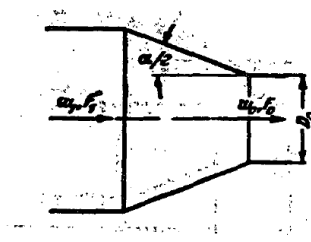


Figure 32 : Convergent rectiligne

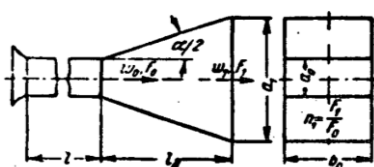


Figure 31 : Divergent plan sur une ligne

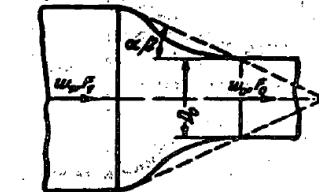


Figure 33 : Convergent curviligne

Il est maintenant possible de savoir pour chaque vitesse dans la veine, la perte de charge de chaque position et bien sûr de la lentille de la vanne. À titre indicatif, la perte de charge engendrée par les convergents et divergents s'élève à **7500 Pa** pour un nombre de Reynolds de **500'000**. La feuille Excel présentant les résultats de trouve en annexe 10.6.2 Calculs de pertes de charges

Il est possible de normaliser la perte de charge engendrée par la lentille grâce au coefficient de débit Kv. Il correspond au débit d'eau qui traverse la vanne et qui crée une perte de charge de 1 bar. Pour le calculer, il est nécessaire de connaître la perte de charge de la lentille [Équation 9]. Plus la perte de charge de la vanne sera grande, plus le coefficient Kv sera faible.

Équation 9 : Formule du coefficient de débit Kv

$$Kv = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p_{\text{vanne}}}}$$

Un autre point à aborder dans ce chapitre est celui de la définition des variables de vitesse et de pression référence et celles utilisées pour les calculs. En effet, les mesures de débit et de pressions de référence se font en amont de la veine ce qui n'est pas optimal pour la caractérisation de la cavitation, ainsi que pour les calculs des coefficients de portance et de traînée. Il est donc nécessaire de définir un point plus proche du profil de la lentille qui permettra de faire tous les calculs nécessaires [Figure 34].

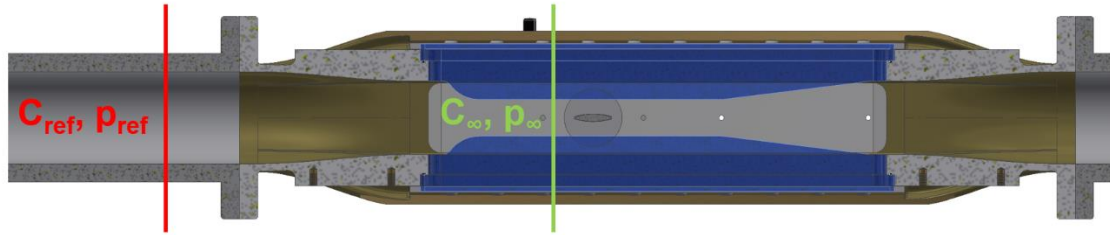


Figure 34 : Schéma en coupe de la veine pour la définition de la vitesse et de la pression

La loi de conservation du débit [Équation 10] ainsi que le théorème de Bernoulli [Équation 11] permettent de passer les vitesses et les pressions de référence à celles à l'infini en négligeant les pertes de charge :

Équation 10 :  $C_{\infty}$  avec la loi de conservation du débit

$$C_{\infty} = C_{ref} * \frac{A_{ref}}{A_{\infty}}$$

Équation 11 :  $p_{\infty}$  avec le théorème de Bernoulli

$$p_{\infty} = p_{ref} + \frac{\rho(C_{ref}^2 - C_{\infty}^2)}{2}$$

#### 4.1.3 Profil de la lentille

Le profil de la lentille correspond à un modèle réduit de la vanne papillon de Blava qui se situe sur l'aménagement de La Grande Dixence. À taille réelle, elle mesure **3m** de diamètre. À échelle réduite, la lentille a une longueur de corde de **39,5mm** et une largeur maximale de **7,5mm** [Figure 35]. Le bord d'attaque ainsi que le bord de fuite sont vifs et ont une épaisseur de **2mm**, ce qui peut favoriser le décollement de la couche limite ainsi que le départ de la cavitation. La corde du profil est plus petite que la hauteur de la veine (**40mm**), c'est pourquoi il est possible d'effectuer une rotation complète du profil dans la veine. La lentille est symétrique, ce qui implique que les efforts sur le profil sont pareils lorsque l'on compare un angle avec son opposé négatif. La symétrie implique aussi que le type de cavitation sera le même sur l'intrados que sur l'extrados pour un certain angle et son opposé négatif [11, p. 24].

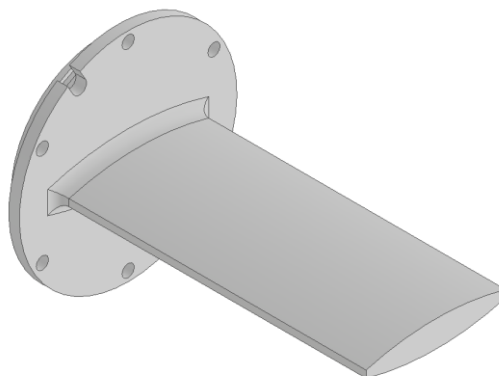


Figure 35 : Lentille de la vanne papillon

Un couvercle est prévu afin de ne pas perturber l'écoulement du fluide dans la veine [Figure 36]. En effet, il se monte directement à fleur de la paroi interne de la veine. Il a la même géométrie que le profil avec un léger jeu qui permet simplement le montage du profil dans le couvercle.

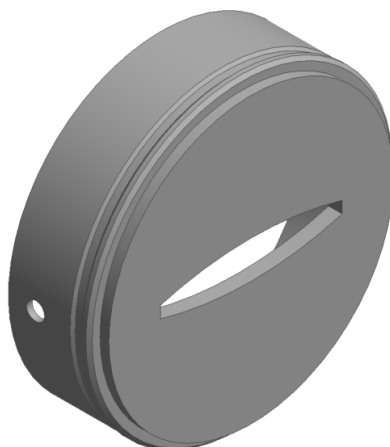


Figure 36 : Couvercle de la lentille

Pour ce qui est du montage du profil dans la veine, le couvercle est préalablement monté à l'intérieur de la veine. Ensuite, la lentille se visse sur la balance qui vient elle-même se visser dans le réducteur angulaire. Le tout vient se loger dans la veine de cavitation [Figure 37]. Le montage du profil dans la veine est détaillé en annexe 10.2.3 Procédure 3.1 – Montage de la lentille dans la veine.

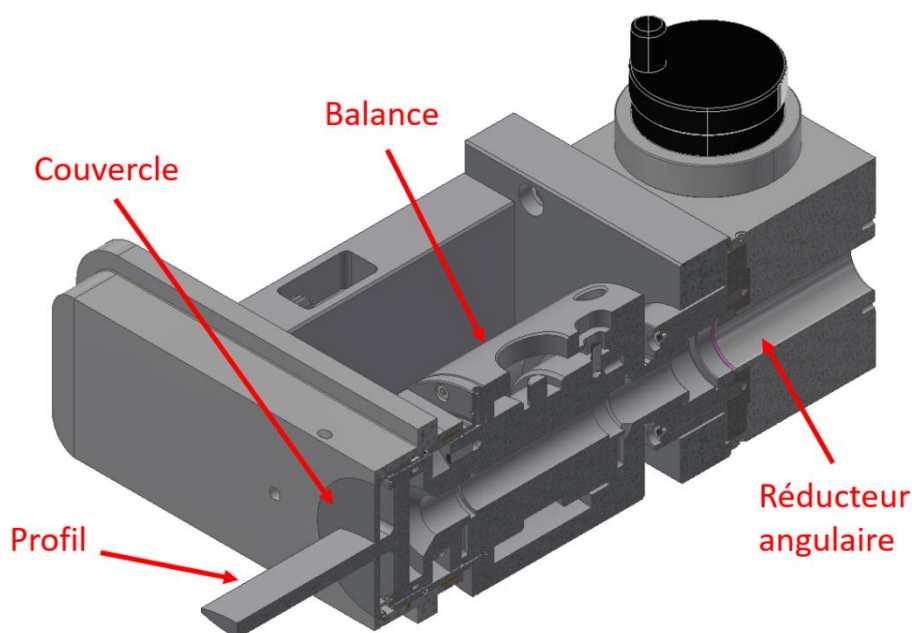


Figure 37 : Vue en coupe du montage profil – couvercle – balance - réducteur angulaire

Lors du montage de la lentille dans la veine, rien ne garantit que son positionnement soit parfaitement égal à  $0^\circ$ , c'est pourquoi il est nécessaire de procéder à une mise à zéro du profil. Pour ce faire, L'appareil photo est monté sur un trépied et il est calibré horizontalement et verticalement selon ses capteurs gyroscopiques internes. Ensuite, il est question d'aligner le profil avec le quadrillage de l'appareil photo horizontalement (profil à  $0^\circ$ ) [Figure 38] et verticalement (profil à  $90^\circ$ ) [Figure 39].



Figure 38 : Mise à zéro du profil horizontalement

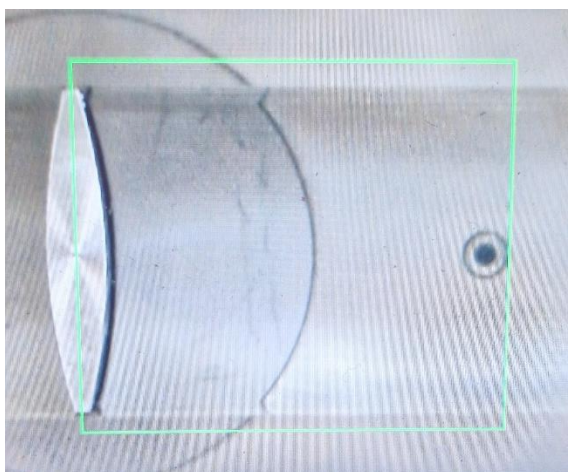


Figure 39 : Mise à zéro du profil verticalement

#### 4.1.4 Instrumentation et schéma hydraulique

Le banc de test DN100 est équipé de plusieurs capteurs permettant de mesurer le débit de l'eau, la pression a plusieurs positions différentes ainsi que la température de l'eau dans le système.

Les capteurs se situent sur le banc de la façon suivante [Figure 40] :

- Débitmètre électromagnétique **Q** (rouge)
- Capteur de pression statique **M1** (bleu)
- Capteur de pression différentiel **H** (violet)
- Capteur de pression différentiel **Hs** (jaune)
- Capteur de température **Tw** (vert)

La liste des capteurs avec leurs caractéristiques et les numéros de série sont en annexe 10.4  
Liste des capteurs.

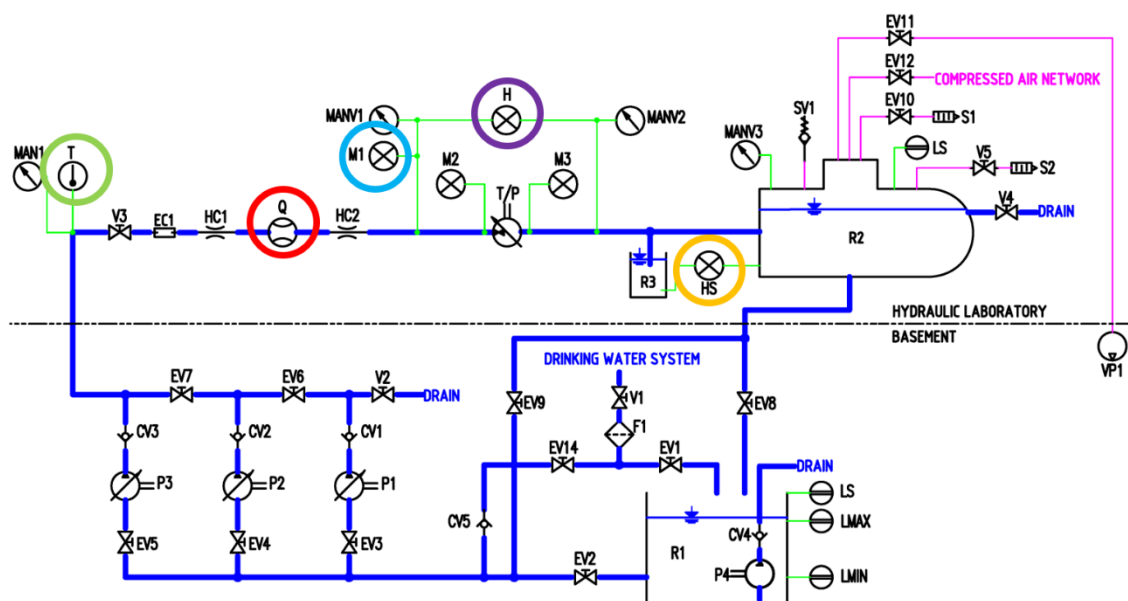


Figure 40 : Schéma hydraulique du banc DN100

#### 4.1.5 Balance

Comme présenté dans le chapitre 4.1.3, la lentille se monte directement sur une balance. Cette balance est un capteur piézoélectrique qui permet de mesurer les forces et les moments appliqués sur le profil de la lentille [Figure 41]. Lorsque qu'un couple ou une force est appliqué sur le profil, l'effet piézoélectrique du quartz convertit l'énergie mécanique en un signal électrique. Plus le moment ou la force est grand, plus le signal électrique sera grand. La balance est capable de fonctionner en traction comme en compression. La balance est intégrée directement dans le support rotatif qui se trouve à l'arrière de la veine. Les données techniques de la balance se trouve en annexe 10.5.1.



Figure 41 : Balance Kistler 6 axes Type 9306A

Afin de rendre la mesure possible, il est nécessaire de parler de la chaîne d'acquisition [Figure 42]. C'est ce qui permet de passer du signal brut vu par le capteur à des valeurs exploitables dans un logiciel de traitement de données. Les signaux électriques fournis par la balance étant très faibles (on parle alors de pico Coulombs), il est nécessaire d'amplifier le signal afin de pouvoir le traiter (les données techniques de l'amplificateur se trouve en annexe 10.5.3). Pour ce faire, l'utilisation d'un amplificateur est requis. Lorsque le signal est amplifié, il faut pouvoir le transférer sur l'ordinateur en tant que signal numérique grâce à l'utilisation d'un DAQ. C'est après toutes ces étapes que le signal peut être traité sur le logiciel LabView.

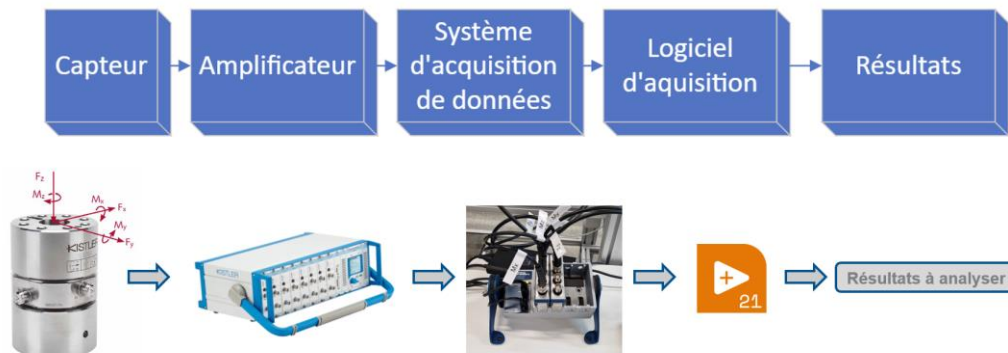


Figure 42 : Schéma de la chaîne d'acquisition

Le Tableau 1 représente le modèle et le numéro de série de chaque élément de la chaîne d'acquisition ainsi que les canaux utilisés et leurs plages de mesure pour la mesure à l'aide de la balance 6 axes.

Tableau 1 : Spécification de la chaîne d'acquisition pour la balance

Capteur	N° série	Amplificateur	N° série	DAQ	N° série	Carte d'acquisition	N° série	Dénomination	Canal	Plage de mesure
6-axis Force/Moment Type 9306A (Kistler)	5214120	Charge Amplifier Type 5080A (Kistler)	5612586	NI cDAQ-9174	19F78E9	NI 9223	1BBC1D9	Fx	AI0	± 400 N
								Fy	AI1	± 1000 N
								Fz	AI2	± 2000 N
								Mx	AI3	± 200 Nm
						NI 9223	1BBC1F5	My	AI0	± 200 Nm
								Mz	AI1	± 10 Nm

Grâce à l'interface LabView [Figure 43], il est possible de contrôler les valeurs mesurées par la balance en tout temps. En fonction de certains points de mesure, il est possible de tracer des courbes pendant les mesures, ce qui permet de contrôler si les mesures sont cohérentes ou non. Il est aussi possible de régler le temps et la fréquence d'acquisition directement depuis l'interface LabView.

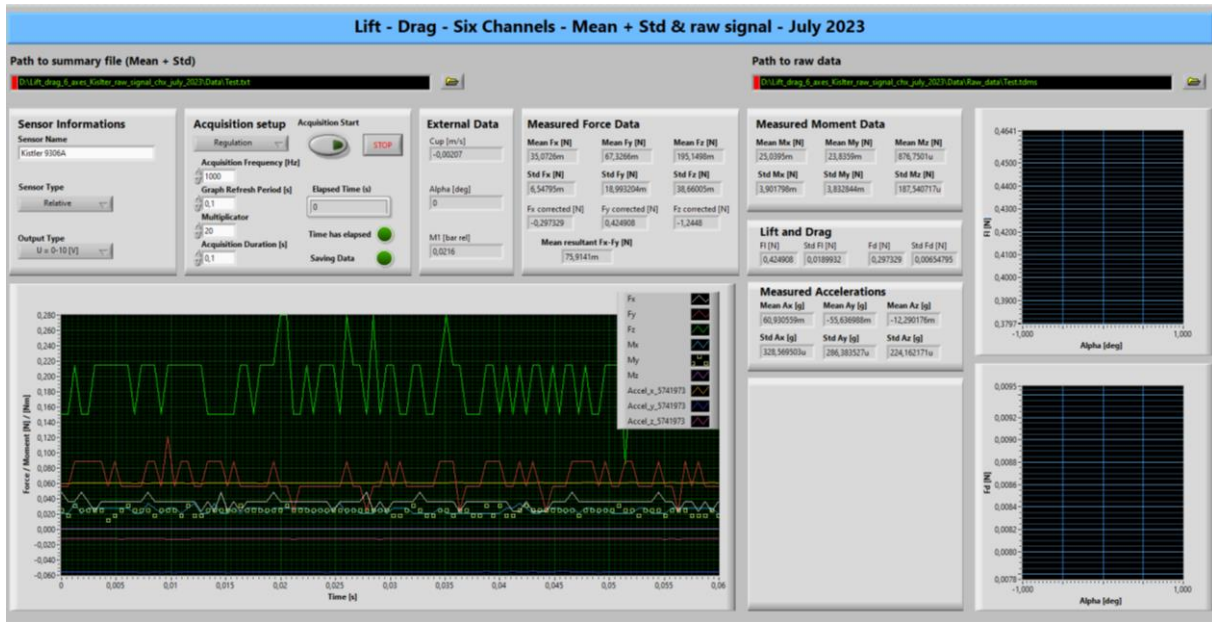


Figure 43 : Interface LabView pour l'acquisition de forces, moments et accélérations

Comme la montre la Figure 41, les axes de référence de la balance sont fixes. Cependant lorsque l'on modifie l'incidence du profil, le système de coordonnées de la balance tourne avec celui du profil [Figure 44 et Figure 45]. Or, dans ce projet, il est surtout important de comprendre l'influence de la cavitation sur les efforts de portance et de trainée qui se mesurent respectivement perpendiculairement et parallèlement à l'écoulement. Il est donc nécessaire de convertir les forces vues par la balance ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ) dans le référentiel de l'écoulement  $C_\infty$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). Une simple matrice de rotation [Figure 46] est utilisée pour passer de de l'axe  $Y'$  à  $Y$ . Une matrice de rotation est aussi utilisée pour passer de l'axe  $X'$  à  $X$ , mais sur cet axe, une inversion de signe est opérée au préalable.

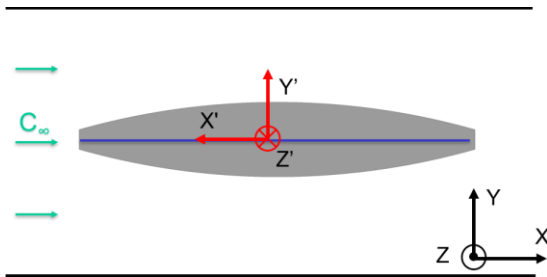


Figure 44 : Référentiel de la balance sans incidence ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ). Référentiel par rapport à l'écoulement  $C_\infty$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )

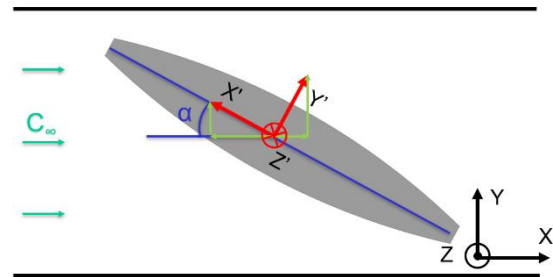


Figure 45 : Référentiel de la balance avec incidence ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ). Référentiel par rapport à l'écoulement  $C_\infty$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )

$$R(\theta) = \begin{pmatrix} \cos \theta & -\sin \theta \\ \sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \text{ (rotation d'angle } \theta \text{)}$$

Figure 46 : Matrice de rotation d'un angle  $\theta$

#### 4.1.6 Accéléromètre

Un accéléromètre détecte les changements de vitesse en mesurant les déplacements d'une masse interne lorsque l'appareil est en mouvement. Ces mouvements sont transformés en signaux électriques grâce à la propriété piézorésistif de l'accéléromètre qui indiquent l'accélération subie. Les données techniques de l'accéléromètre se trouve en annexe 10.5.2

Un accéléromètre est utilisé afin de mesurer les vibrations générées sur le profil de la lentille. La prise de mesure d'accélération se fait sur 3 axes ( $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ ). L'accéléromètre se colle à l'arrière du profil. Il est positionné pour que les directions des axes  $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$  soit confondues avec le référentiel de la balance  $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ . Cependant, le sens des axes n'est pas identique. C'est pourquoi il faut procéder à un changement de référentiel lors du traitement de données [Figure 47].

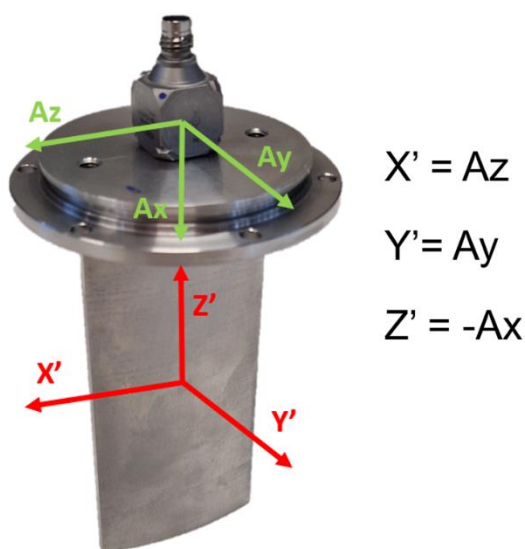


Figure 47 : Référentiel de la balance (rouge) et référentiel de l'accéléromètre (vert)

Le Tableau 2 représente le modèle et le numéro de série de chaque élément de la chaîne d'acquisition ainsi que les canaux utilisés pour la prise de mesure à l'aide de l'accéléromètre.

Tableau 2 : Spécification de la chaîne d'acquisition pour l'accéléromètre

Capteur	N° série	DAQ	N° série	Carte d'acquisition	N° série	Dénomination	N° de Canal
Accéléromètre 3 axes Type 8688A50 (Kistler)	5741973	NI cDAQ-9174	19F78E9	NI 9234	1E35AA1	Ax	AI0
						Ay	AI1
						Az	AI2

## 4.2 Visualisation

Pour certains points de mesure, il est intéressant de visualiser le phénomène de cavitation lors de l'analyse des résultats. Il est donc préférable de prendre des images en même temps que l'acquisition de données. Afin de bien comprendre ce qu'il se passe dans la veine de cavitation, il est judicieux de photographier le profil depuis la face avant ainsi que depuis le dessus.

Un appareil photo Nikon D800 est utilisé pour la prise d'image. Il permet un temps d'ouverture d'objectif de 1/8000s. Avec un temps d'exposition autant court, il est nécessaire d'apporter une

forte source lumineuse à l'appareil. La lampe LED Constellation 120 ainsi qu'un panneau LED sont utilisés comme source lumineuse [Tableau 3].

Tableau 3 : Caractéristiques des éléments d'éclairage

Dénomination	Specifications	Valeurs
Constellation 120	Source Type	White LED
	Input Voltage	48 VDC
	Luminance	12'000 lm
Panneau LED PHLOX-LEDW-BL 500X250-MSLLUB-Q-1R-24V	Source Type	White LED
	Input Voltage	24 VDC
	Luminance	≥ 30'000 cd/m <sup>2</sup>

Pour les images prises sur le côté [Figure 48], l'appareil photo est monté sur un trépied. Afin de garantir le positionnement du trépied, le sol a été marqué. Le panneau LED se pose directement sous la veine afin d'apporter de la lumière depuis le dessous. La lampe Constellation 12 est quant à elle positionnée verticalement au-dessus de la veine au niveau du profil.

Pour les images prises depuis le dessus [Figure 49], l'appareil photo est monté sur un trépied de façon verticale. Le trépied est fixe. La lampe Constellation 12 est quant à elle positionnée légèrement sur le côté afin de ne pas voir de reflet lors de la prise de vue. Un cache noir vient se positionner sous la veine pour ne pas voir le fond du banc sur l'image. L'utilisation du panneau LED n'est pas nécessaire pour les prises de vue de dessus.



Figure 48 : Setup pour la prise d'image depuis le côté

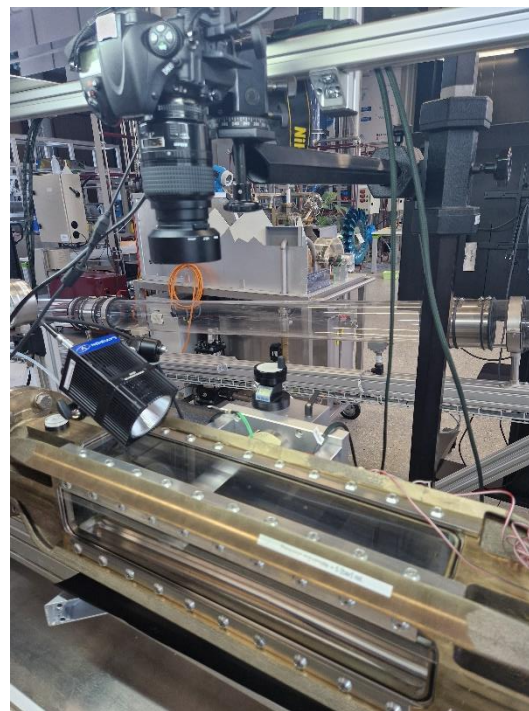


Figure 49 : Setup pour la prise d'image depuis le dessus

### 4.3 Préparation du banc

Dans ce chapitre, il sera question de toutes les étapes faites au préalable avant de commencer les mesures.

#### 4.3.1 Effort sur les vis

Le profil est fixé sur la balance grâce à 6 vis à tête cylindrique six pans creux M3x10 (**cercles rouges**) [Figure 50]. Lors de l'utilisation du banc, les vis en question subissent un certain effort engendré par l'écoulement de l'eau autour du profil [Figure 51]. Il est donc nécessaire de savoir quel effort maximal les vis peuvent-elles supporter avant rompre afin de déterminer quelle limite de moment et de force est applicable lors des mesures.

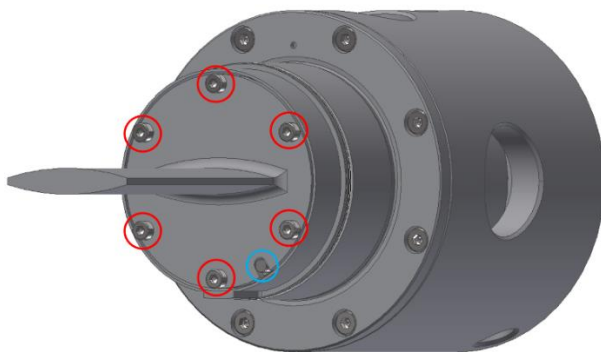


Figure 50 : Fixation du profil sur la balance

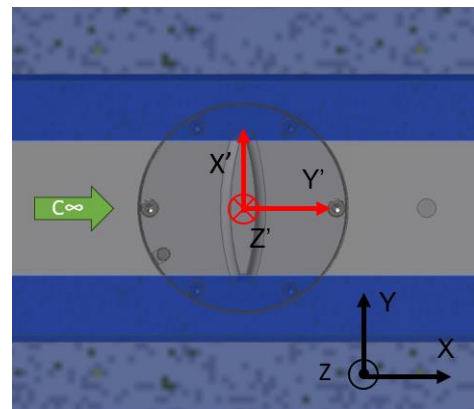


Figure 51 : Exemple de sollicitation sur les vis. Incidence du profil à 90° (vanne fermée). Effort dû à l'écoulement génère une force en Y' et un moment autour de X'

Les hypothèses pour le calcul sont les suivantes :

- Le point de pivot du profil se trouve au niveau de la vis supérieure (**cercle vert**) [Figure 52]. La vis supérieure ne subit donc aucun effort.
- Le cisaillement des vis est négligé, car un détrompeur (**cercle bleu**) [Figure 50] permet d'éviter la rotation du profil autour de son axe.
- Un coefficient de sécurité de 2 sur la résistance élastique (Rp0.2) est pris en compte lors des calculs.

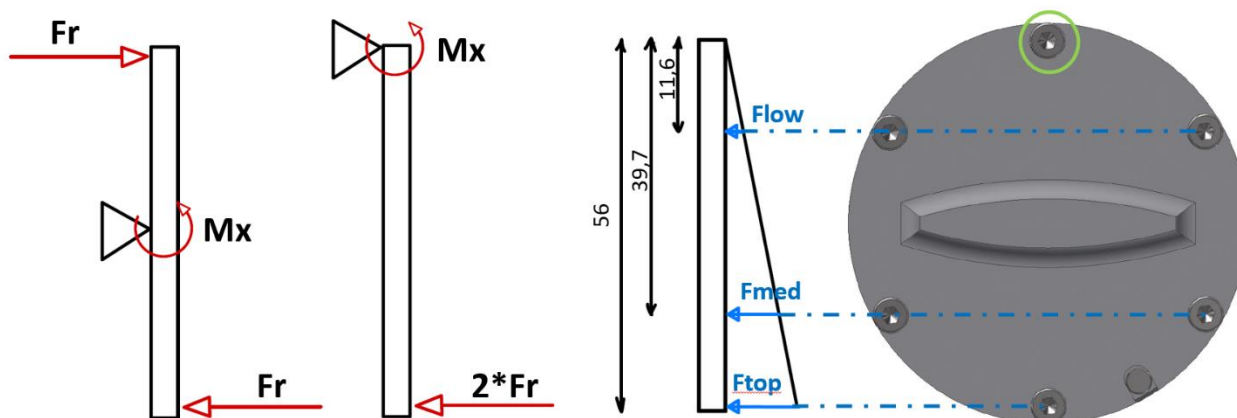


Figure 52 : Schéma pour les calculs des efforts pour les vis de fixation

La classe de qualité des vis est de **8.8** ( $R_{p02} = 640 \text{ N/mm}^2$ ) et le pourcentage d'utilisation de la résistance élastique est fixé à **40%**. Le coefficient de frottement dans le filet ainsi que sous la tête de vis est de **0,12**. Le couple de serrage des vis est donc de **0.59 Nm** et la précontrainte due à serrage s'élève à **1.13 kN** [Figure 53] selon le calculateur Bossard[12].

#### Résultat

Couple de serrage maximum admissible :	0.59 Nm
Précontrainte Max admissible:	1.13 kN
Pression de surface maximale sous la tête de vis / écrou:	101.85 N/mm <sup>2</sup>

Figure 53 : Couple et précontrainte selon le calculateur Bossard[12]

Le moment mesuré par la balance (**M<sub>x</sub>**) n'est pas le même que celui vu par les vis (**M<sub>vis</sub>**) [Figure 54]. Il faut procéder à une conversion grâce à l'Équation 12.

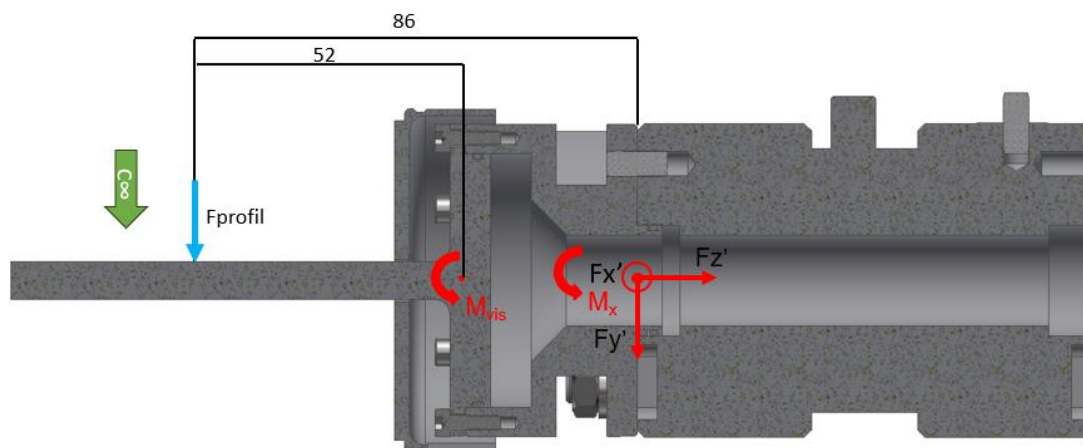


Figure 54 : Schéma de position des forces et des moments

Équation 12 : Formule de conversion entre M<sub>x</sub> et M<sub>vis tot</sub>

$$M_x = \frac{86}{52} * M_{vis \text{ tot}}$$

L'idée principale est de déterminer le déplacement maximal que peut supporter la vis qui est la plus sollicitée avant d'atteindre sa contrainte maximale de déplacement [Équation 13] en utilisant la loi de Hooke [Équation 14]. Dans le cas suivant, c'est la vis qui voit la force de traction  $F_{top}$ . Lorsque le déplacement est déterminé, il suffit de calculer le déplacement vu par les autres vis ( $vis_{med}$  et  $vis_{low}$ ) qui est proportionnel selon leurs positions (loi des triangles semblables). L'analyse du déplacement individuel de chaque vis permet d'évaluer la force de traction exercée sur chacune d'elles, ce qui à son tour offre un aperçu du moment supporté par chacune des vis. En additionnant les moments repris par chaque vis ( $M_{vis\ tot}$ ) [Équation 15], il est possible de connaître le moment maximal mesuré par la balance ( $M_x$ ) [Équation 12].

*Équation 13 : Formule pour  $\sigma$  déplacement*

$$\sigma_{déplacement} = \sigma_{admissible} - \sigma_{précharge}$$

*Équation 14 : Loi de Hooke*

$$\sigma = \frac{F}{S} = E\varepsilon$$

*Équation 15 : Formule pour le  $M_{vis\ tot}$*

$$M_{vis\ tot} = M_{vis\ low} + M_{vis\ med} + M_{vis\ top}$$

Les résultats indiquent que le moment maximal admissible  $M_x$  avec un coefficient de sécurité de **2** est de **93 Nm**. Sans coefficient de sécurité, cette valeur est de **404 Nm**. La feuille de calculs Excel se trouve en annexe 10.6.1

#### 4.3.2 Paramètres limites

Définir les paramètres limites permet de connaître les limites à ne pas dépasser avant d'endommager le banc de test, le profil et les instruments de mesure.

Une fois que le moment maximal  $M_x$  a été identifié, l'étape suivante consiste à évaluer divers débits pour l'angle d'incidence le plus critique ( $90^\circ$ ). L'objectif est de déterminer jusqu'où il est envisageable de progresser afin d'atteindre le seuil de 100 Nm. Le protocole de mesure se trouve en annexe 10.3.1.

Les résultats du test [Figure 55] indiquent que la valeur  $M_x$  de 100 Nm est atteinte pour un débit de 11 m<sup>3</sup>/h. Ce moment correspond à une résultante des force  $F_x$ - $F_y$  de 800 N.

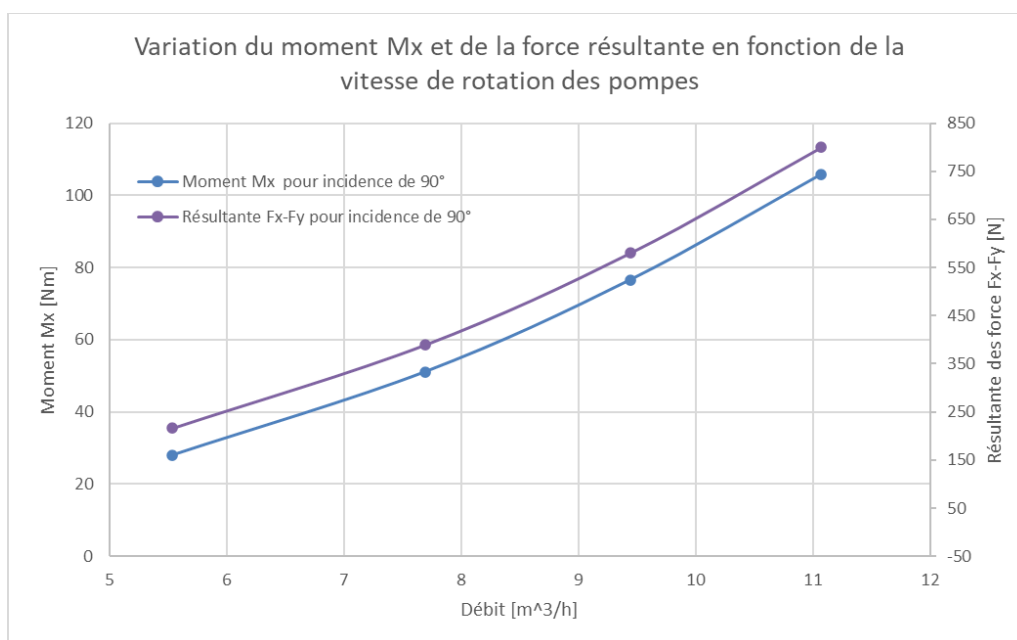


Figure 55 : Résultats du test « paramètres limites »

Les limites à ne pas dépasser sont donc :

- Le moment Mx : **100 Nm**
- Résultante Fx-Fy : **800 N**
- Pression max dans la veine : **4.5 bars**
- Température dans la veine : **15-25 °C**
- Vitesse maximale dans la veine : **11.8 m/s**

### 4.3.3 Calibration profil

La calibration du profil permet de compenser les forces engendrées par le déplacement du centre de masse lors de la rotation du profil ainsi que les forces engendrées par l'effet de la pression lorsque l'on pressurise ou dépressurise le réservoir en aval. Les valeurs de force, de moment, de pression et d'angle sont enregistrées et moyennées sur 2 secondes grâce au script LabView lorsque qu'aucun débit ne circule dans la veine. En balayant les angles de  $-90^\circ$  à  $+90^\circ$  par incrément de  $10^\circ$  et en variant la pression de  $-0.7\text{bar}$  à  $+4.5\text{bars}$ , il est possible de tracer une courbe 3D de l'évolution des forces ( $F_x$ ,  $F_y$ ,  $F_z$ ) en fonction de la pression et de l'incidence [Figure 56, Figure 57 et Figure 58]. Le protocole de mesure se trouve en annexe 10.3.2.

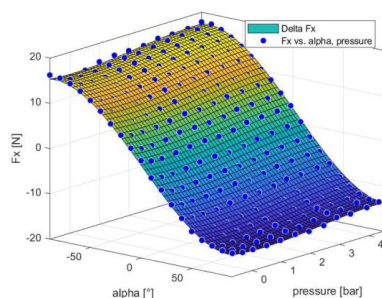


Figure 56 : Courbe 3D Pour Fx

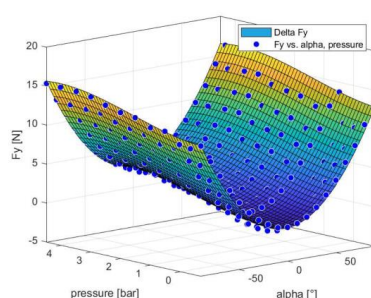


Figure 57 : Courbe 3D Pour Fy

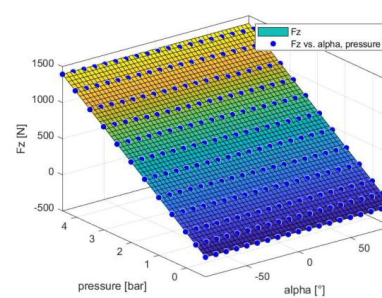


Figure 58 : Courbe 3D Pour Fz

Une approximation polynomiale est réalisée pour chaque composante de force en fonction de la pression et de l'incidence. Les facteurs des polynômes sont ensuite sauvegardés dans un fichier texte [Figure 59] pour être, par la suite, implémentés dans le script LabView [Figure 60]. L'implémentation des polynômes dans l'interface LabView permet de calculer, pour chaque conditions (angle, pression), la valeur théorique d'une composante de force et de la soustraire à la valeur mesurée (Fx, Fy, Fz) en temps réel afin de déterminer la valeur corrigée (Fxcorr, Fycorr, Fzcorr) [Figure 60]. Après cette soustraction, les forces en Xcorr et Ycorr sont insérées dans une routine de rotation de système de coordonnées pour calculer les valeurs de portance et de traînée.

#### Polynôme Fx

```
Linear model Poly33:
polyFx(x,y) = p00 + p10*x + p01*y + p20*x^2 + p11*x*y + p02*y^2 + p30*x^3
              + p21*x^2*y + p12*x*y^2 + p03*y^3
Coefficients (with 95% confidence bounds):
p00 = 0.333 (0.2255, 0.4404)
p10 = -0.2669 (-0.2692, -0.2645)
p01 = -0.0377 (-0.1573, 0.08192)
p20 = -7.141e-05 (-9.664e-05, -4.619e-05)
p11 = -0.0009977 (-0.002426, 0.0004303)
p02 = 0.4215 (0.336, 0.5071)
p30 = 1.195e-05 (1.158e-05, 1.231e-05)
p21 = -1.437e-05 (-2.485e-05, -3.898e-06)
p12 = 0.0001007 (-0.0002655, 0.000467)
p03 = -0.06213 (-0.07705, -0.04722)
```

Figure 59 : Polynôme de la courbe 3D Fx

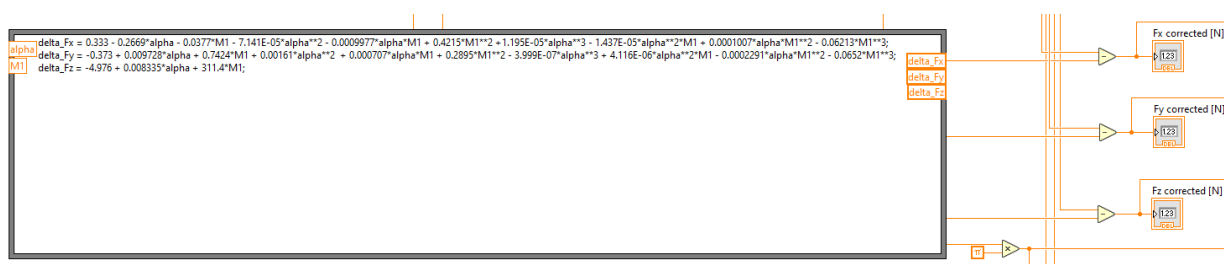


Figure 60 : Implémentation des polynômes dans LabView

Il est important de procéder à une vérification de la calibration. Pour vérifier la justesse des corrections mises en place, la procédure de calibration est réitérée en préservant les valeurs corrigées des composantes de force et de moment. De cette manière, lorsque le profil est tourné et que la veine est pressurisée, les valeurs corrigées devraient systématiquement se rapprocher de 0. Cette méthode permet également de déterminer l'ampleur de l'erreur de mesure.

Les résultats de la validation [Tableau 4] indiquent que les moyennes et les écarts types sont proche de 0 pour les composantes Fx et Fy. Les valeurs sont légèrement plus grandes pour

Fz. En effet, Fz est beaucoup plus réactif à l'augmentation et à la diminution du niveau de pression. En effet, les pressions en rouge et vert, respectivement les pressions en Y et X, se compensent de chaque côté du profil [Figure 61]. Tandis que pour la pression appliquée en Z, représentée par les flèches bleues, on constate qu'elle n'est pas compensée par une pression dans le sens opposé ce qui engendre des forces plus grandes que dans les axes X et Y. la force engendrée par la pression étant plus grande en Z implique une plus grande valeur de correction pour l'axe Z que pour les axes X et Y pour la même variation de pression. La précision de correction est donc légèrement plus faible au niveau des forces en Z.

Tableau 4 : Moyennes et écarts types des mesures de validation de la calibration du profil

	FxMeanCorrectedN	FyMeanCorrectedN	FzMeanCorrectedN
Moyenne	-0,3	-0,4	-2,3
$\sigma$	0,4	0,5	2,8

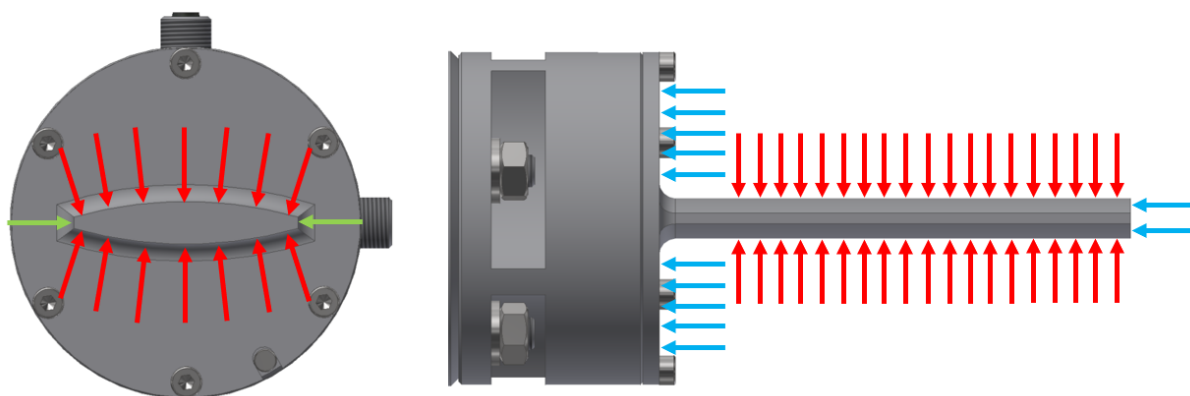


Figure 61 : Application de la pression Hs sur le profil

Les résultats complets de la validation de la calibration se trouve en annexe 10.6.3.

#### 4.4 Plan d'expérience

Le plan d'expérience est représenté par la Figure 62. Il est divisé en deux sections distinctes, la première et la seconde :

La première concerne tous les tests et les marches à suivre permettant la préparation à l'évaluation de l'influence de la cavitation sur une lentille de vanne papillon. La deuxième section, quant à elle, correspond à tous les tests permettant l'évaluation à proprement parler de l'influence de la cavitation sur un profil.

### PLAN D'EXPÉRIENCE

#### 3. Première étape

##### 3.1 Montage de la lentille

Montage de la lentille dans la veine de cavitation

##### 3.2 Définir les paramètres limites

Connaitre les limites du banc, du profil et des instruments de mesure

##### 3.3 Calibration de la lentille

Créer les polynômes permettant de compenser les effets de la pression et le déplacement du centre de masse

##### 3.4 Carte de cavitation

Permet de voir de manière qualitative les zones où se développent les différents régimes de cavitation

##### 3.5 Répétabilité

Permet de valider la fiabilité de mesure

##### 3.6 Temps d'acquisition

Déterminer l'influence du temps d'acquisition sur les résultats de la mesure

#### 4. Deuxième étape

##### 4.1 $\alpha$ variable et $\sigma$ fixe

###### Sans cavitation ( $\sigma = 6.7$ )

Variation  $C_D, C_V, C_{M_z}$  en fct de  $\alpha$

Variation de  $K_v$  en fct de  $\alpha$

Vibration  $A_x, A_y, A_z$  en fonction de  $\alpha$

###### Avec cavitation ( $\sigma = 4$ )

Variation  $C_D, C_V, C_{M_z}$  en fct de  $\alpha$

Variation de  $K_v$  en fct de  $\alpha$

Vibration  $A_x, A_y, A_z$  en fonction de  $\alpha$

###### Avec cavitation ( $\sigma = 2.4$ )

Variation  $C_D, C_V, C_{M_z}$  en fct de  $\alpha$

Variation de  $K_v$  en fct de  $\alpha$

Vibration  $A_x, A_y, A_z$  en fonction de  $\alpha$

##### 4.2 $\sigma$ variable et $\alpha$ fixe

$C_D, C_V, C_{M_z}$

Permet de voir comment chaque type de cavitation influence les efforts

$K_v$

Permet de voir comment chaque type de cavitation influence le coefficient de débit

##### 4.3 fermeture et ouverture

Pour  $H = 1-2$  bars

Pour  $H_s = -0.4 - 0 - 2$  bars

$C_D, C_V, C_{M_z}$

Permet de voir les efforts lors de la fermeture et l'ouverture complète de la vanne

$A_x, A_y, A_z$

Permet de voir les vibrations lors de la fermeture et l'ouverture complète de la vanne

$K_v$

Permet de voir l'influence d'une fermeture et d'une ouverture sur le coefficient de débit

Figure 62 : Plan d'expérience

## 5 Résultats

Dans ce chapitre seront présentés les résultats de chaque expérience. Les protocoles de mesure détaillés de chaque expérience se trouvent en annexe.

Dans certains graphiques présentés dans ce chapitre, le type de cavitation sera représenté par une lettre. Chaque lettre correspond à un type de cavitation :

- F : Sans cavitation
- P : Cavitation poche
- C : Cavitation de cisaillement
- B : Cavitation bulle
- S : Supercavitation

## 5.1 Répétabilité

Le test de répétabilité est un test qui permet de vérifier si les résultats des mesures sont similaires pour des conditions identiques. Le test de répétabilité est important lors de modifications importantes sur le banc ou sur le software d'acquisition. Afin de comparer les prises de mesures entre elles, une erreur absolue et relative est calculée. Cependant, il est important de souligner que l'erreur relative n'est pas représentative lorsque les valeurs mesurées sont très faibles. En effet, la division par une valeur proche de zéro aura tendance à augmenter énormément l'erreur relative alors que l'erreur absolue restera très faible. C'est pourquoi il est important que considérer les deux erreurs (relatives et absolues) lors de la comparaison des résultats. Le protocole de mesure se trouve en annexe 10.3.4.

Le test de répétabilité a été fait trois fois. La première afin d'avoir une série de mesure référence. La deuxième, à la suite du démontage du profil afin d'installer l'accéléromètre (Test 1). Et la dernière à la suite de la modification du software LabView pour l'acquisition de données de la balance (Test 2). Voici les résultats :

Les Figure 63 et Figure 64 représentent les résultats de répétabilité entre la référence et le test N°1 et N°2. On remarque directement que la majorité des valeurs relatives sont en dessous de 14% (cases vertes). Cependant, quelques valeurs dépassent le seuil des 20% (cases rouges). En regardant les erreurs absolues (cases bleues) correspondant à chaque dépassement du seuil des 20%, on constate que les valeurs restent très faibles.

	Q [m³/h]	Alpha [°]	Fx mean [N]	Fy mean [N]	Mz mean [Nm]	Fx std [N]	Fy std [N]	Mz std [Nm]	Fx mean corrected [N]	Fy mean corrected [N]	Fd [N]	FI [N]	Std Fd [N]	Std FI [N]	Mean resultant Fx-Fy [N]
Référence	41,54	55,00	-11,99	779,91	1,17	7,84	18,38	0,11	-0,43	772,67	633,18	442,83	19,55	4,12	780,00
	62,74	45,00	-22,75	746,96	1,75	10,17	17,69	0,12	-12,90	741,65	533,55	515,30	19,70	5,32	747,31
	83,36	38,50	-32,19	743,98	2,35	9,10	9,91	0,10	-23,85	739,44	478,98	563,85	13,30	2,09	744,67
	104,41	33,00	-53,21	745,84	3,05	10,62	9,79	0,10	-46,38	741,69	442,85	596,77	14,24	2,43	747,73
Test 1	41,91	55,00	-12,90	781,51	1,24	7,21	16,44	0,11	-1,34	774,27	635,01	443,00	17,60	3,53	781,61
	62,62	45,00	-23,51	731,45	1,76	9,53	15,48	0,12	-13,62	726,19	523,12	503,86	17,68	4,21	731,82
	83,71	38,50	-32,69	753,64	2,43	8,78	10,00	0,07	-24,36	749,08	485,38	571,08	13,10	2,36	754,35
	104,42	33,00	-54,71	752,15	3,11	9,64	9,93	0,09	-47,87	748,00	447,54	601,25	13,49	3,08	754,14
Erreur abs	0,37	0,00	-0,91	1,59	0,07	-0,63	-1,94	0,00	-0,91	1,59	1,83	0,17	-1,95	-0,60	1,61
	-0,12	0,00	-0,76	-15,51	0,02	-0,64	-2,21	0,00	-0,72	-15,46	-10,42	-11,44	-2,01	-1,11	-15,48
	0,35	0,00	-0,50	9,66	0,07	-0,32	0,09	-0,03	-0,51	9,64	6,40	7,23	-0,20	0,27	9,67
	0,01	0,00	-1,50	6,31	0,06	-0,98	0,14	-0,01	-1,50	6,31	4,69	4,48	-0,75	0,65	6,40
Erreur rel	1%	0%	8%	0%	6%	-8%	-11%	-1%	211%	0%	0%	0%	-10%	-14%	0%
	0%	0%	3%	-2%	1%	-6%	-12%	0%	6%	-2%	-2%	-2%	-10%	-21%	-2%
	0%	0%	2%	1%	3%	-4%	1%	-28%	2%	1%	1%	1%	-1%	13%	1%
	0%	0%	3%	1%	2%	-9%	1%	-11%	3%	1%	1%	1%	-5%	27%	1%

Figure 63 : Résultat du test de répétabilité après la pose de l'accéléromètre

	Q [m³/h]	Alpha [°]	Fx mean [N]	Fy mean [N]	Mz mean [Nm]	Fx std [N]	Fy std [N]	Mz std [Nm]	Fx mean corrected [N]	Fy mean corrected [N]	Fd [N]	FI [N]	Std Fd [N]	Std FI [N]	Mean resultant Fx-Fy [N]
Référence	41,54	55,00	-11,99	779,91	1,17	7,84	18,38	0,11	-0,43	772,67	633,18	442,83	19,55	4,12	780,00
	62,74	45,00	-22,75	746,96	1,75	10,17	17,69	0,12	-12,90	741,65	533,55	515,30	19,70	5,32	747,31
	83,36	38,50	-32,19	743,98	2,35	9,10	9,91	0,10	-23,85	739,44	478,98	563,85	13,30	2,09	744,67
	104,41	33,00	-53,21	745,84	3,05	10,62	9,79	0,10	-46,38	741,69	442,85	596,77	14,24	2,43	747,73
Test 2	41,69	55,00	-12,52	773,40	1,24	7,74	16,53	0,11	-0,94	766,18	628,16	438,69	17,98	3,14	773,50
	62,65	45,00	-23,02	732,48	1,78	9,97	17,50	0,13	-13,14	727,22	523,51	504,93	19,42	5,33	732,84
	83,63	38,50	-32,26	750,31	2,43	8,70	9,77	0,08	-23,93	745,76	482,98	568,74	12,89	2,23	751,00
	104,48	33,00	-53,32	751,00	3,13	9,12	9,63	0,09	-46,51	746,83	445,76	601,01	12,89	3,11	752,89
Erreur abs	0,15	0,00	-0,52	-6,51	0,06	-0,10	-1,85	0,00	-0,51	-6,49	-5,02	-4,14	-1,57	-0,98	-6,50
	-0,09	0,00	-0,27	-14,48	0,03	-0,20	-0,19	0,01	-0,24	-14,43	-10,04	-10,37	-0,28	0,01	-14,46
	0,27	0,00	-0,07	6,33	0,08	-0,41	-0,14	-0,02	-0,08	6,32	4,00	4,90	-0,41	0,14	6,33
	0,07	0,00	-0,11	5,16	0,08	-1,50	-0,16	-0,01	-0,13	5,14	2,91	4,24	-1,35	0,68	5,16
Erreur rel	0%	0%	4%	-1%	5%	-1%	-10%	-3%	118%	-1%	-1%	-1%	-8%	-24%	-1%
	0%	0%	1%	-2%	2%	-2%	-1%	6%	2%	-2%	-2%	-2%	-1%	0%	-2%
	0%	0%	0%	1%	3%	-4%	-1%	-20%	0%	1%	1%	1%	-3%	7%	1%
	0%	0%	0%	1%	3%	-14%	-2%	-9%	0%	1%	1%	1%	-9%	28%	1%

Figure 64 : Résultat du test de répétabilité après la modification du software LabView

Il est intéressant de comparer par la même occasion le test N°1 avec le test N°2 [Figure 65]. On constate directement que le nombre de valeurs dépassant le seuil des 20 % d'erreur relative est plus faible que pour les deux figures précédentes. De nouveau, les valeurs relatives dépassant le seuil de 20% sont en réalité très faibles lorsque l'on regarde l'erreur absolue correspondante.

	Q [m³/h]	Alpha [°]	Fx mean [N]	Fy mean [N]	Mz mean [Nm]	Fx std [N]	Fy std [N]	Mz std [Nm]	Fx mean corrected [N]	Fy mean corrected [N]	Fd [N]	Fi [N]	Std Fd [N]	Std Fi [N]	Mean resultant Fx-Fy [N]
Test 1	41,91	55,00	-12,90	781,51	1,24	7,21	16,44	0,11	-1,34	774,27	635,01	443,00	17,60	3,53	781,61
	62,62	45,00	-23,51	731,45	1,76	9,53	15,48	0,12	-13,62	726,19	523,12	503,86	17,68	4,21	731,82
	83,71	38,50	-32,69	753,64	2,43	8,78	10,00	0,07	-24,36	749,08	485,38	571,08	13,10	2,36	754,35
	104,42	33,00	-54,71	752,15	3,11	9,64	9,93	0,09	-47,87	748,00	447,54	601,25	13,49	3,08	754,14
Test 2	41,69	55,00	-12,52	773,40	1,24	7,74	16,53	0,11	-0,94	766,18	628,16	438,69	17,98	3,14	773,50
	62,65	45,00	-23,02	732,48	1,78	9,97	17,50	0,13	-13,14	727,22	523,51	504,93	19,42	5,33	732,84
	83,63	38,50	-32,26	750,31	2,43	8,70	9,77	0,08	-23,93	745,76	482,98	568,74	12,89	2,23	751,00
	104,48	33,00	-53,32	751,00	3,13	9,12	9,63	0,09	-46,51	746,83	445,76	601,01	12,89	3,11	752,89
Erreur abs	-0,22	0,00	0,39	-8,11	-0,01	0,53	0,09	0,00	0,40	-8,08	-6,85	-4,31	0,37	-0,38	-8,11
	0,03	0,00	0,49	1,04	0,01	0,44	2,02	0,01	0,48	1,03	0,38	1,07	1,74	1,12	1,02
	-0,08	0,00	0,43	-3,33	0,01	-0,09	-0,23	0,01	0,43	-3,32	-2,40	-2,33	-0,21	-0,13	-3,34
	0,06	0,00	1,39	-1,15	0,01	-0,52	-0,30	0,00	1,36	-1,18	-1,78	-0,24	-0,60	0,03	-1,25
Erreur rel	-1%	0%	-3%	-1%	-1%	7%	1%	-2%	-30%	-1%	-1%	-1%	2%	-11%	-1%
	0%	0%	-2%	0%	1%	5%	13%	6%	-4%	0%	0%	0%	10%	27%	0%
	0%	0%	-1%	0%	0%	-1%	-2%	10%	-2%	0%	0%	0%	-2%	-5%	0%
	0%	0%	-3%	0%	0%	-5%	-3%	2%	-3%	0%	0%	0%	-4%	1%	0%

Figure 65 : Résultat du test de répétabilité en comparant le test 1 et le test 2

D'après ces résultats, il est possible d'affirmer que la répétabilité des résultats est garantie lors de chaque mesure.

## 5.2 Temps d'acquisition

Le temps d'acquisition est un paramètre important lors de la mesure. Pendant la mesure, un nombre de points est enregistré selon le temps d'acquisition et la fréquence d'acquisition [Équation 16]. Ensuite, le logiciel LabView calcule une moyenne sur le nombre de point enregistré ainsi qu'un écart type. Le choix de la fréquence d'échantillonnage ainsi que le temps d'acquisition doivent permettre de capturer le phénomène avec la fréquence la plus élevée ainsi que le phénomène le plus long.

Équation 16 : Nombre de prise de point pour une mesure

$$\text{Nbr de point} = t_{\text{acquisition}} * f_{\text{acquisition}}$$

La démarche consiste à prendre des points de mesure pour les 4 types de cavitation (sans cavitation, cavitation poche, cavitation de cisaillement et supercavitation). Il est question de tester plusieurs temps d'acquisition (1s, 2s, 5s et 10s) en gardant la même fréquence d'acquisition de 2048 Hz. Chaque point est enregistré 3 fois afin d'en faire une moyenne. Le but est de comparer les moyennes et écarts type pour chaque temps d'acquisition et déterminer le meilleur temps d'acquisition afin de garantir de bons résultats (Le protocole de mesure se trouve en annexe 10.3.5). Les résultats sont les suivants [Figure 66] :

Temps d'acquisition de donnée : Moyenne de toute les mesures															
AcqTime [s]	Alpha [deg]	Fx mean [N]	Fy mean [N]	Mz mean [Nm]	Fx std [N]	Fy std [N]	Mz std [Nm]	Fx mean corrected [N]	Fy mean corrected [N]	Fz mean corrected [N]	Fd [N]	Fl [N]	Std Fd [N]	Std Fl [N]	Mean resultant Fx-Fy [N]
1	5	-2,92	72,54	0,87	0,37	3,18	0,03	-2,89	70,86	-169,39	9,05	70,34	0,65	3,13	72,60
2	5	-2,85	72,72	0,87	0,37	3,22	0,03	-2,82	71,05	-155,43	9,00	70,54	0,65	3,18	72,78
5	5	-2,66	72,91	0,88	0,36	3,18	0,03	-2,62	71,26	-140,21	8,82	70,76	0,63	3,13	72,96
10	5	-2,48	73,20	0,88	0,35	3,15	0,02	-2,42	71,57	-138,20	8,65	71,08	0,62	3,10	73,24
1	10	1,56	160,00	1,77	2,63	8,29	0,06	3,66	159,30	-167,66	24,06	157,52	4,02	7,70	160,01
2	10	1,61	160,41	1,77	2,59	8,21	0,07	3,72	159,72	-175,30	24,07	157,94	3,97	7,63	160,42
5	10	1,66	160,66	1,77	2,69	8,43	0,07	3,77	159,97	-183,67	24,07	158,19	4,11	7,83	160,67
10	10	1,80	161,08	1,78	2,75	8,53	0,07	3,91	160,39	-202,93	24,01	158,63	4,19	7,92	161,09
1	15	-13,92	209,38	1,82	4,66	18,71	0,18	-10,94	207,68	-269,08	64,32	197,77	9,35	16,86	209,84
2	15	-14,19	208,26	1,81	4,48	18,03	0,18	-11,21	206,57	-276,28	64,29	196,63	9,00	16,25	208,74
5	15	-14,08	208,75	1,82	4,53	18,11	0,18	-11,10	207,06	-282,86	64,31	197,13	9,06	16,32	209,23
10	15	-14,00	209,23	1,83	4,55	18,18	0,18	-11,01	207,55	-292,97	64,35	197,63	9,10	16,38	209,70
1	20	-40,78	214,91	1,69	2,18	2,74	0,04	-35,92	213,96	-249,23	106,93	188,77	2,98	1,83	218,74
2	20	-40,75	214,66	1,69	2,15	2,93	0,04	-35,89	213,72	-241,45	106,82	188,55	3,02	2,02	218,49
5	20	-40,71	214,74	1,69	2,18	2,99	0,04	-35,85	213,80	-236,43	106,81	188,64	3,07	2,06	218,56
10	20	-40,49	214,83	1,70	2,17	2,85	0,04	-35,64	213,89	-242,59	106,64	188,80	3,02	1,94	218,61

Figure 66 : Temps d'acquisition – Résultats

Il est observé que les variations de résultats entre les périodes d'acquisition ne sont pas significatives, avec des valeurs toujours étroitement proches les unes par rapport aux autres.

Afin de garantir la condition de validité des résultats et du temps de mesure, le temps d'acquisition a été choisi à **2 secondes**.

### 5.3 Carte de cavitation

La carte de cavitation est un graphique qui représente le nombre de cavitation  $\sigma$  en fonction de l'incidence de la lentille  $\alpha$  [Figure 67]. Pour chaque incidence et chaque valeur de sigma, le type de cavitation est représenté. Il est donc possible de voir les zones dans lesquels chaque type de cavitation apparaît. Cela correspond à la carte d'identité du profil de la lentille. Chaque carte de cavitation est différente selon la forme du profil ainsi que selon le nombre de Reynolds fixé. Pour cette carte de cavitation, le Reynolds est fixé à 500'000. Tous les points enregistrés ont été accompagnés d'une prise d'images depuis le côté et le dessus du profil. Le protocole de mesure se trouve en annexe 10.3.3.

Cette carte présente de façon qualitative les régions où les divers régimes de cavitation apparaissent. Il convient de souligner que cette carte repose sur des observations visuelles. Son but est simplement d'indiquer approximativement comment obtenir un type spécifique de cavitation en fonction des valeurs de sigma et de l'angle d'incidence.

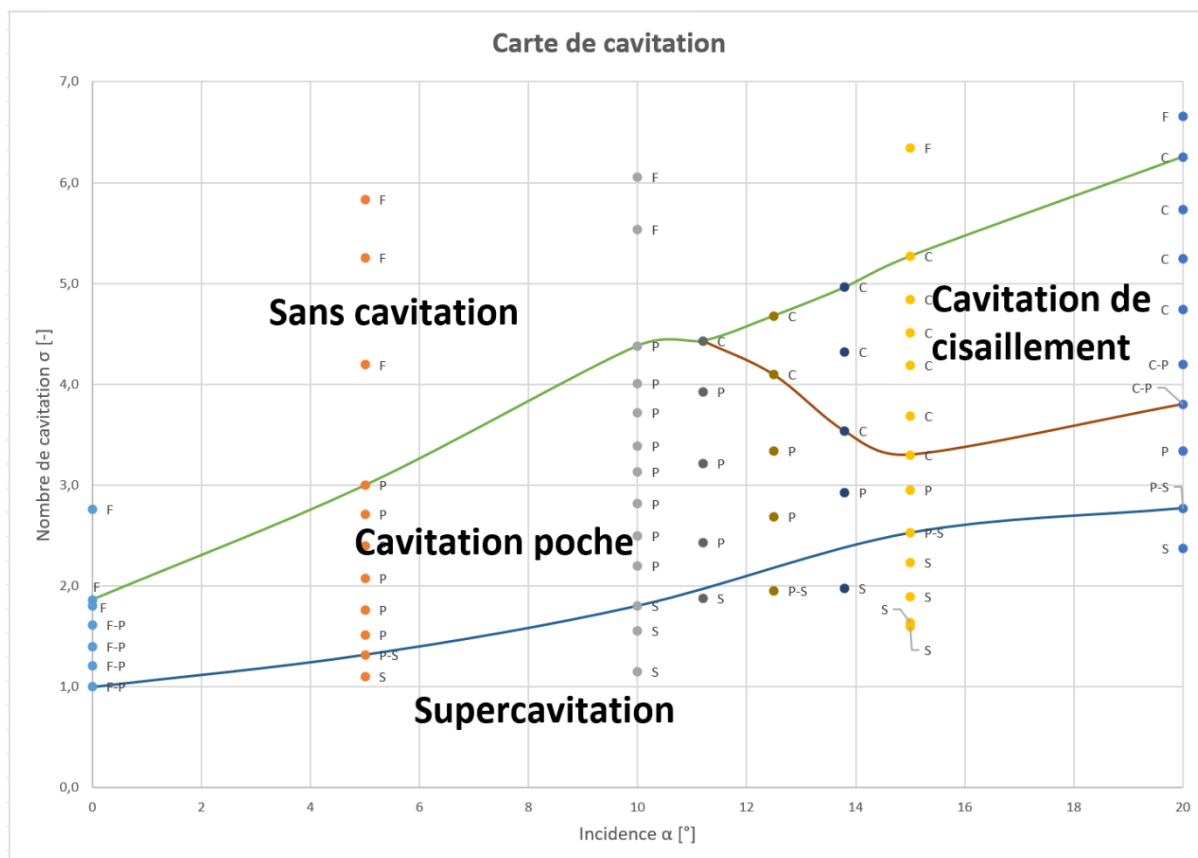


Figure 67 : Carte de cavitation pour un Reynolds de 500'000

Chaque type de cavitation se trouve dans une zone délimitée. Sur les images présentées ci-dessous, le sens de l'écoulement est toujours de gauche à droite :

Dans la zone non-cavitante, la cavitation n'apparaît pas [Figure 68 et Figure 69]. En effet, la pression autour du profil ne diminue pas assez fortement pour atteindre la pression de vaporisation.

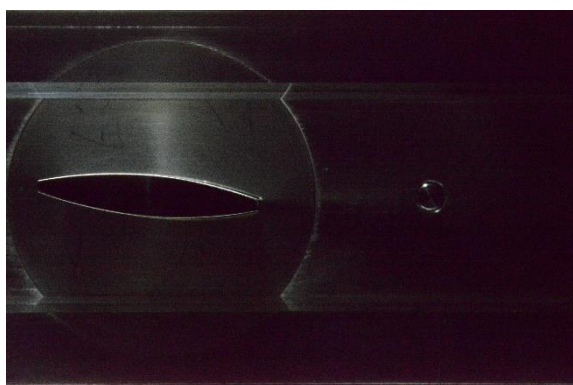


Figure 68 : Image du profil vu de côté. Incidence = 5° et  $\sigma = 5.8$ . Pas de cavitation

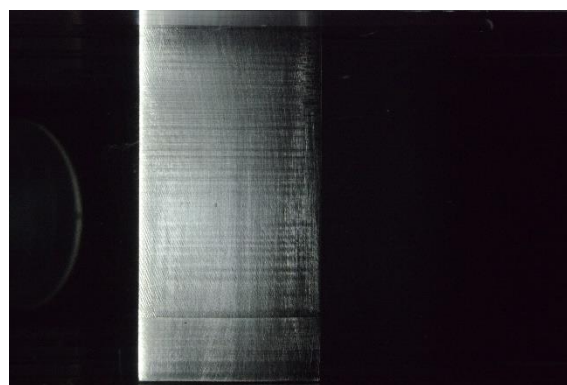


Figure 69 : Image du profil vu de dessus. Incidence = 5° et  $\sigma = 5.8$ . Pas de cavitation

La zone de cavitation poche comprend en réalité deux sous-type de cavitation. La poche de cavitation partielle et la poche diphasique. La cavitation partielle apparaît sous forme de bande attachée sur le bord d'attaque du profil [Figure 70 et Figure 71]. Cette bande se développe lorsque sigma diminue. On considère que la cavitation est partielle tant que son point de fermeture reste sur le profil [5, p. 136]. La poche diphasique [Figure 72 et Figure 73] quant à

elle, est une poche constituée d'un mélange de liquide et de vapeur contrairement à la cavitation partielle qui est constituée principalement de vapeur [5, p. 136].



Figure 70 : Image du profil vu de côté. Incidence =  $10^\circ$  et  $\sigma = 2.8$ . Poche de cavitation partielle

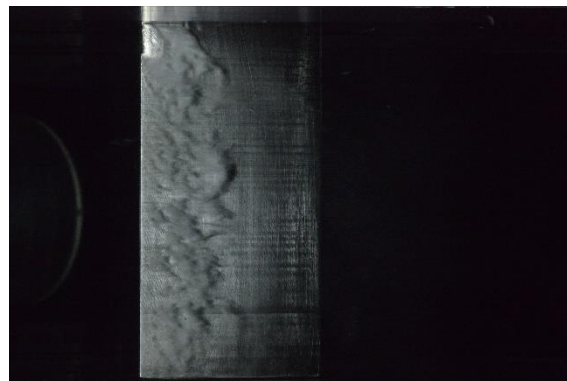


Figure 71 : Image du profil vu de dessus. Incidence =  $10^\circ$  et  $\sigma = 2.8$ . Poche de cavitation partielle

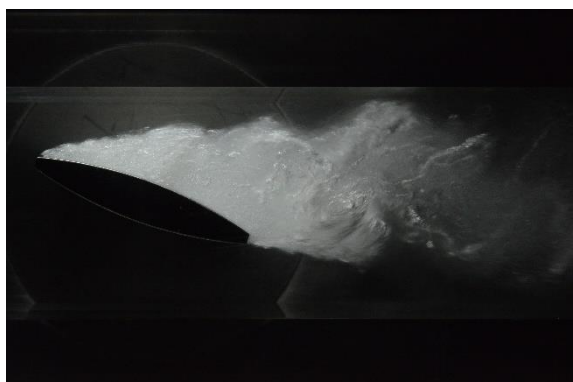


Figure 72 : Image du profil vu de côté. Incidence =  $20^\circ$  et  $\sigma = 3.3$ . Poche diphasique

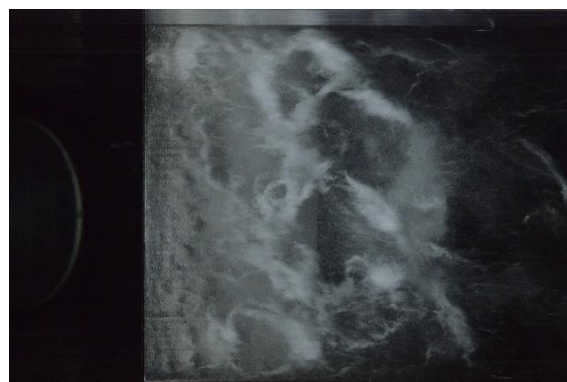


Figure 73 : Image du profil vu de dessus. Incidence =  $20^\circ$  et  $\sigma = 3.3$ . Poche diphasique

Lorsque le point de fermeture de la poche ne se trouve plus sur le profil mais au sein même du fluide, on parle alors de supercavitation [Figure 74 et Figure 75] qui est en général une zone où le sigma est faible [5, p. 136].

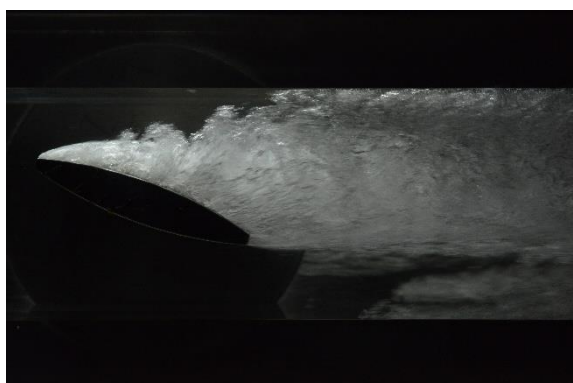


Figure 74 : Image du profil vu de côté. Incidence =  $20^\circ$  et  $\sigma = 2.4$ . Supercavitation



Figure 75 : Image du profil vu de dessus. Incidence =  $20^\circ$  et  $\sigma = 2.4$ . Supercavitation

La zone de cavitation de cisaillement [Figure 76 et Figure 77] est caractérisée par une grande incidence. En effet lorsque l'incidence est élevée, il se produit un décollement de l'écoulement.

La cavitation n'est donc plus attachée au profil mais est localisée dans la couche de cisaillement libre issues du bord d'attaque [5, p. 136].

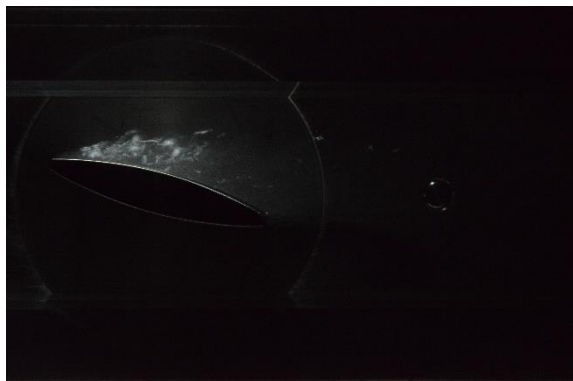


Figure 76 : Image du profil vu de côté. Incidence = 15° et  $\sigma = 4.2$ . Cavitation de cisaillement

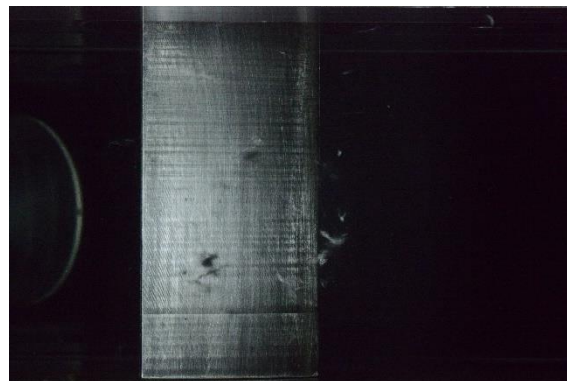


Figure 77 : Image du profil vu de dessus. Incidence = 15° et  $\sigma = 4.2$ . Cavitation de cisaillement

On constatera que la cavitation de type bulle n'apparaît pas sur la carte de cavitation. En effet, lors des mesures, aucune bulle n'a pu être constatée dans la veine de test. Les conditions au sein du banc de test ainsi que les paramètres utilisés ne permettent pas de faire apparaître de la cavitation bulle.

## 5.4 $\sigma$ fixe et incidence $\alpha$ variable

### 5.4.1 Description

Lors de cette expérience, il est prévu de fixer  $\sigma$  à une certaine valeur et ensuite de faire varier l'incidence  $\alpha$ . La définition des valeurs de sigma se fait à l'aide de la carte de cavitation [Figure 78] présentée au chapitre 5.3. Une prise de mesure est faite de sorte que le profil ne cavite pas pour chaque incidence (sigma de 6.7, ligne jaune). Ensuite, il est question de répéter le processus de mesure, mais cette fois en passant par des régimes cavitant (sigma de 4, ligne violette et sigma de 2.4, ligne rouge). Le but étant de comparer les données avec et sans cavitation pour déterminer son influence sur le profil. Le protocole de mesure se trouve en annexe 10.3.6.

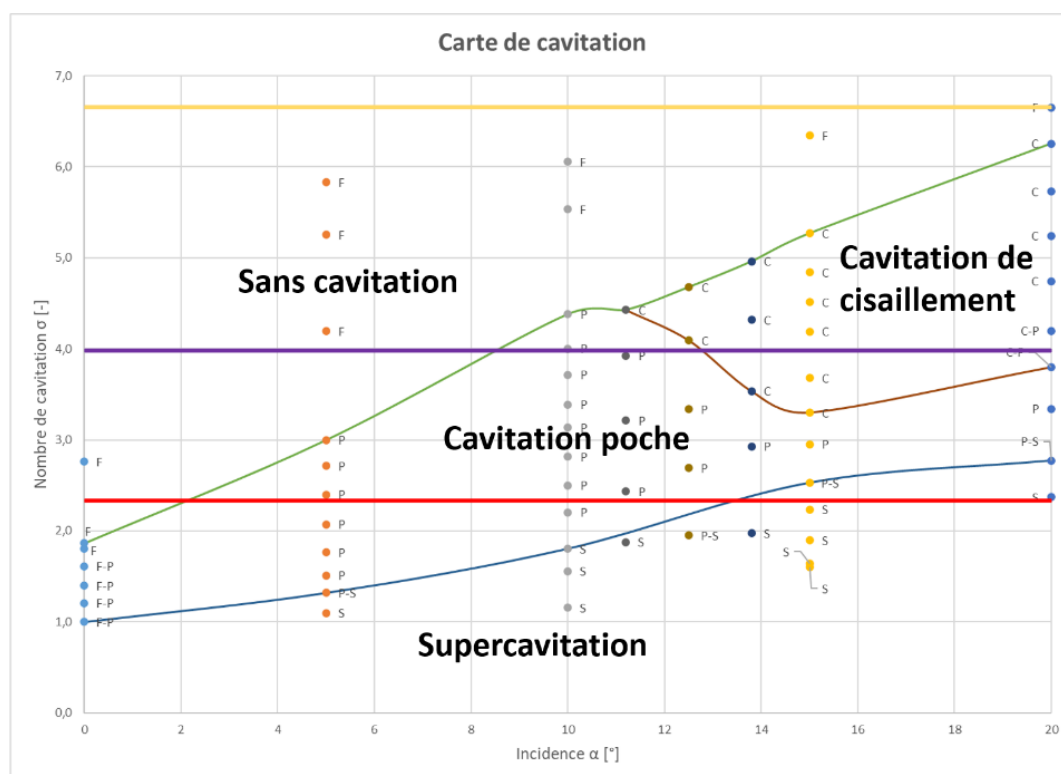


Figure 78 : Définition des valeurs de sigma selon la carte de cavitation

#### 5.4.2 Coefficient de portance, de traînée et de moment

De manière générale, le coefficient de portance augmente lorsque l'on augmente l'incidence. Les courbes ayant un sigma de 6.7 et de 4 ont une tendance quasiment linéaire alors que la courbe de sigma 2.4 ne l'est pas [Figure 79].

Les courbes pour un sigma de 6.7 et de 4 suivent la même trajectoire jusqu'à un angle de 17.5°. Ensuite, la courbe de sigma 4 à l'air d'augmenter son coefficient de portance plus rapidement que pour la courbe de sigma 6.7. Pour vérifier cela, il faudrait continuer d'augmenter l'incidence.

Les valeurs de coefficient de portance sont pareilles jusqu'à une incidence de 5°. Ensuite, la courbe de sigma 2.4 prend un effet positif par rapport aux deux autres courbes au niveau du coefficient jusqu'à un angle de 12.5°. Lors de cette augmentation, le régime de cavitation est de type poche. La courbe cesse d'augmenter et stagne à une valeur de 1.25 jusqu'à un angle de 17.5° tandis que les courbes ayant un sigma de 6.7 et de 4 suivent la même trajectoire. On remarque que pour cette plage d'incidence (12.5° à 17.5°) le régime est supercavitant. La courbe ayant un sigma de 4 reprend ensuite une tendance d'augmentation du coefficient  $C_l$ .

Quand l'écart-type reste faible, cela suggère que la cavitation est faible ou tout simplement inexistante. En revanche, lorsque l'écart-type augmente, il indique en général une forte intensité de cavitation. Ce que l'on constate, c'est que lorsque l'écart-type augmente pour la courbe de sigma 4, le coefficient de portance reste stable (entre 10°-17,5°), et lorsque l'écart-type se réduit, le coefficient augmente à nouveau.

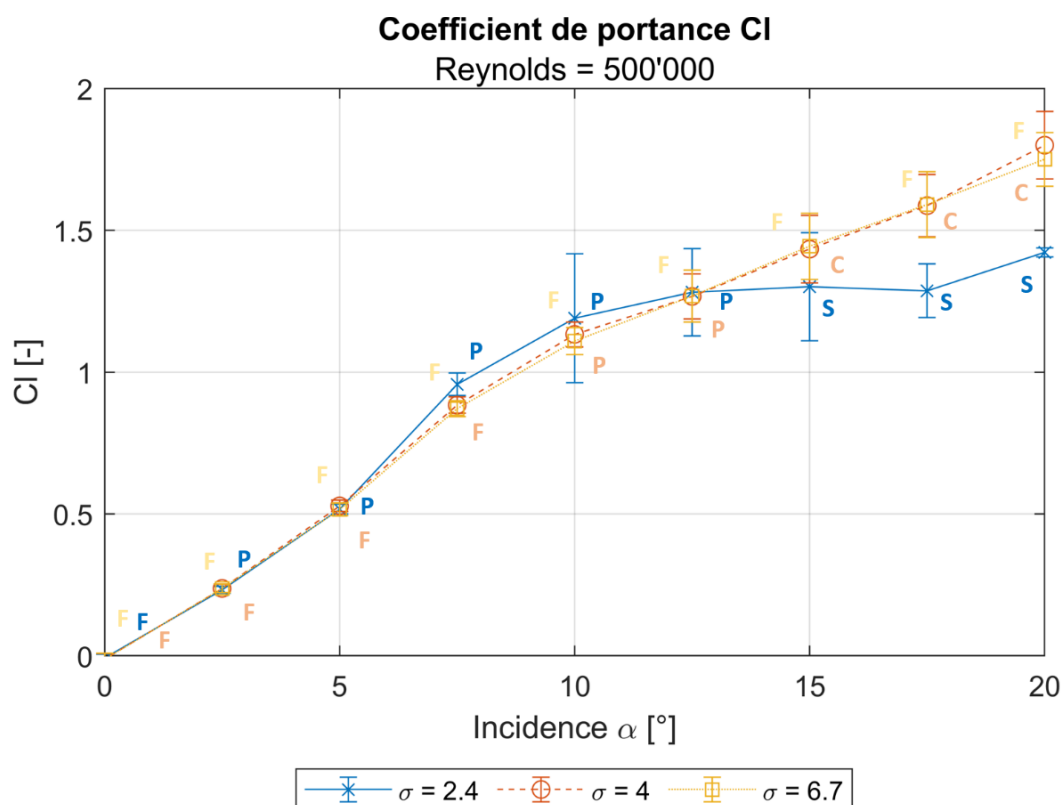


Figure 79 : Graphique du coefficient de portance  $C_l$  en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000

De manière générale, le coefficient de traînée augmente lorsque l'on augmente l'incidence. Les trois courbes ont une tendance de croissance non-linéaire [Figure 80].

Tout comme le coefficient de portance, les trajectoires des courbes pour un  $\sigma$  de 6.7 et de 4 sont similaires. En ce qui concerne la courbe de  $\sigma$  4, son coefficient de traînée reste identique à celui des deux autres courbes jusqu'à un angle de  $7.5^\circ$ . Au-delà de cet angle, le coefficient de traînée devient légèrement supérieur à celui des courbes de  $\sigma$  6.7 et 4, et ce, jusqu'à une incidence de  $17^\circ$ . L'intensité de cavitation est aussi plus grande dans cette plage d'incidence, ce qui pourrait expliquer cette légère augmentation du coefficient par rapport aux deux autres courbes. Au-delà de  $17^\circ$ , l'écart-type commence à diminuer et le coefficient devient inférieur à celui des deux autres courbes. Le coefficient de traînée ne subit pas l'effet de stagnation comme celui de portance lorsque le régime devient supercavitant. Cependant, tout comme le coefficient  $C_l$ , la cavitation poche à tendance à augmenter légèrement la traînée du profil.

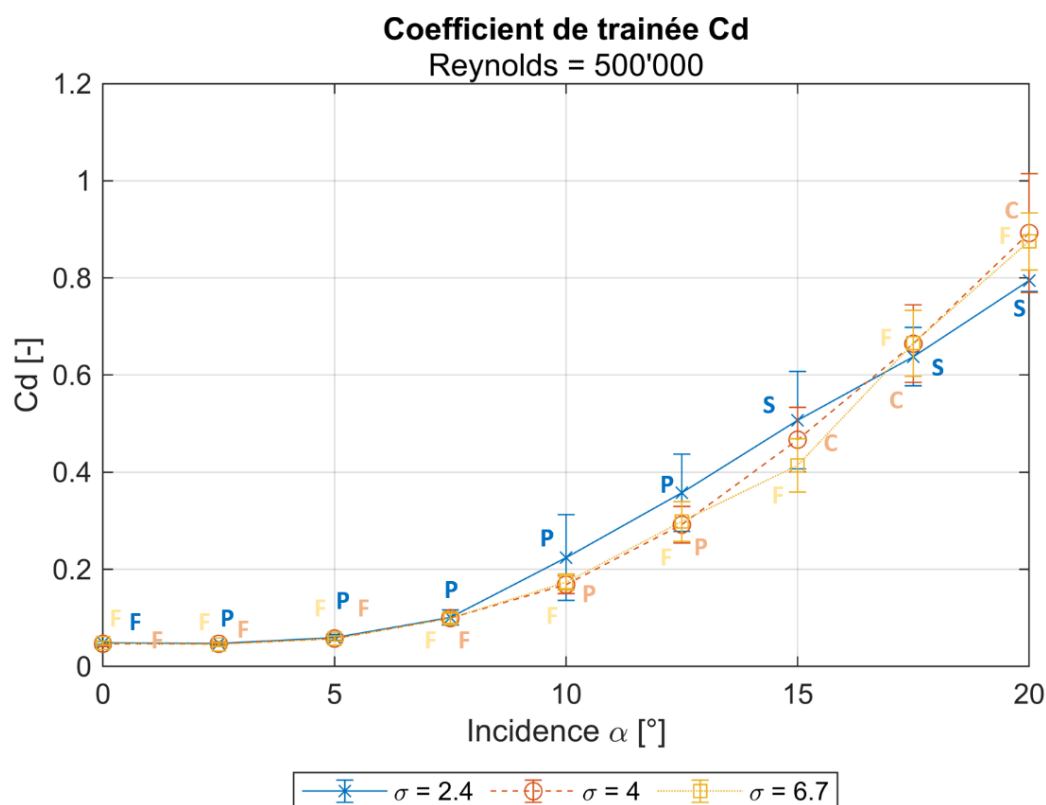


Figure 80 : Graphique du coefficient de trainée  $C_d$  en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000

Pour le graphique du coefficient du moment  $CM_z$ , les 3 courbes respectent le même schéma de trajectoire [Figure 81]. Une augmentation du coefficient linéaire jusqu'à un maximum est constatée. Ensuite les valeurs de coefficient restent stables.

Sans surprise, les courbes pour un sigma de 6.7 et de 4 suivent la même trajectoire comme pour la portance et la traînée malgré leurs différences en termes de type de cavitation.

La courbe de sigma 4 stagne plus rapidement à une valeur plus faible de  $CM_z$ . En effet, lorsque l'écart-type augmente, ce qui traduit une augmentation de l'intensité de cavitation, le coefficient de moment n'augmente plus et reste stable. On remarque que cette stagnation se fait lorsque la cavitation est de type poche. Ensuite, l'écart-type diminue et la supercavitation apparaît ce qui a pour conséquence d'augmenter le coefficient du moment jusqu'aux mêmes valeurs que pour les courbes d'un sigma de 6.7 et de 4.

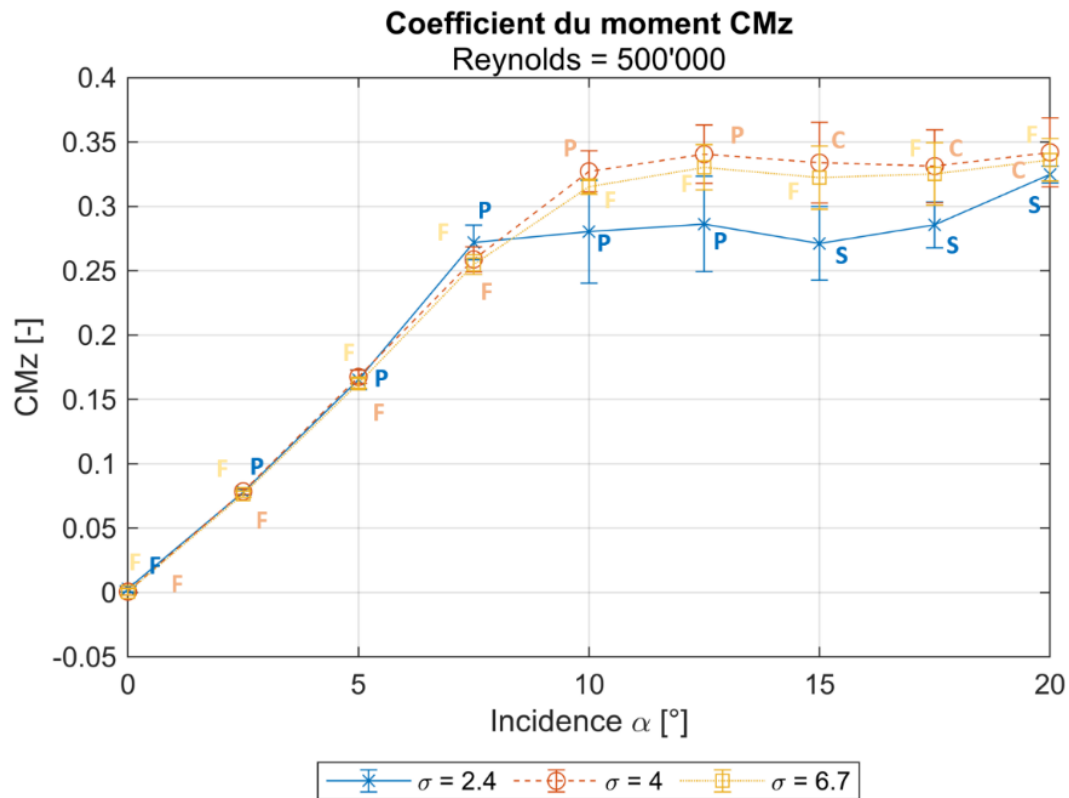


Figure 81 : Graphique du coefficient du moment CMz en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000

La cavitation aurait donc tendance à diminuer l'effet de portance et l'effet du moment alors qu'elle aurait tendance à augmenter légèrement l'effet de traînée. Plus précisément, la cavitation de type poche aurait un effet positif sur la portance et la traînée et un effet négatif sur le moment. Ensuite, pour ce qui est du régime supercavitant, il aurait tendance à freiner l'augmentation des coefficients de portance et de moment sans influencer significativement le coefficient de traînée.

### Accélération Ax, Ay, Az

Les Figure 82, Figure 83 et Figure 84 correspondent à la vibration dans les axes X, Y et Z du profil.

Pour les 3 graphiques, les courbes respectent les mêmes tendances. Pour un sigma de 6.7, la courbe subit très peu de variation et reste faible. Ce qui paraît assez normal car il n'y a pas de cavitation. Pour un sigma de 4, la courbe suit celle d'un sigma de 6.7 jusqu'à une certaine incidence, ensuite, les valeurs de son écart-type augmentent de manière non-linéaire. Et pour finir, la courbe pour un sigma de 4 suit au début les mêmes points que les deux autres courbes, pour ensuite augmenter jusqu'à un maximum avant de diminuer à nouveau. Le maximum se situe toujours entre 15° et 17.5°.

Pour une incidence allant de 0° à 5°, les courbes d'un sigma de 4 et de 2.4 suivent le même schéma que pour la courbe de sigma 6.7. En effet, la cavitation dans cette plage d'incidence est soit inexistante soit très faible.

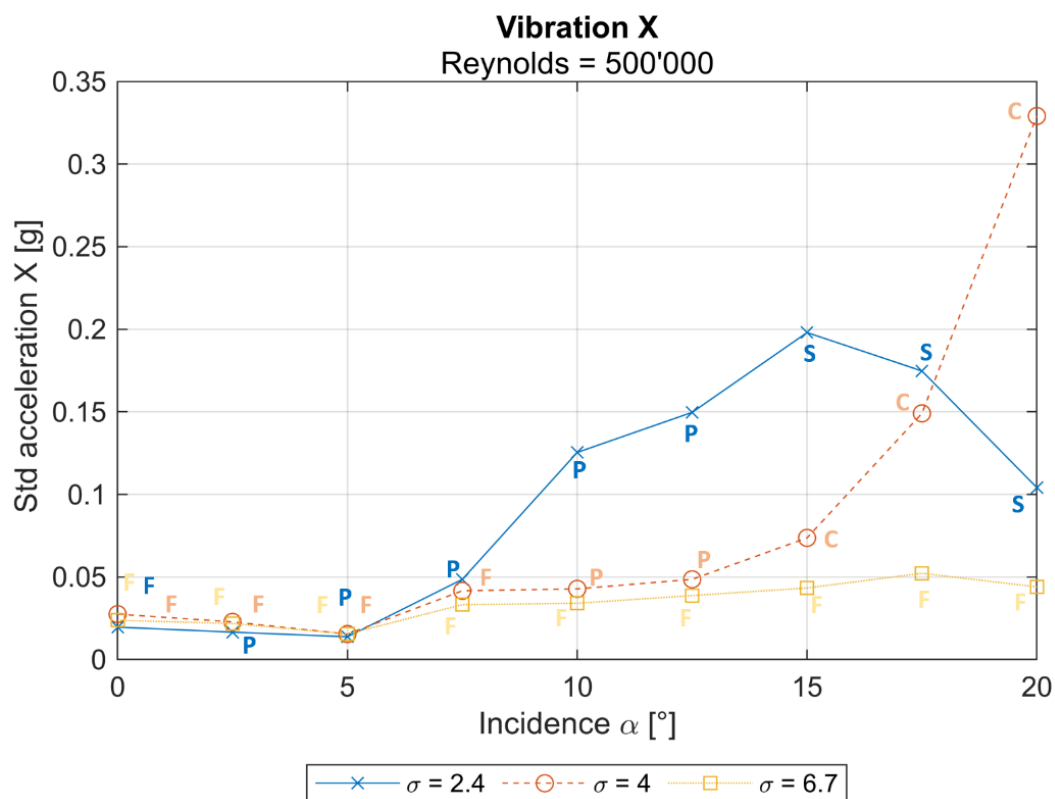


Figure 82 : Graphique des vibrations dans l'axe X en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000

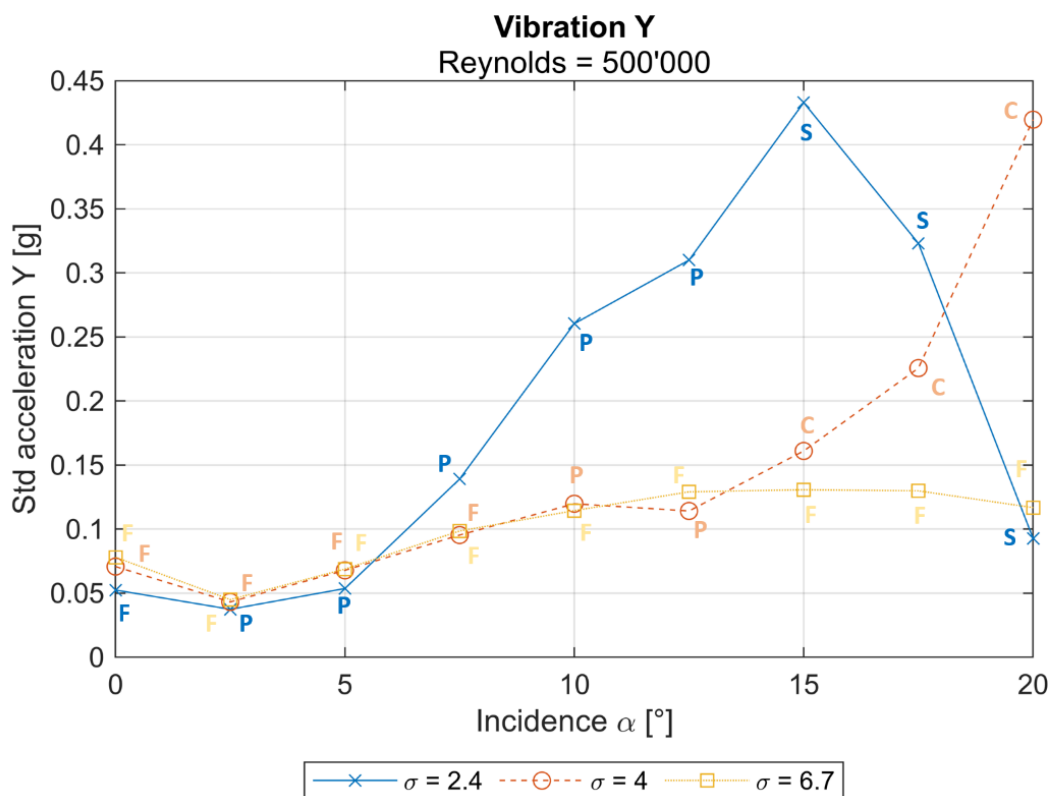


Figure 83 : Graphique des vibrations dans l'axe Y en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000

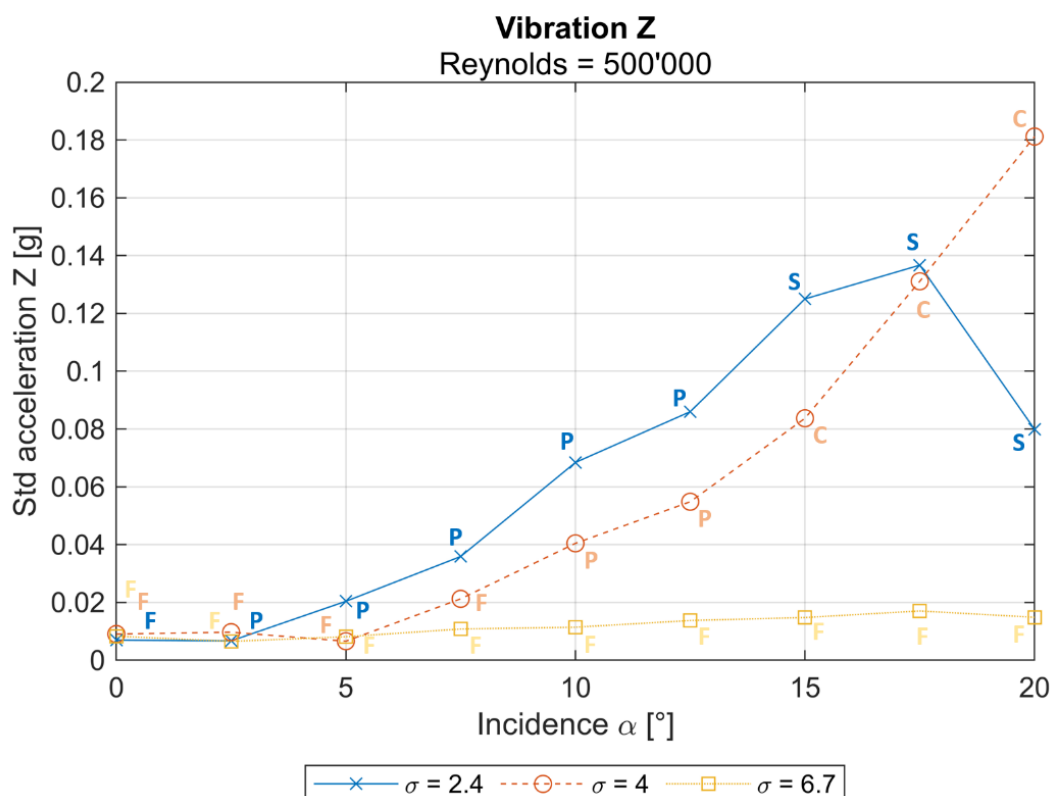


Figure 84 : Graphique des vibrations dans l'axe Z en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000

Les pics observés dans les trois courbes ayant un sigma de 2.4 correspondent à des phénomènes de supercavitation. Ce n'est qu'après ce type de cavitation que les vibrations diminuent. En effet lors de la supercavitation, les bruits de claquement dans la veine disparaissent et laissent place à un bruit beaucoup plus calme. On peut donc en déduire que la supercavitation a tendance à faire diminuer les vibrations du profil.

On constate aussi que la cavitation de cisaillement augmente considérablement les vibrations. En effet, sur les courbes ayant un sigma de 4, les vibrations ont tendance à augmenter lorsque de la cavitation de cisaillement est présente. On peut donc en déduire que la cavitation de cisaillement a tendance à faire augmenter les vibrations dans le profil.

### 5.4.3 Coefficient de débit $K_v$

La Figure 85 représente le coefficient de débit  $K_v$  en fonction de l'incidence. Comme pour les graphiques précédents, les courbes ayant un sigma de 4 et de 6.7 suivent la même trajectoire.

Pour un sigma de 2.4, la courbe suit presque la même trajectoire, à l'exception d'une légère réduction de  $K_v$  entre les angles d'incidence de 7.5° et 15°. C'est au sein de cette plage d'incidence que la cavitation atteint son niveau le plus élevé, engendrant ainsi une plus grande perte de charge au niveau de la lentille. Par la suite, le coefficient devient légèrement supérieur à celui des deux autres courbes, correspondant à une réduction de l'intensité de la cavitation. En conséquence, la perte de charge au niveau de la lentille diminue.

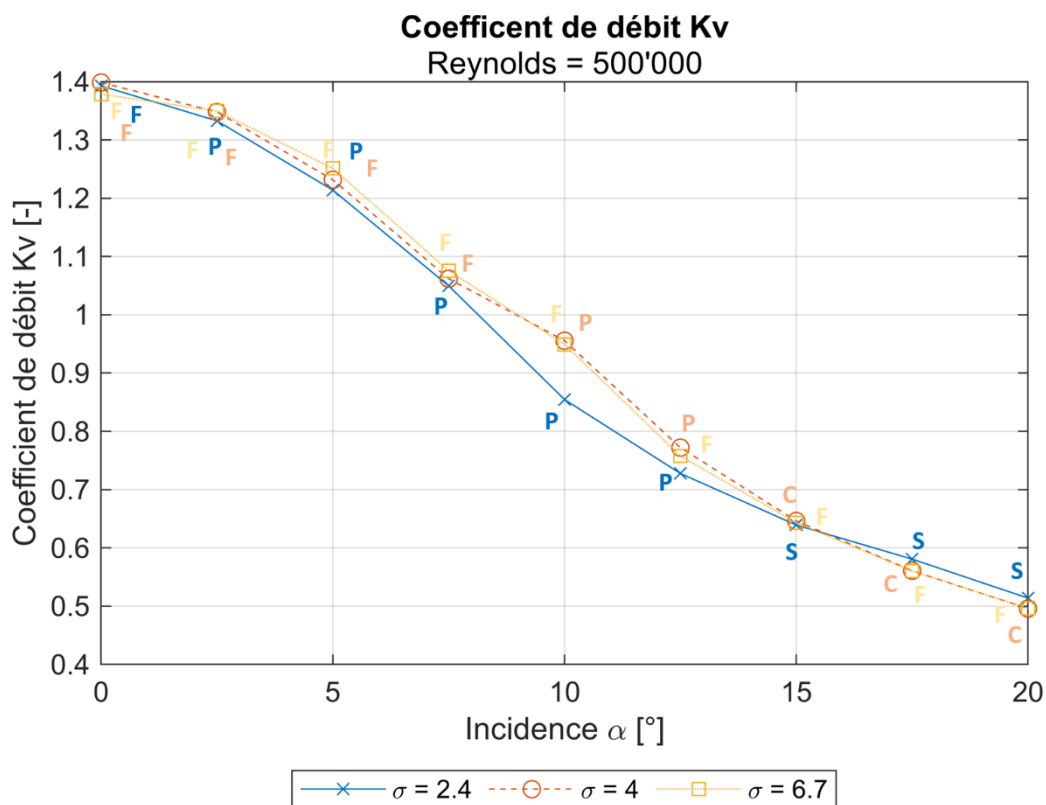


Figure 85 : Graphique du coefficient de débit Kv en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000

## 5.5 Incidence $\alpha$ fixe et $\sigma$ variable

### 5.5.1 Description

Lors de cette expérience, l'angle d'incidence alpha a été fixé en faisant varier sigma [Figure 86]. Les points de mesure sont les mêmes qui ont permis de tracer la carte de cavitation. Il est donc possible de savoir pour chaque point, le type de cavitation en présence. Le protocole de mesure se trouve en annexe 10.3.7.

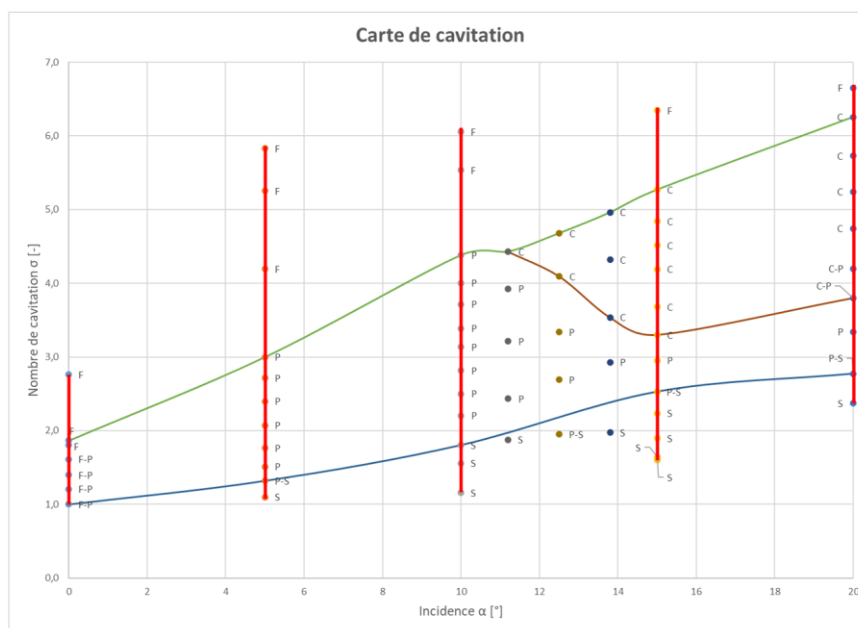


Figure 86 : Illustration des points de mesure sur la carte de cavitation

### 5.5.2 Coefficient de portance, de traînée et de moment

Voici le graphique correspondant au coefficient de portance en fonction de  $\sigma$  [Figure 87].

Pour l'incidence de  $0^\circ$ , la courbe est constante. Le changement de sigma n'influence pas le coefficient de portance car la cavitation n'est pas présente.

Pour la courbe représentant l'incidence de  $5^\circ$ , on constate que le coefficient  $C_l$  reste constant jusqu'à un sigma de 3. Au-delà de ce point, avec l'amorce de la cavitation, la portance augmente légèrement, atteignant un maximum. Par la suite, le phénomène de supercavitation prend place, marquant le point où la portance commence à diminuer.

En observant la courbe correspondant à l'angle d'incidence de  $10^\circ$ , on remarque que sa tendance est la même que pour l'angle de  $5^\circ$ . En effet, au début de la courbe, le coefficient  $C_l$  est constant. Ensuite, il y a une augmentation de portance jusqu'à un certain maximum. Pour finir, on constate une forte augmentation de l'écart-type, ce qui implique une forte intensité de cavitation, qui engendre une chute importante de la portance. Le maximum de portance se situe avant celui de la courbe des  $5^\circ$  (sigma 2.5 contre sigma 1.4).

En analysant la courbe qui représente l'angle d'incidence de 15 degrés, il est observé que la tendance suit celle des deux précédentes courbes, mais avec un maximum beaucoup moins prononcé. La forte diminution de portance est quant à elle toujours autant visible.

Lorsqu'on observe la courbe associée à l'angle d'incidence de 20 degrés, on remarque que la portance n'augmente quasiment pas contrairement aux autres courbes. Cependant, la baisse de portance est aussi présente et commence à partir d'un sigma de 3.8.

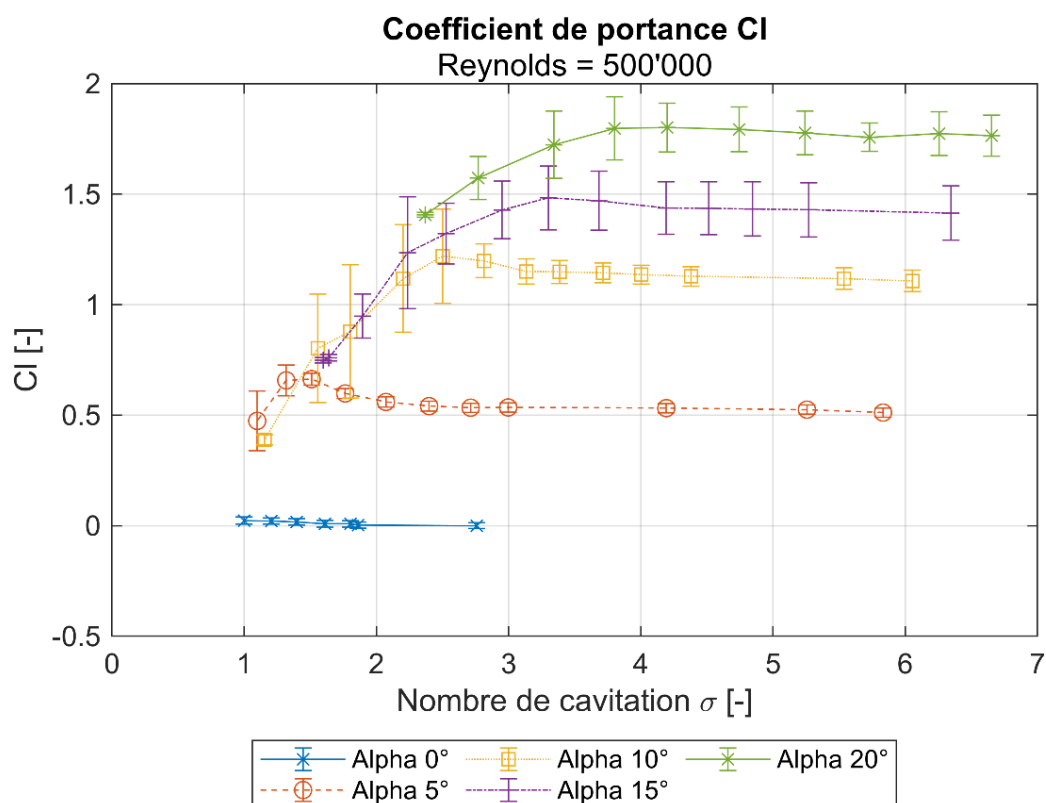


Figure 87 : Graphique du coefficient de portance  $C_l$  en fonction de  $\sigma$  pour un Reynolds de 500'000

Le graphique ci-dessous [Figure 88] correspond au coefficient de traînée en fonction de  $\sigma$ .

Comme pour le graphique de la portance, la courbe représentant l'incidence de  $0^\circ$  n'est pas affectée par la variation de sigma.

Pour l'incidence de  $5^\circ$ , la courbe est constante jusqu'à un sigma de 1.8. Ensuite, la portance se met à augmenter lors de l'apparition de la supercavitation.

Pour la courbe représentant l'incidence de  $10^\circ$ , on constate que le coefficient  $C_d$  reste constant jusqu'à un sigma de 3.4. Au-delà de ce point, l'intensité de la cavitation augmente et la traînée augmente légèrement, atteignant un maximum. Par la suite, la courbe semble prendre une tendance négative lorsque le niveau de cavitation baisse.

En observant la courbe correspondant à l'angle d'incidence de  $15^\circ$ , on remarque que sa tendance est la même que pour l'angle de  $10^\circ$ . En effet, au début de la courbe, le coefficient  $C_d$  est constant. Dans cette zone, la cavitation est de type cisaillement. Ensuite, il y a une augmentation de traînée jusqu'à un certain maximum (sigma 2.2). Pour finir, une chute de la portance qui pourrait être assignée à de la supercavitation.

Concernant la courbe illustrant un angle d'incidence de 20 degrés, il n'y a pas de maximum visible. Cette tendance correspond à la courbe de  $C_l$  pour  $20^\circ$ . La portance demeure stable jusqu'à atteindre un sigma de 3.8. Dans cette plage, la cavitation adopte une nature de cisaillement. Par la suite, la portance diminue.

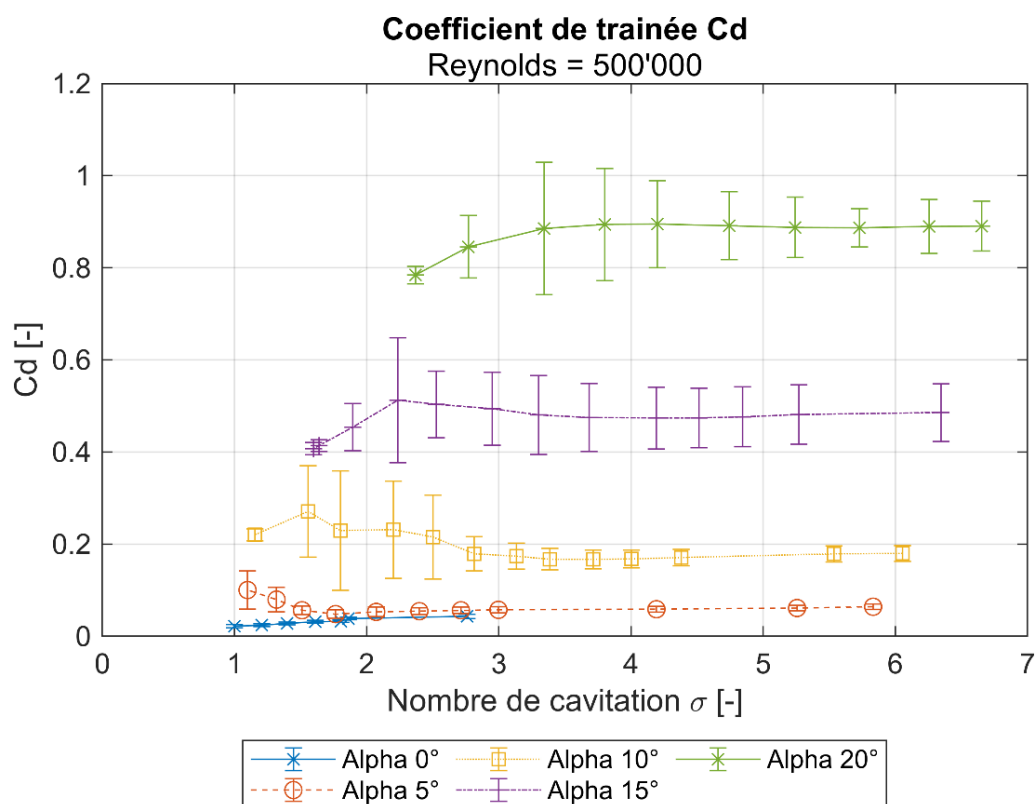


Figure 88 : Graphique du coefficient de trainée  $C_d$  en fonction de  $\sigma$  pour un Reynolds de 500'000

Le graphique ci-dessous [Figure 89] correspond au coefficient de moment en fonction de  $\sigma$ .

La courbe des  $0^\circ$  n'est quasiment pas influencée par la diminution de sigma. En effet, il y a une légère augmentation du coefficient  $CM_z$ .

Pour la courbe représentant l'incidence de  $5^\circ$ , la tendance est pareil que pour le coefficient de portance. En effet, on constate que le coefficient  $CM_z$  reste constant jusqu'à un sigma de 3. Au-delà de ce point, avec l'amorce de la cavitation, la portance augmente légèrement,

atteignant un maximum. Par la suite, le phénomène de supercavitation prend place, marquant le point où la portance commence à diminuer.

Les courbes allant de  $10^\circ$  à  $20^\circ$  sont localisées dans les mêmes plages de coefficient de moment contrairement aux graphiques de portance et de traînée.

Concernant la courbe illustrant un angle d'incidence de  $10^\circ$ , on constate une augmentation légère du coefficient de  $CM_z$  jusqu'à un  $\sigma$  de 2.8. Par la suite, l'intensité de la cavitation augmente ce qui a pour conséquence de faire diminuer le moment  $M_z$ . C'est la courbe qui présente la plus grande chute de coefficient  $CM_z$ . Lorsque la cavitation réduit en intensité ( $\sigma$  1.2), la courbe laisse apparaître une pente de diminution de  $CM_z$  plus faible.

La courbe des  $15^\circ$  présente le même début que celle de  $10^\circ$ , mais le point maximum de moment se trouve légèrement avant ( $\sigma$  3.2). Comme pour la courbe des  $10^\circ$  d'incidence, lorsque la cavitation baisse en intensité, la pente de diminution de  $CM_z$  devient plus faible.

La courbe concernant l'incidence de  $20^\circ$  à une tendance plus particulière. Une légère augmentation du  $CM_z$  est visible jusqu'à un  $\sigma$  de 3.8. Ensuite, le coefficient du moment forme comme une parabole. En effet, il diminue légèrement pour ensuite augmenter à nouveau.

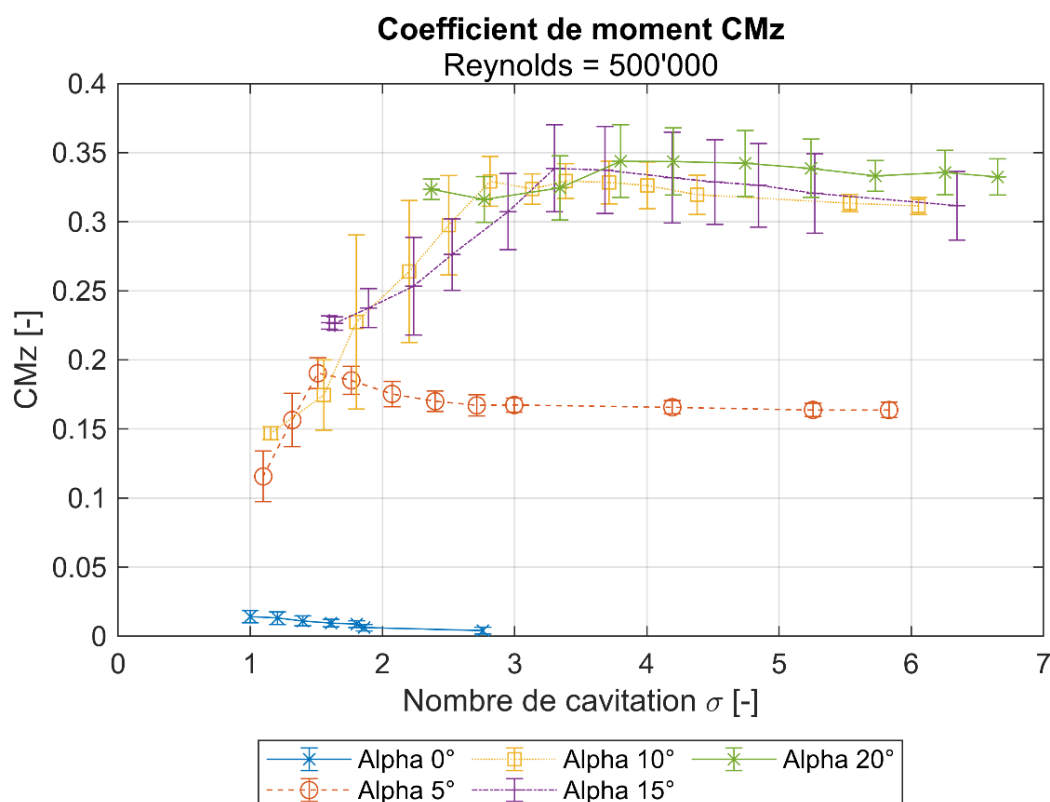


Figure 89 : Graphique du coefficient du moment  $CM_z$  en fonction de  $\sigma$  pour un Reynolds de 500'000

Ce qu'il est possible de dire grâce à ces graphiques, c'est que la cavitation augmente légèrement la portance et la traînée jusqu'à un certain point et qu'ensuite, elle les diminue de façon plus prononcée. La diminution se fait lorsque la cavitation est de type poche ou supercavitation. Il est aussi remarquable que lorsque le profil est soumis à de la cavitation de cisaillement, la portance et la traînée n'augmente pas et n'atteint pas un maximum.

La diminution de  $CM_z$  se fait lorsque la cavitation est de type poche ou supercavitation. On remarque aussi que lorsqu'une supercavitation est bien établie (caractérisée par une faible vibration et un faible bruit), le coefficient de moment tend à diminuer sa pente de décroissance.

### 5.5.3 Coefficient de débit $K_v$

La Figure 90 représente le coefficient de débit  $K_v$  en fonction de  $\sigma$ .

Les courbes représentant une incidence de  $15^\circ$  et  $20^\circ$  présente la même tendance. En effet, le coefficient  $K_v$  reste constant jusqu'à un certain point avant d'augmenter légèrement. Ensuite, lors de l'apparition de la supercavitation, ce coefficient diminue brusquement.

Les courbes concernant l'incidence de  $5^\circ$  et  $10^\circ$  ont aussi une tendance similaire. Les deux courbes présentent un début constant. Ensuite, le coefficient diminue jusqu'à atteindre un minimum. Le coefficient de la courbe représentant un angle de  $10^\circ$ , après avoir dépassé son minimum ( $\sigma = 1.5$ ), augmente à nouveau.

La courbe bleue (incidence de  $0^\circ$ ), présente un comportement constant sur le début de la courbe pour ensuite perdre en coefficient  $K_v$  à partir de  $\sigma = 1.4$ .

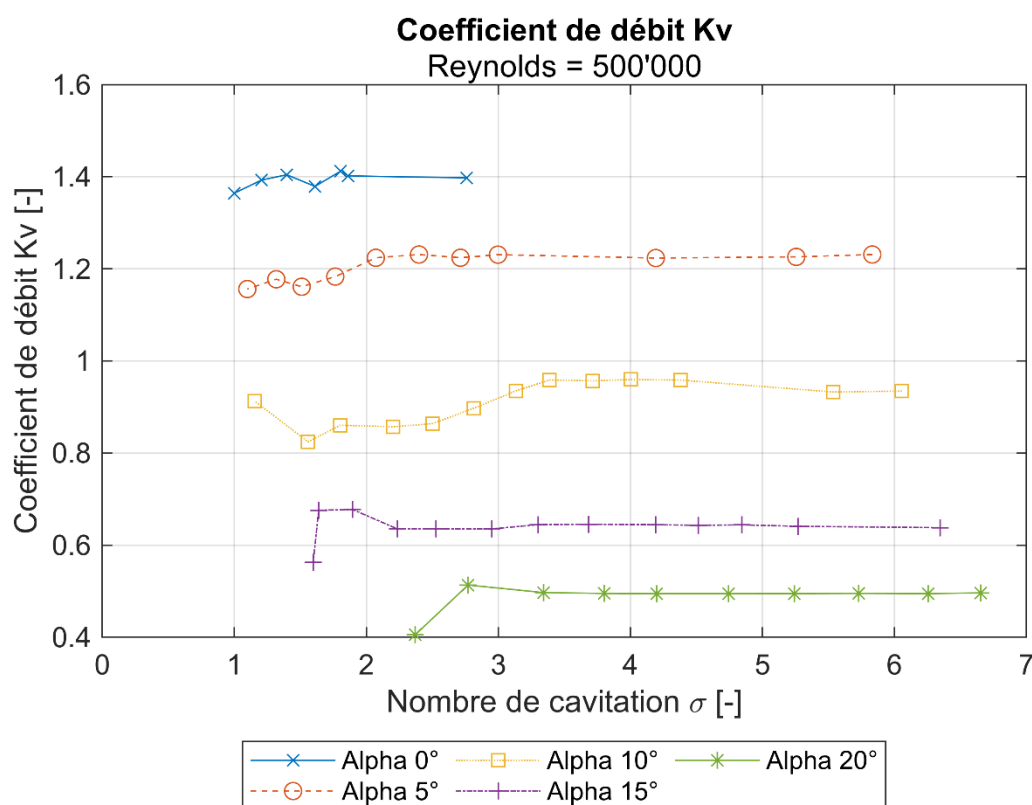


Figure 90 : Graphique du coefficient de débit  $K_v$  en fonction de  $\sigma$  pour un Reynolds de 500'000

## 5.6 Fermeture et ouverture

### 5.6.1 Description

Lors de cette expérience, il est prévu de réguler le banc en fonction de la hauteur de chute. Ensuite, l'incidence de la lentille est modifiée afin de représenter une ouverture et une fermeture complète de la vanne. Il est prévu de tester deux hauteurs de chutes différentes ( $H = 2$  bars et 1 bar) ainsi que plusieurs niveaux de pression dans le réservoir en aval ( $H_s = 2$

bars, 0 bar et -0.4 bar). Le but de cette expérience est de mesurer les efforts vus par la lentille lors de la fermeture et l'ouverture complète de la vanne. Le protocole de mesure se trouve en annexe 10.3.8.

Les graphiques présentent l'ouverture et la fermeture de la vanne. Afin de différencier les deux cas, l'ouverture est représentée par un trait plein tandis que la fermeture est représentée par un traitillé.

### 5.6.2 Coefficient de portance, de traînée et de moment

Le graphique ci-dessous [Figure 91] correspond au coefficient de portance  $C_l$  en fonction de l'incidence  $\alpha$ .

Tout d'abord, la tendance de chaque courbe est identique : lorsque l'incidence augmente, la portance augmente de manière non-linéaire. Ensuite, la courbe atteint un maximum à une incidence de  $80^\circ$ . Ce maximum correspond au point de décrochage. Le décrochage est un phénomène où se produit un décollement de l'écoulement au niveau de l'extrados du profil ce qui implique une chute de portance brusque.

Jusqu'à une incidence de  $40^\circ$ , toutes les courbes se superposent. Ce n'est qu'après cet angle que l'on constate une différence de portance entre les courbes. Si on compare les hauteurs de chute  $H$  pour un même niveau de pression  $H_s$ , on remarque que lorsque la hauteur de chute est plus grande, la portance sera aussi plus grande. Cela découle du fait que la vitesse de l'écoulement doit être plus grande afin de créer une hauteur de chute plus grande. Donc, le coefficient de portance augmente par la même occasion.

Ensuite, si l'on regarde pour un même niveau de hauteur de chute  $H$  mais que l'on compare le niveau de pression  $H_s$ , on remarque que lorsque  $H_s$  diminue, le niveau de portance de la courbe augmente. Quand  $H_s$  diminue, cela correspond à une diminution de  $\sigma$  et donc l'apparition et l'intensité de la cavitation sont favorisés.

On constate aussi qu'il y a très peu de différence entre l'ouverture et la fermeture de la vanne sur la portance. En effet, lors de la prise de mesure, il fallait attendre que le phénomène se stabilise avant d'enregistrer les valeurs.

Il est donc possible de dire que la cavitation a tendance à augmenter la portance d'un profil jusqu'à son décrochage. Ensuite, la portance diminue brusquement.

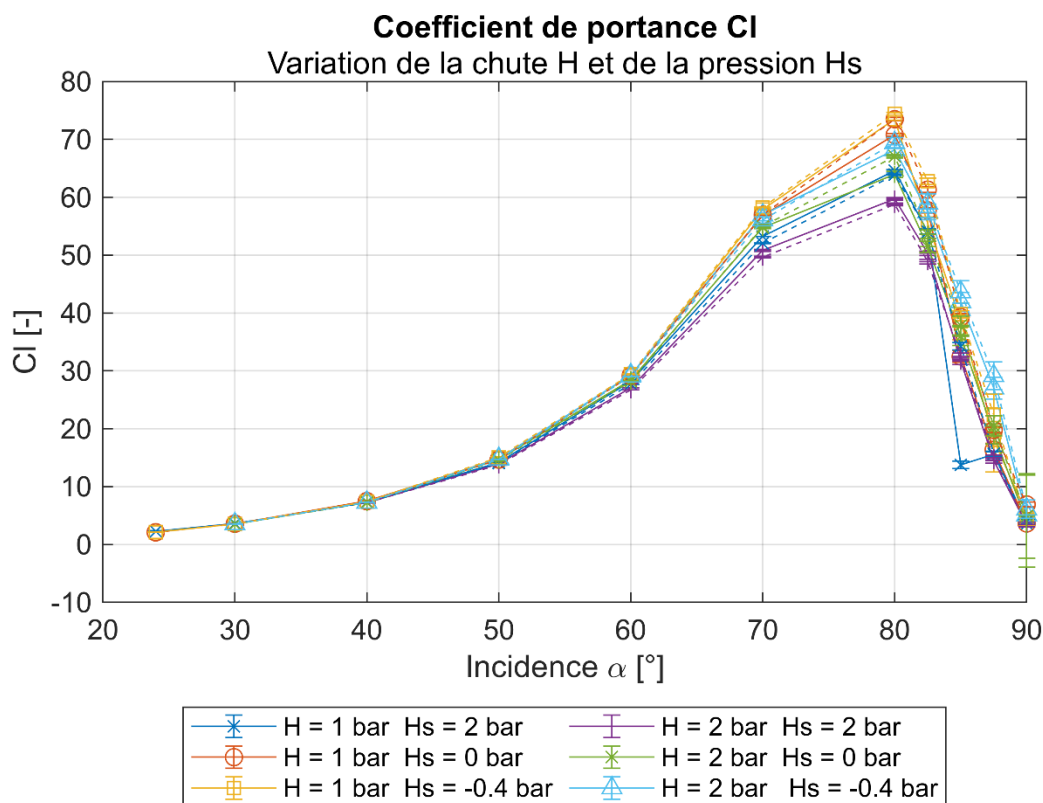


Figure 91 : Graphique du coefficient de portance en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$

Le graphique ci-dessous [Figure 92] correspond au coefficient de traînée  $C_d$  en fonction de l'incidence  $\alpha$ .

Tout d'abord, la tendance de chaque courbe est identique : lorsque l'incidence augmente, la traînée augmente de manière non-linéaire. Ensuite, la courbe atteint un maximum à une incidence différente pour chaque tracé. À partir de ce maximum, la traînée devient constante.

Jusqu'à une incidence de  $50^\circ$ , toutes les courbes se superposent. Ce n'est qu'après cet angle que l'on constate une différence de traînée entre les courbes. Si on compare les hauteurs de chute  $H$  pour un même niveau de pression  $H_s$ , on remarque que lorsque la hauteur de chute est plus grande, la traînée sera plus faible. Cela marche pour les niveaux de pression  $H_s$  de 0 et 2 bars et pour le niveau de pression  $H_s$  de -0.4 bar jusqu'à une incidence de  $85^\circ$ . En effet, lorsque que l'on compare pour les courbes jaune et cyan ( $H_s$  de -0.4 bar) avec une incidence supérieure à  $85^\circ$ , il se passe l'inverse. Plus la hauteur de chute  $H$  est grande, plus la traînée sera grande.

Ensuite, si l'on regarde pour un même niveau de hauteur de chute  $H$  mais que l'on compare le niveau de pression  $H_s$ , on remarque lorsque  $H_s$  diminue, le niveau de traînée des courbes augmentent. Quand  $H_s$  diminue, cela correspond à une diminution de  $\sigma$  et donc l'apparition et l'intensité de la cavitation sont favorisés.

On constate aussi qu'il y a très peu de différence entre l'ouverture et la fermeture de la vanne sur la traînée. En effet, lors de la prise de mesure, il fallait attendre que le phénomène se stabilise avant d'enregistrer les valeurs.

Il est donc possible de dire que la cavitation a tendance à augmenter le coefficient de traînée d'un profil jusqu'à un seuil où le coefficient n'augmente plus.

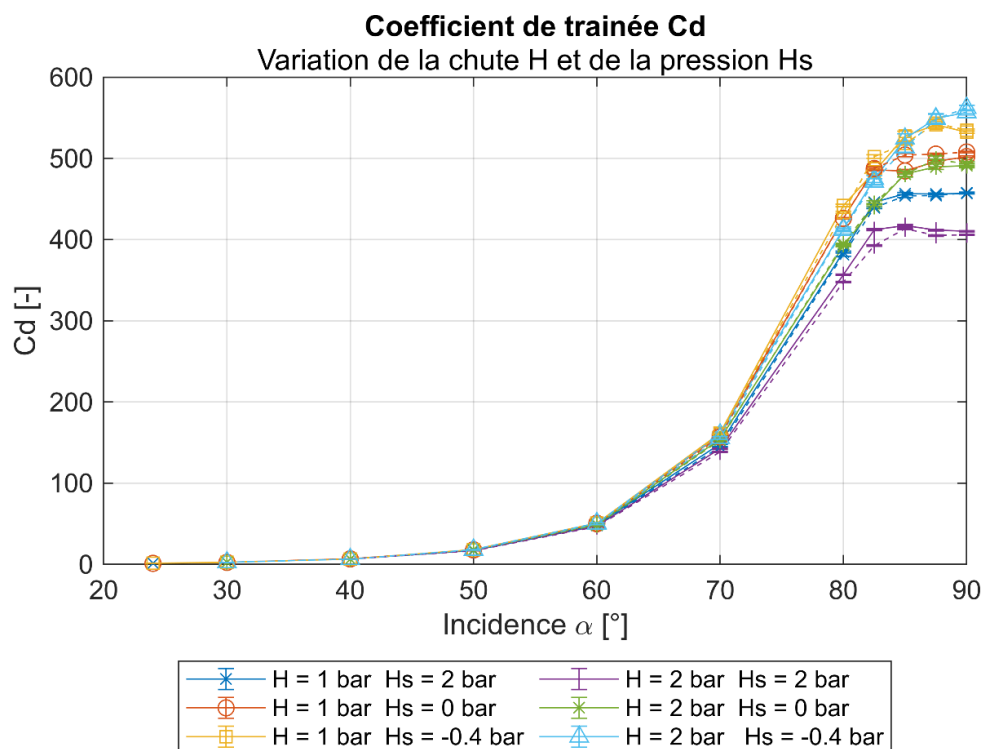


Figure 92 : Graphique du coefficient de trainée en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$

Le graphique ci-dessous [Figure 93] correspond au coefficient de moment  $CM_z$  en fonction de l'incidence  $\alpha$ . Un zoom a été fait à la Figure 94.

Tout d'abord, la tendance de chaque courbe est identique : lorsque l'incidence augmente, le moment  $M_z$  augmente de manière non-linéaire. Ensuite, la courbe atteint un maximum à une incidence qui se trouve entre 85° et 87.5°. À partir de ce maximum, le moment diminue légèrement. Les courbes pour une hauteur de chute  $H$  de 2 bars et un niveau de pression de 0 et -0.4 bar sont les seules courbes pour lesquelles le moment continue d'augmenter légèrement.

Jusqu'à une incidence de 60°, toutes les courbes se superposent. Ce n'est qu'après cet angle que l'on constate une différence de moment entre les courbes. Si on compare les hauteurs de chute  $H$  pour un même niveau de pression  $H_s$ , on remarque que lorsque la hauteur de chute est plus grande, le moment sera plus faible. Cependant, les courbes verte et cyan dépassent en termes de moment les valeurs des courbes orange et jaune qui ont une hauteur de chute  $H$  plus faible.

Ensuite, si l'on regarde pour un même niveau de hauteur de chute  $H$  mais que l'on compare le niveau de pression  $H_s$ , on remarque lorsque  $H_s$  diminue, le niveau de moment des courbes d'ouverture et de fermeture augmentent. Quand  $H_s$  diminue, cela correspond à une diminution de  $\sigma$  et donc l'apparition et l'intensité de la cavitation sont favorisés.

On constate cette fois-ci qu'une différence de moment est visible entre l'ouverture et la fermeture malgré l'attente pour que les points se stabilisent. Les valeurs de  $CM_z$  sont plus élevées lors de la fermeture que lors de l'ouverture de la lentille.

Il est donc possible de dire que l'impact d'une ouverture et d'une fermeture n'est pas égal sur le coefficient de moment et qu'il serait plus important lors d'une fermeture. D'après les écart-types visibles, lorsque la cavitation est intense, elle a tendance à faire diminuer le moment (incidence de 85° à 90°).

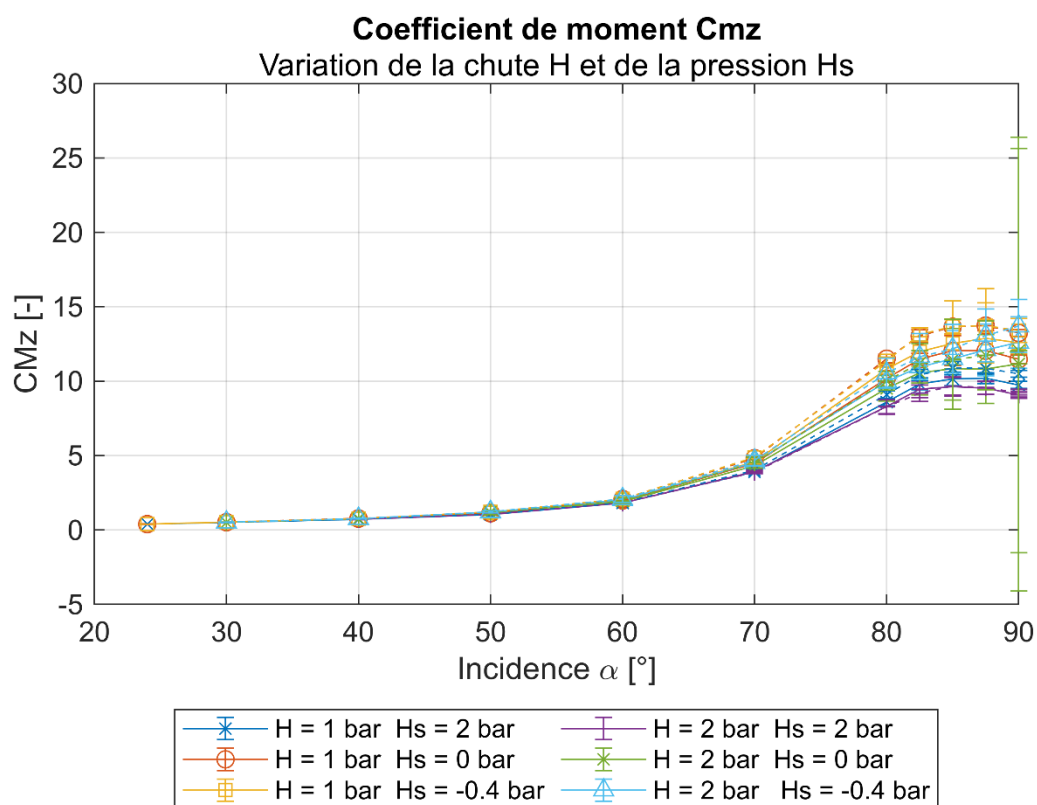


Figure 93 : Graphique du coefficient de moment en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$

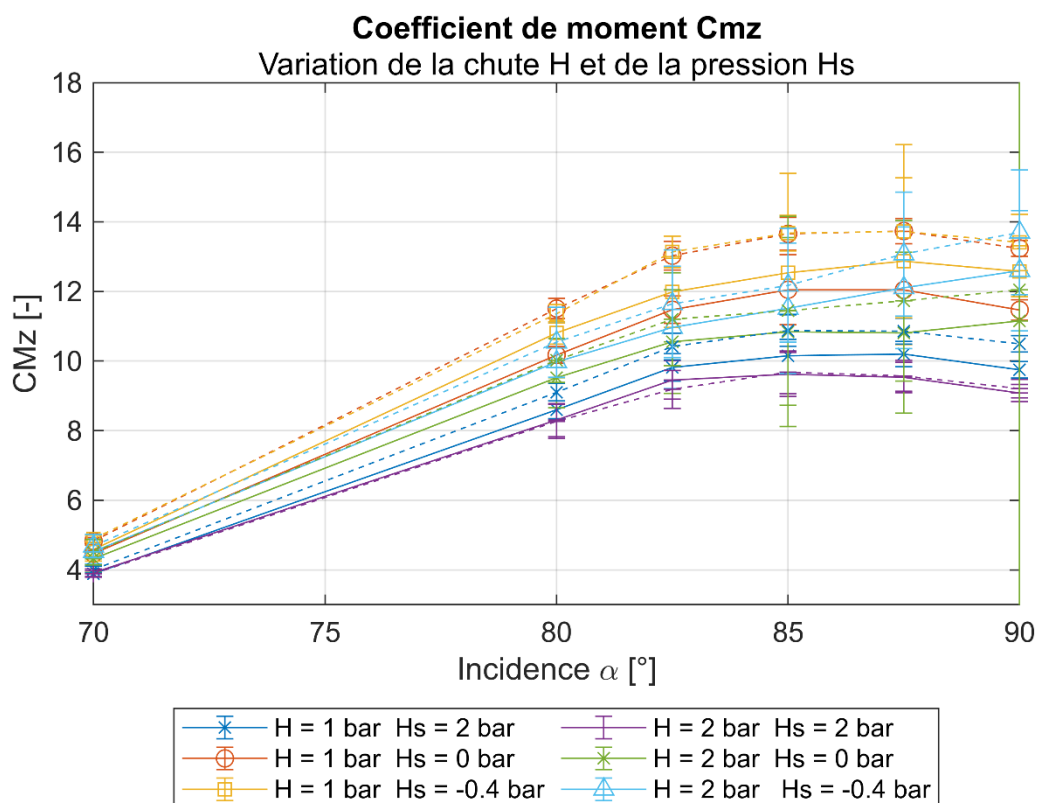


Figure 94 : Graphique du coefficient de moment en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$  avec un zoom entre l'incidence de 70° et 90°

### 5.6.3 Accélération $A_x$ , $A_y$ , $A_z$

Les Figure 95, Figure 96 et Figure 97 correspondent à la vibration dans les axes X, Y et Z du profil.

Pour les 3 graphiques, les courbes respectent les mêmes tendances. On constate que les courbes se rejoignent dans la plage d'incidence de 80° à 90°. En général, lorsque la cavitation n'est pas présente, les vibrations restent faibles et constantes. Dès que la cavitation apparaît, les écart-types d'accélération augmentent selon le type de cavitation et son intensité.

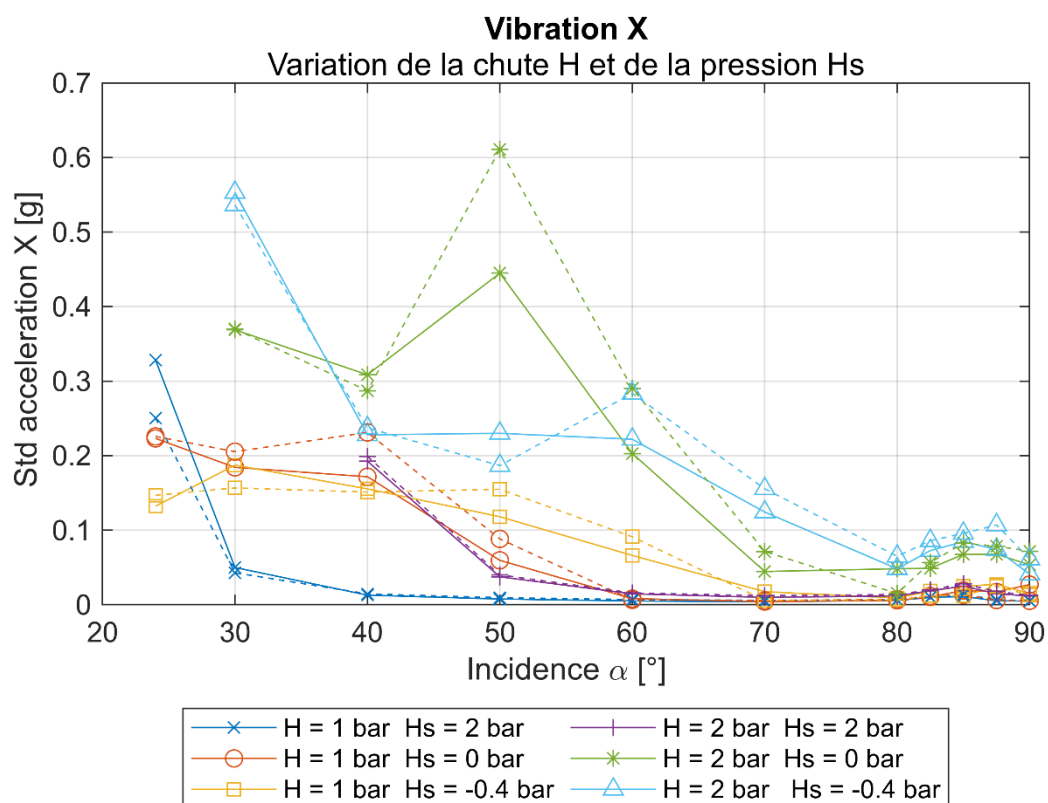


Figure 95 : Graphique des vibrations dans l'axe X en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute H et plusieurs niveaux de pression Hs

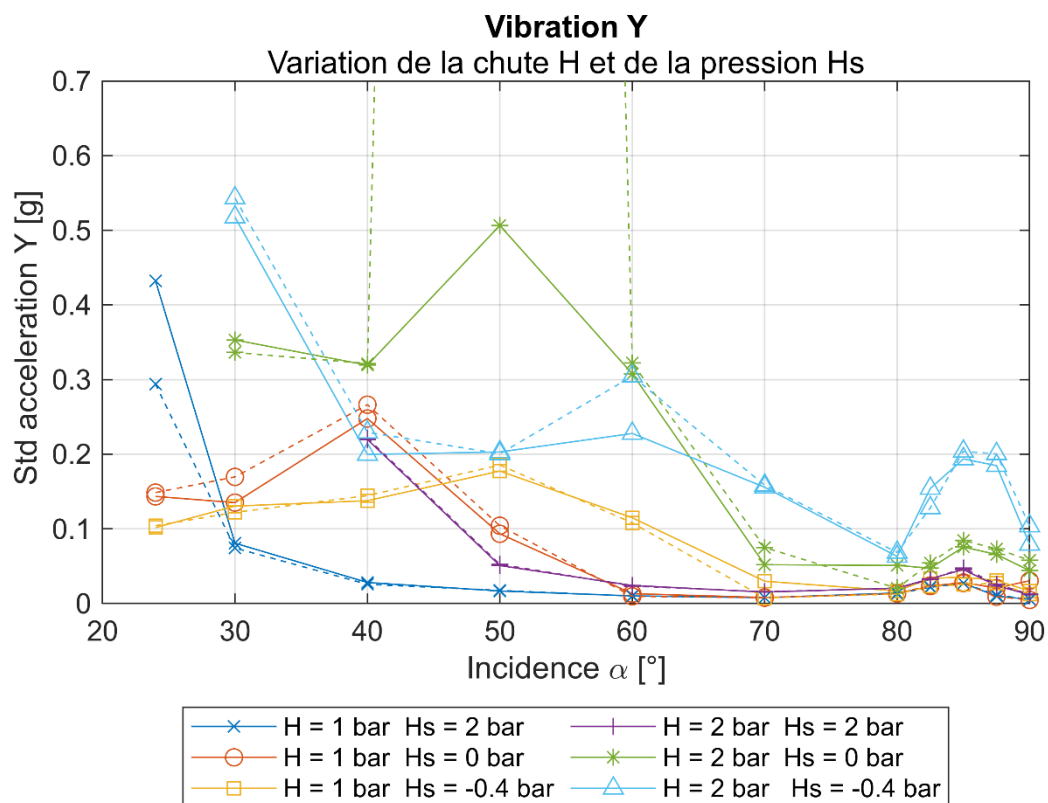


Figure 96 : Graphique des vibrations dans l'axe Y en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute H et plusieurs niveaux de pression Hs

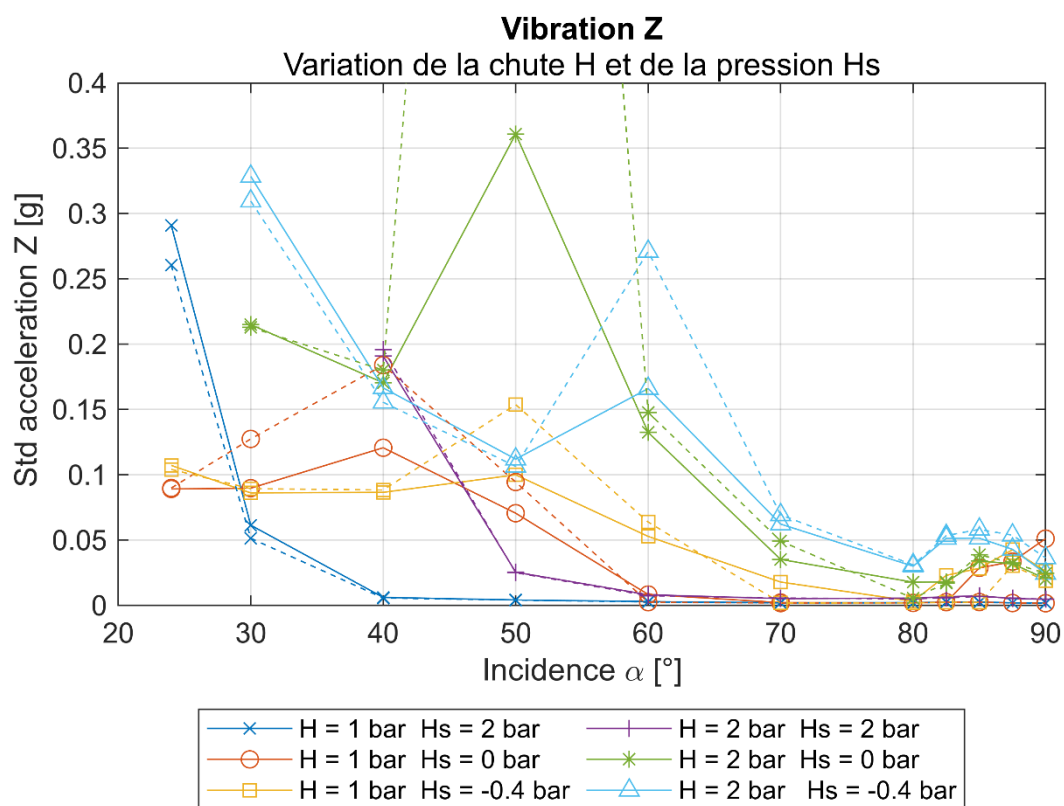


Figure 97 : Graphique des vibrations dans l'axe Z en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute H et plusieurs niveaux de pression Hs

Sur le graphique Y et Z, on peut voir que pour une incidence de 50° un pic de mesure est détecté lors de la fermeture de la vanne. Ce pic concerne la hauteur de chute de 2 bars et le niveau de pression Hs de 0 bar. Plusieurs mesures supplémentaires ont été prises dans la zone en question afin de comprendre ce phénomène.

Les mesures supplémentaires sont prises entre une incidence de 40° et 60° par pas de 5°. Six mesures sont prises par incidence : trois mesures sont prises avec un temps d'acquisition de 5 secondes et trois mesures sont prises avec un temps d'acquisition de 10s. Le but est de voir si le phénomène apparaît de façon aléatoire ou s'il suit une certaine fréquence. Voici les résultats des mesures supplémentaires [Figure 98, Figure 99 et Figure 100] :

On constate que le phénomène se passe seulement pour une incidence de 50°. De plus, il apparaît de manière aléatoire. En effet, pour la vibration en X, il n'apparaît qu'une fois sur 6 prises de mesure. Alors que dans l'axe Y, il apparaît 3 fois sur 6.

Les valeurs des pics mesurées sont considérablement plus élevées que les valeurs normalement enregistrées pour les autres incidences. L'explication la plus cohérente actuellement serait de dire qu'un phénomène hydrodynamique excite la structure de la veine proche d'une de ces fréquences propres. Des valeurs brutes ont été enregistrées. Il est donc possible d'étudier le comportement fréquentiel de ce phénomène et de déterminer plus précisément sa cause ainsi que ses effets sur le profil.

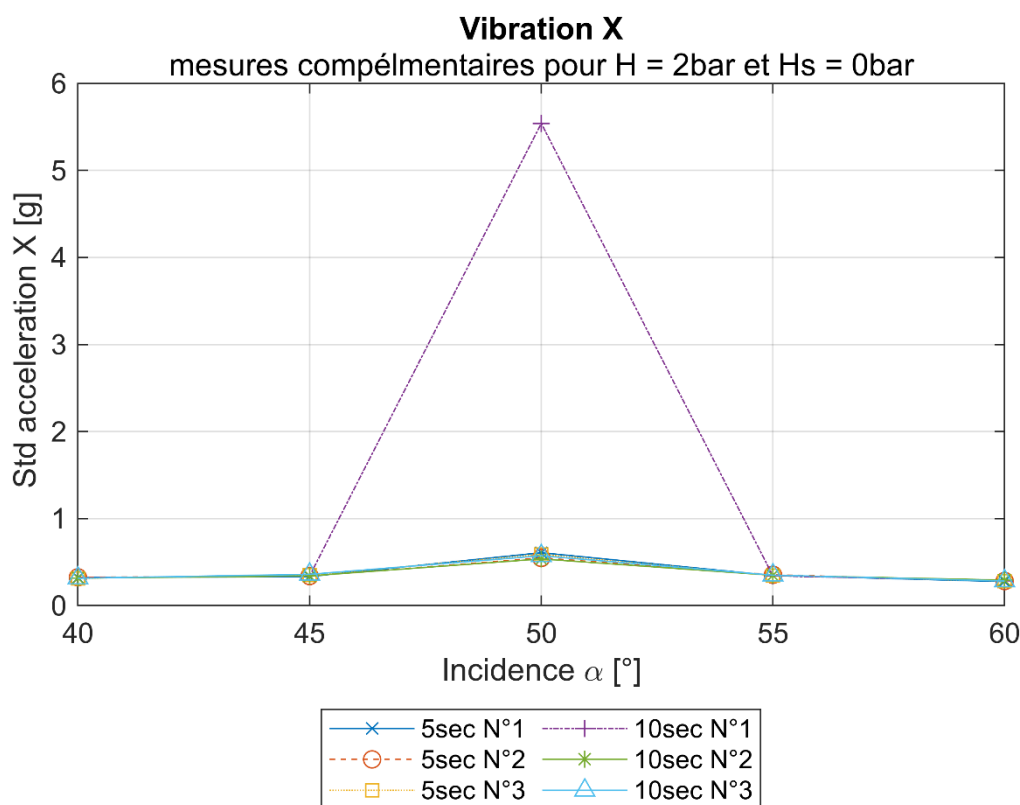


Figure 98 : Graphique des mesures supplémentaire de vibration dans l'axe X en fonction de l'incidence pour H = 2bars et Hs = 0bar

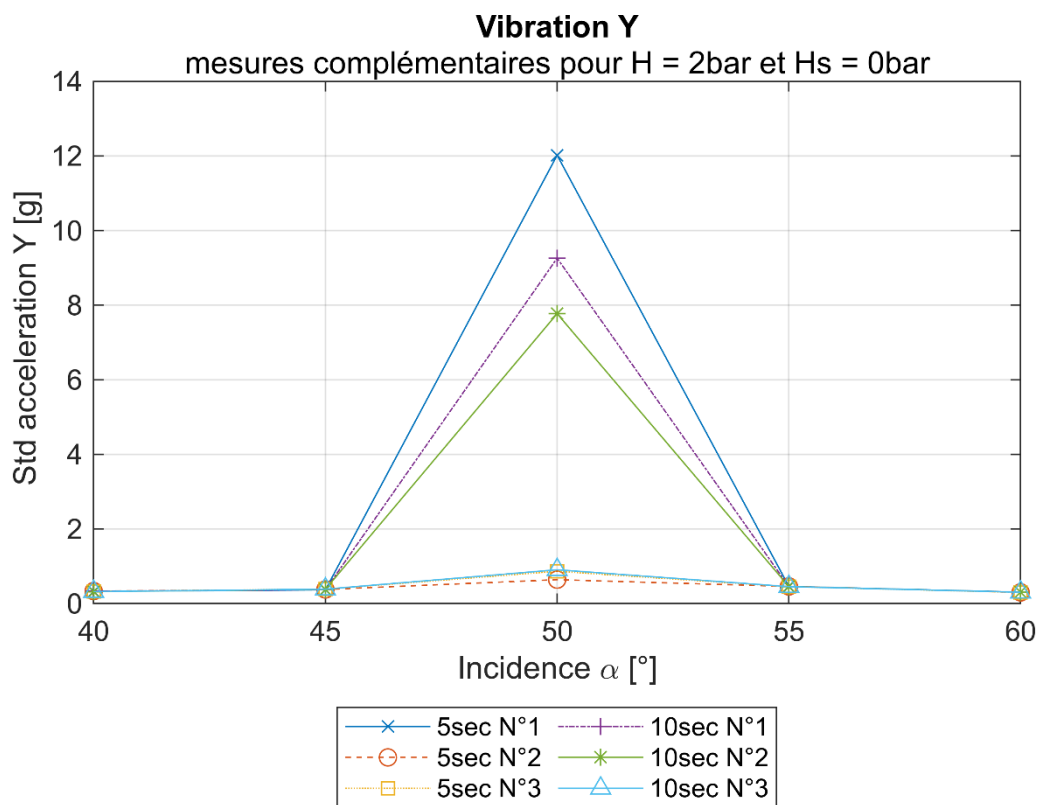


Figure 99 : Graphique des mesures supplémentaire de vibration dans l'axe Y en fonction de l'incidence pour H = 2bars et Hs = 0bar

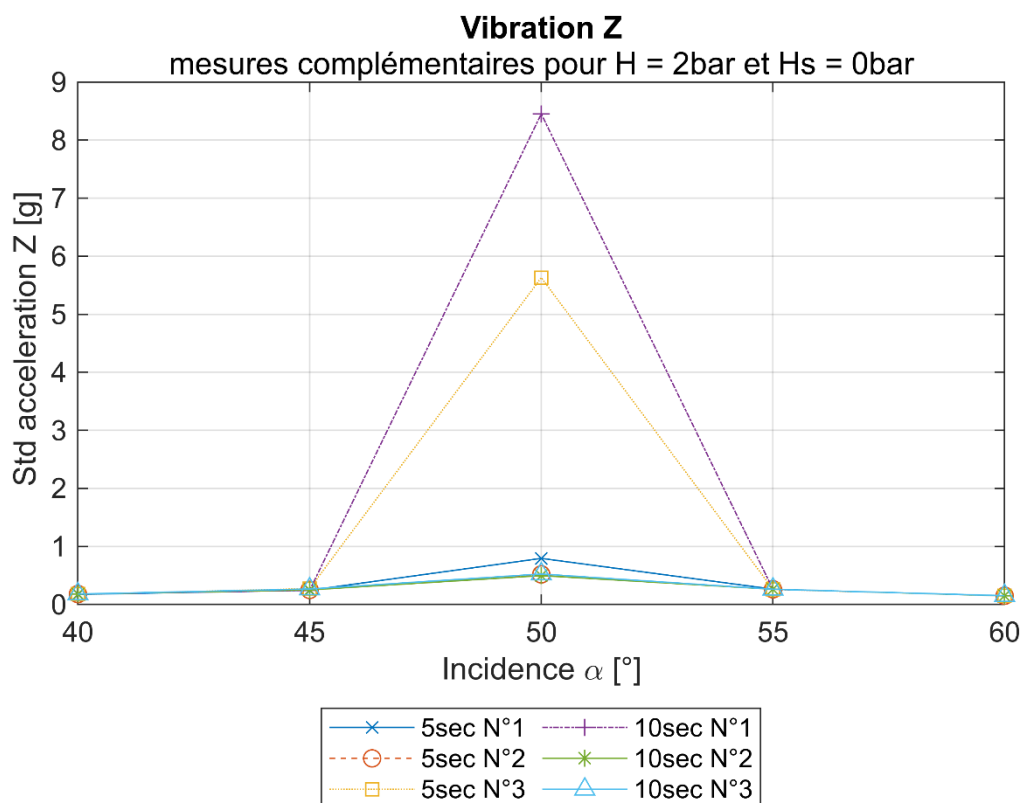


Figure 100 : Graphique des mesures supplémentaire de vibration dans l'axe Z en fonction de l'incidence pour H = 2bars et Hs = 0bar

#### 5.6.4 Coefficient de débit $K_v$

La Figure 101 représente le coefficient de débit  $K_v$  en fonction de l'incidence  $\alpha$ .

Les courbes qui représentent le coefficient  $K_v$  ont toutes la même tendance. Ce sont des courbes non-linéaire qui augmentent lorsque l'incidence diminue. Il n'y a pas de différence de  $K_v$  lors d'une fermeture ou d'une ouverture. Les coefficients sont identiques pour toutes les courbes dans la plage d'incidence  $60^\circ - 90^\circ$ . De  $80^\circ$  à  $90^\circ$ , les coefficients semblent rester stable malgré les différences de hauteur de chute et de niveau de pression.

Si l'on compare les hauteurs de chute  $H$  pour un même niveau de pression  $H_s$ , on remarque que lorsque la hauteur de chute est plus faible, le coefficient  $K_v$  est plus grand que lorsque la hauteur de chute est plus grande.

Ensuite, si l'on regarde pour un même niveau de hauteur de chute  $H$  mais que l'on compare le niveau de pression  $H_s$ , on remarque lorsque  $H_s$  diminue, le coefficient de débit diminue aussi. Quand  $H_s$  diminue, cela correspond à une diminution de  $\sigma$  et donc l'apparition et l'intensité de la cavitation sont favorisés.

On peut donc dire que la perte de charge de la vanne est plus grande lorsque la cavitation est présente. Plus l'on ferme la vanne, plus la perte de charge va augmenter. La différence de perte de charge est vraiment importante jusqu'à une incidence de  $60^\circ$ . Ensuite, les pertes de charge de chaque courbe deviennent égales.

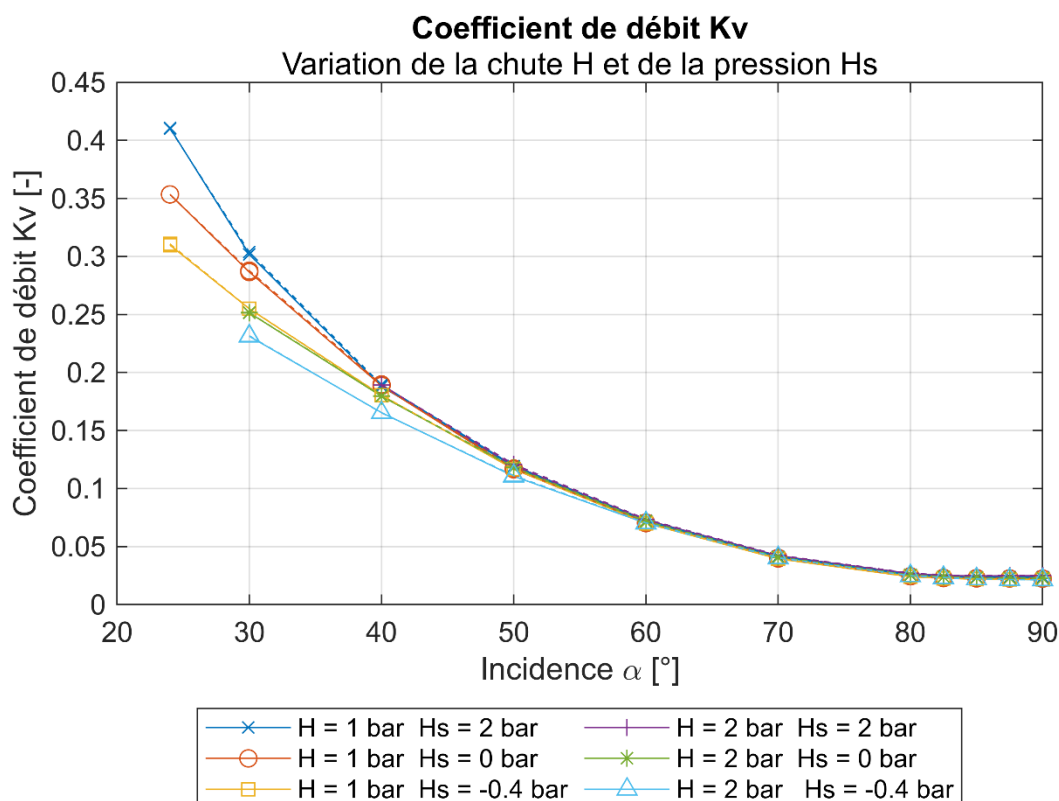


Figure 101 : Graphique du coefficient de débit  $K_v$  en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$

## 6 Conclusion et perspectives

### 6.1 Conclusion

L'objectif de ce projet vise à améliorer la compréhension de la cavitation ainsi que son impact sur les efforts supportés par une lentille de vanne papillon. La cavitation est un phénomène naturel qui consiste en la formation de bulles de vapeur au sein d'un écoulement lorsque la pression dans le fluide devient égale ou inférieure à la pression de vaporisation. L'implosion de ces bulles de vapeur génère plusieurs effets néfastes comme l'apparition d'efforts parasites ou de mouvements vibratoires.

Dans un premier temps, une carte de cavitation a pu être établie ce qui permet de connaître le type de cavitation présent dans la veine en fonction du nombre de cavitation et de l'incidence. Plusieurs prises de vues ont été réalisées permettant de visualiser le phénomène de cavitation.

Un test a ensuite été réalisé en gardant le nombre de cavitation fixe et en faisant varier l'incidence du profil. Le but est de comparer les données prises pour un régime entièrement non-cavitant et un régime pour lequel plusieurs types de cavitation sont présents. Les résultats démontrent que la cavitation de type poche augmente la portance et la traînée d'un profil alors qu'elle a tendance à diminuer le coefficient de moment. Ensuite, la supercavitation freine l'augmentation des coefficients de portance et de moment sans influencer significativement le coefficient de traînée. Le régime supercavitant a aussi tendance à diminuer les vibrations dans le profil. Alors que la cavitation de cisaillement a quant à elle l'effet inverse.

Une troisième prise de mesures a été réalisée en variant cette fois-ci le nombre de cavitation (en variant le niveau de pression de la veine) tout en gardant l'incidence du profil fixe. Les résultats indiquent que lors de l'apparition de la cavitation, le coefficient de portance et de traînée augmente jusqu'à un certain point. Ensuite, la cavitation de type poche ou supercavitation apparaissent et font diminuer ces coefficients de façon plus prononcés. Une réduction du coefficient de moment est également observée en présence d'un régime de supercavitation ou de la cavitation de type poche.

Un dernier test a été réalisé afin de représenter une ouverture et une fermeture complète de la vanne. Deux hauteurs de chute  $H$  et trois niveaux de pression  $H_s$  ont été testés. Les résultats indiquent que la cavitation augmente le coefficient de portance d'un profil jusqu'au décrochage de celui-ci, qui intervient à une incidence de  $80^\circ$ . Après le décrochage, la portance chute de manière conséquente d'une valeur de 75 [-] à 5 [-]. Pour ce qui est du coefficient de traînée, il augmente avec l'apparition de la cavitation jusqu'à un certain seuil où le coefficient devient stable. On remarque une différence sur le coefficient de moment entre l'ouverture et la fermeture de la vanne. En effet, la fermeture engendre des coefficients de moment plus élevés que pour l'ouverture. De plus, lorsque la cavitation est intense, le coefficient de moment diminue. Un phénomène particulier a été détecté au niveau de la vibration du profil pour une incidence de  $50^\circ$ . Il apparaît de manière aléatoire et augmente considérablement les vibrations. L'explication la plus cohérente actuellement serait de dire qu'un phénomène hydrodynamique engendre une excitation de la structure de la veine, se rapprochant ainsi de l'une de ses fréquences propres.

Les résultats des tests permettent donc de mettre en évidence que la cavitation influence bel est bien les efforts supportés par une lentille de vanne papillon. La cavitation influence d'une part les efforts mesurés sur le profil et également le niveau de vibration. L'amélioration de la compréhension de ce phénomène est donc primordiale lors de la conception de lentilles de vanne papillon.

## 6.2 Perspectives

Pour les perspectives de ce projet, il serait intéressant de diminuer les écarts entre les incidences pour la carte de cavitation. Cela permettrait de mieux situer les transitions entre les régimes cavitant et non-cavitant.

Il pourrait être pertinent de faire une prise de mesures brutes des forces, des moments et des accélérations. Il serait donc possible d'étudier le comportement fréquentiel de la cavitation et donc de renseigner la carte de cavitation en conséquence. De plus, les fréquences d'apparition des différents types de cavitation pourraient servir à nourrir des modèles prédictifs concernant les phénomènes de fatigue ou d'érosion hydroabrasive sur le profil.

Une étude plus approfondie sur le moment autour de l'axe Z serait aussi une perspective intéressante de recherche. En appliquant une mesure dynamique lors de la fermeture et l'ouverture de la vanne, il serait possible de mieux appréhender le couple qui s'applique sur les organes de fermeture, permettant ainsi un meilleur dimensionnement du système de fermeture d'une vanne papillon.

Pour finir, il serait intéressant de continuer les investigations concernant le phénomène de vibration rencontré lors du test d'ouverture et de fermeture de la vanne. Des mesures brutes ont déjà été enregistrées. Il est donc possible d'étudier le comportement fréquentiel de ce phénomène afin de valider l'hypothèse faite sur l'excitation de la structure de la veine proche d'une de ces fréquences propres.

## 7 Durabilité

Les 17 Objectifs de développement durable [Figure 102] sont un ensemble d'objectif fixé par L'ONU afin d'éradiquer la pauvreté, de protéger la planète et de garantir la prospérité pour tous d'ici 2030. Elles tiennent compte de la dimension économique, la dimension sociale et de la dimension environnemental du développement durable.



Figure 102 : 17 Objectifs de développement durable (ODD)

Le projet de recherche sur l'influence de la cavitation sur les efforts supportés par une lentille de vanne papillon correspond pleinement à trois des Objectifs de développement durable, notamment dans les domaines de l'industrie, de l'innovation et de l'infrastructure (ODD 9), l'énergie propre et d'un coût abordable (ODD 7), ainsi que de la consommation et de la production responsables (ODD 12).

En explorant les effets de la cavitation, ce projet contribue à améliorer la durabilité des infrastructures industrielles en identifiant des moyens de prévenir les dommages potentiels causés par ce phénomène. De plus, en étudiant les processus de cavitation et leurs impacts sur les équipements, le projet vise innover dans la conception de vannes papillon favorisant ainsi des pratiques de production plus efficaces et durables.

L'ODD N°7 encourage la recherche dans le domaine de l'énergie renouvelable et de l'efficacité énergétique. La vanne papillon étudiée lors de ce TB est un élément de sécurité se trouvant sur l'aménagement de la Grande Dixence. C'est la vanne de tête qui se trouve sur la conduite forcée qui achemine l'eau du lac des Dix jusqu'à la centrale de production de Fionnay. En étudiant les effets de la cavitation sur cette lentille de vanne papillon, il est possible de mieux comprendre les impacts de ce phénomène et donc d'optimiser sa conception ainsi que son efficacité.

En comprenant les facteurs qui conduisent à la cavitation, ce projet s'aligne également avec l'objectif de Consommation et de Production Responsables en encourageant l'utilisation de technologies et de matériaux plus adaptés. En intégrant ces connaissances dans la conception d'une vanne papillon, le projet apporte des solutions durables pour les défis liés à l'infrastructure et à la production industrielle.

## 8 Remerciements

Ce travail de bachelor fut un apprentissage très intéressant. J'ai eu l'occasion de travailler dans un domaine qui me plaît beaucoup, entouré de personnes compétentes et impliquées dans ce projet. Je souhaite donc remercier toutes les personnes qui m'ont accompagné et conseillé tout au long de ce projet.

- Prof. **Cécile Münch-Alligné**
- Dr. **Vlad Hasmatuchi Constantin**
- Dr. **Ali Amini**
- Ing. **Charly-Loup Lecointre**
- Ing. **Maxime Chiarelli**

## 9 Références

### 9.1 Bibliographie

- [1] « Force hydraulique ». <https://www.bfe.admin.ch/bfe/fr/home/approvisionnement/energies-renouvelables/force-hydraulique.html>
- [2] C. Münch-Alligné, « Cours d'hydraulique ». 2022.
- [3] C. Fracheboud, « Organes de régulation et de fermeture ALPIQ SA ». 2023.
- [4] T. Bovet et Institut de Machines Hydrauliques, *Feuilles de cours illustrées*. in Polycopiés de l'EPFL. Lausanne: EPFL, 1963.
- [5] Société hydrotechnique de France, Éd., *La cavitation: mécanismes physiques et aspects industriels*. in Collection Grenoble sciences. Grenoble: Presses universitaires de Grenoble, 1995.
- [6] *Turbines hydrauliques, pompes d'accumulation et pompes-turbines - essais de réception sur modèle: Hydraulic turbines, storage pumps and pump-turbines - model acceptance tests*, 2. éd. in Norme internationale / Commission Electrotechnique Internationale, no. 60193. Geneva: IEC, 1999.
- [7] M. A. Fouad Kandil et A. Okasha Elnady, « Airfoil, Angle of Attack, CFD, Moment Coefficient, Pressure Coefficient, Lift, Drag », *International Journal of Aerospace Sciences*, 2017.
- [8] « NACA 0015 ». <http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=naca0015-il>
- [9] B. Mosser, « Analyser le signal ». [https://media4.obspm.fr/public/ressources\\_lu/pages\\_analyser/impression.html](https://media4.obspm.fr/public/ressources_lu/pages_analyser/impression.html)
- [10] The U.S Atomic Energy Commission et The National Science Foundation, « Handbook of Hydraulic Resistance. », 1960.
- [11] F. Pedroni, « Détection de la cavitation », 2019.
- [12] « Couple et Précontrainte | Bossard Suisse ». <https://www.bossard.com/ch-fr/assembly-technology-expert/informations-techniques/convertisseurs-et-calculateurs-en-ligne/torque-and-preload-calculator/>.

### 9.2 Liste des figures

Figure 1 : Méthodologie

Figure 2 : Schéma simplifié d'une installation hydraulique avec position des vannes principales[3, p. 11]

Figure 3 : Les types de vannes les plus courants. Encombrement pour le même diamètre nominal[4]

Figure 4 : Vanne papillon avec lentille standard[4]

Figure 5 : Vanne treillis, barrage de l'Hongrin[4]

Figure 6 : Vanne biplan, centrale de Xavantes[4]

Figure 7 : Vue en coupe d'une vanne papillon[3]

Figure 8 : Sens de fermeture de la vanne

Figure 9 : Diagramme des états d'un corps et courbes de changement de phase[5, p. 25]

Figure 10 : Cavitation partielle sur un profil NACA 16-012 [5, p. 141]

Figure 11 : Supercavitation sur un profil NACA 16-012 [5, p. 141]

Figure 12 : Bulles sur un profil d'aile [5, p. 28]

Figure 13 : Poche sur un profil d'aile [5, p. 28]

Figure 14 : Tourbillon d'extrémité d'aile [5, p. 29]

Figure 15 : Définition de la géométrie d'un profil d'aile ou d'aube [2, p. 66]

Figure 16 : Schéma d'un profil dans un écoulement

Figure 17 : Schéma d'explication de la portance

Figure 18 : Distribution de pression sur un profil GOE 387 à 10 degrés d'incidence[7, p. 3]

Figure 19 : Coefficient de portance en fonction de l'incidence pour  $Re=500$  [8]

Figure 20 : Coefficient de traînée en fonction de l'incidence pour  $Re=500$  [8]

Figure 21 : Coefficient du moment en fonction de l'incidence pour  $Re=500$  [8]

- Figure 22 : Ecoulement laminaire à gauche et écoulement turbulent à droite [2, p. 48]  
 Figure 23 : Exemple d'un signal de force pris sur 200 secondes [9]  
 Figure 24 : Banc de test DN100  
 Figure 25 : Interface LabView de pilotage du banc de test DN100  
 Figure 26 : Veine de cavitation  
 Figure 27 : Vue de dessus du dispositif de rotation du profil  
 Figure 28 : Dimensions de la veine de cavitation  
 Figure 29 : Vue en coupe de la veine avec les différents divergents et convergents  
 Figure 30 : Transition rectangulaire à circulaire  
 Figure 31 : Divergent plan sur une ligne  
 Figure 32 : Convergent rectiligne  
 Figure 33 : Convergent curviligne  
 Figure 34 : Schéma en coupe de la veine pour la définition de la vitesse et de la pression  
 Figure 35 : Lentille de la vanne papillon  
 Figure 36 : Couvercle de la lentille  
 Figure 37 : Vue en coupe du montage profil – couvercle – balance - réducteur angulaire  
 Figure 38 : Mise à zéro du profil horizontalement  
 Figure 39 : Mise à zéro du profil verticalement  
 Figure 40 : Schéma hydraulique du banc DN100  
 Figure 41 : Balance Kistler 6 axes Type 9306A  
 Figure 42 : Schéma de la chaîne d'acquisition  
 Figure 43 : Interface LabView pour l'acquisition de forces, moments et accélérations  
 Figure 44 : Référentiel de la balance sans incidence ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ). Référentiel par rapport à l'écoulement  $C^\infty$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )  
 Figure 45 : Référentiel de la balance avec incidence ( $X'$ ,  $Y'$ ,  $Z'$ ). Référentiel par rapport à l'écoulement  $C^\infty$  ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ )  
 Figure 46 : Matrice de rotation d'un angle  $\vartheta$   
 Figure 47 : Référentiel de la balance (rouge) et référentiel de l'accéléromètre (vert)  
 Figure 48 : Setup pour la prise d'image depuis le côté  
 Figure 49 : Setup pour la prise d'image depuis le dessus  
 Figure 50 : Fixation du profil sur la balance  
 Figure 51 : Exemple de sollicitation sur les vis. Incidence du profil à  $90^\circ$  (vanne fermée). Effort dû à l'écoulement génère une force en  $Y'$  et un moment autour de  $X'$   
 Figure 52 : Schéma pour les calculs des efforts pour les vis de fixation  
 Figure 53 : Couple et précontrainte selon le calculateur Bossard[12]  
 Figure 54 : Schéma de position des forces et des moments  
 Figure 55 : Résultats du test « paramètres limites »  
 Figure 56 : Courbe 3D Pour  $F_x$   
 Figure 57 : Courbe 3D Pour  $F_y$   
 Figure 58 : Courbe 3D Pour  $F_z$   
 Figure 59 : Polynôme de la courbe 3D  $F_x$   
 Figure 60 : Implémentation des polynômes dans LabView  
 Figure 61 : Application de la pression  $H_s$  sur le profil  
 Figure 62 : Plan d'expérience  
 Figure 63 : Résultat du test de répétabilité après la pose de l'accéléromètre  
 Figure 64 : Résultat du test de répétabilité après la modification du software LabView  
 Figure 65 : Résultat du test de répétabilité en comparant le test 1 et le test 2  
 Figure 66 : Temps d'acquisition – Résultats  
 Figure 67 : Carte de cavitation pour un Reynolds de 500'000  
 Figure 68 : Image du profil vu de côté. Incidence =  $5^\circ$  et  $\sigma = 5.8$ . Pas de cavitation  
 Figure 69 : Image du profil vu de dessus. Incidence =  $5^\circ$  et  $\sigma = 5.8$ . Pas de cavitation  
 Figure 70 : Image du profil vu de côté. Incidence =  $10^\circ$  et  $\sigma = 2.8$ . Poche de cavitation partielle  
 Figure 71 : Image du profil vu de dessus. Incidence =  $10^\circ$  et  $\sigma = 2.8$ . Poche de cavitation partielle  
 Figure 72 : Image du profil vu de côté. Incidence =  $20^\circ$  et  $\sigma = 3.3$ . Poche diphasique  
 Figure 73 : Image du profil vu de dessus. Incidence =  $20^\circ$  et  $\sigma = 3.3$ . Poche diphasique

- Figure 74 : Image du profil vu de côté. Incidence =  $20^\circ$  et  $\sigma = 2.4$ . Supercavitation
- Figure 75 : Image du profil vu de dessus. Incidence =  $20^\circ$  et  $\sigma = 2.4$ . Supercavitation
- Figure 76 : Image du profil vu de côté. Incidence =  $15^\circ$  et  $\sigma = 4.2$ . Cavitation de cisaillement
- Figure 77 : Image du profil vu de dessus. Incidence =  $15^\circ$  et  $\sigma = 4.2$ . Cavitation de cisaillement
- Figure 78 : Définition des valeurs de sigma selon la carte de cavitation
- Figure 79 : Graphique du coefficient de portance  $C_l$  en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 80 : Graphique du coefficient de traînée  $C_d$  en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 81 : Graphique du coefficient du moment  $CM_z$  en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 82 : Graphique des vibrations dans l'axe X en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 83 : Graphique des vibrations dans l'axe Y en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 84 : Graphique des vibrations dans l'axe Z en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 85 : Graphique du coefficient de débit  $K_v$  en fonction de l'incidence  $\alpha$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 86 : Illustration des points de mesure sur la carte de cavitation
- Figure 87 : Graphique du coefficient de portance  $C_l$  en fonction de  $\sigma$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 88 : Graphique du coefficient de traînée  $C_d$  en fonction de  $\sigma$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 89 : Graphique du coefficient du moment  $CM_z$  en fonction de  $\sigma$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 90 : Graphique du coefficient de débit  $K_v$  en fonction de  $\sigma$  pour un Reynolds de 500'000
- Figure 91 : Graphique du coefficient de portance en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$
- Figure 92 : Graphique du coefficient de traînée en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$
- Figure 93 : Graphique du coefficient de moment en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$
- Figure 94 : Graphique du coefficient de moment en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$  avec un zoom entre l'incidence de  $70^\circ$  et  $90^\circ$
- Figure 95 : Graphique des vibrations dans l'axe X en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$
- Figure 96 : Graphique des vibrations dans l'axe Y en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$
- Figure 97 : Graphique des vibrations dans l'axe Z en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$
- Figure 98 : Graphique des mesures supplémentaire de vibration dans l'axe X en fonction de l'incidence pour  $H = 2\text{bars}$  et  $H_s = 0\text{bar}$
- Figure 99 : Graphique des mesures supplémentaire de vibration dans l'axe Y en fonction de l'incidence pour  $H = 2\text{bars}$  et  $H_s = 0\text{bar}$
- Figure 100 : Graphique des mesures supplémentaire de vibration dans l'axe Z en fonction de l'incidence pour  $H = 2\text{bars}$  et  $H_s = 0\text{bar}$
- Figure 101 : Graphique du coefficient de débit  $K_v$  en fonction de l'incidence pour plusieurs hauteurs de chute  $H$  et plusieurs niveaux de pression  $H_s$
- Figure 102 : 17 Objectifs de développement durable (ODD)

### 9.3 Liste des tableaux

- Tableau 1 : Spécification de la chaine d'acquisition pour la balance
- Tableau 2 : Spécification de la chaine d'acquisition pour l'accéléromètre
- Tableau 3 : Caractéristiques des éléments d'éclairage
- Tableau 4 : Moyennes et écarts types des mesures de validation de la calibration du profil

## **10 Annexes**

### **10.1 Protocole d'utilisation du banc**

### **10.2 Procédures**

*10.2.1 Procédure 0.1 – Mise en route du banc DN100*

*10.2.2 Procédure 0.2 – Vidange du banc DN100*

*10.2.3 Procédure 3.1 – Montage de la lentille dans la veine*

### **10.3 Protocoles de mesure**

*10.3.1 Protocole de mesure 3.2 – Paramètres limites*

*10.3.2 Protocole de mesure 3.3 – Calibration de la lentille d'une vanne papillon*

*10.3.3 Protocole de mesure 3.4 – Carte de cavitation*

*10.3.4 Protocole de mesure 3.5 – Test de répétabilité*

*10.3.5 Protocole de mesure 3.6 – Temps d'acquisition*

*10.3.6 Protocole de mesure 4.1 – Mesure pour  $\sigma$  constant et variation de l'incidence*

*10.3.7 Protocole de mesure 4.2 – Mesure pour l'incidence constante et variation de  $\sigma$*

*10.3.8 Protocole de mesure 4.3 – Mesure des efforts pour une ouverture et une fermeture complète de la vanne*

### **10.4 Liste des capteurs**

### **10.5 Certificats de l'instrumentation et fiche technique**

*10.5.1 Balance*

*10.5.2 Accéléromètre*

*10.5.3 Amplificateur*

### **10.6 Feuille Excel**

*10.6.1 Calculs de résistance des vis*

*10.6.2 Calculs de pertes de charges*

*10.6.3 Validation de la calibration*

*10.6.4 Répétabilité*

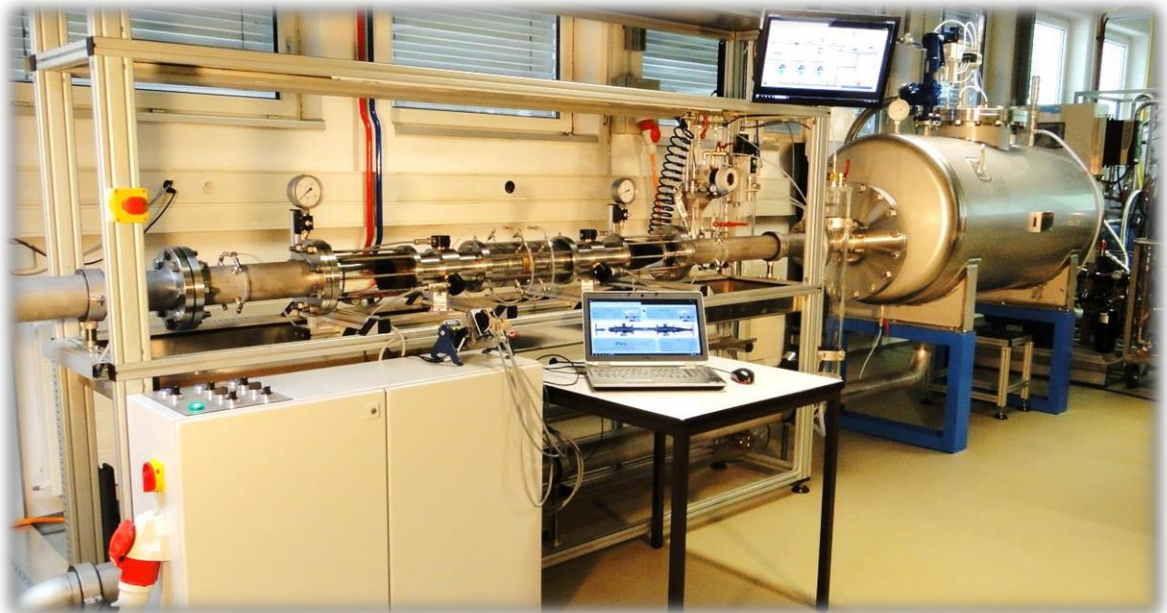
# 10 ANNEXES

## 10.1 Protocole d'utilisation du banc

## Banc d'essais hydraulique

# Protocole d'utilisation

*Version v2.031114*



**Vlad Hasmatuchi**

**Shadya Gabathuler**

Sion, 04.12.2014

# Important !!!

Il est strictement interdit de démarrer le banc d'essais hydraulique et/ou de faire des opérations sans avoir eu:

- une autorisation au préalable de la personne responsable du stand;
- une formation obligatoire sur la sécurité et l'opération du stand;
- un renseignement concernant l'état actuel du banc d'essais auprès de la dernière personne à l'avoir employé – voir le journal d'utilisation du banc d'essais.

L'opérateur du banc d'essais est totalement responsable des éventuels dégâts matériels et humains provoqués par une utilisation non-conforme au protocole d'utilisation et/ou par le non-respect des règles de sécurité.

A la fin de l'utilisation, l'opérateur doit remplir le journal d'utilisation du banc d'essais ainsi qu'informer le responsable du stand sur :

- l'état du stand à la fin de l'utilisation;
- toute modification apportée au banc d'essais (hydraulique, électrique, informatique);
- tout dysfonctionnement détecté pendant l'utilisation.

Liste de dangers potentiels due à une utilisation non-conforme :

- explosion (réservoir pressurisable partiellement rempli avec de l'air);
- électrocution (armoires électriques alimentées en 3x400 V);
- inondation du laboratoire et du sous-sol.



Hav, Gah, le 04.12.2014

# Description générale

**Banc d'essais**

Ordinateur de commande

**Banc d'essais**

Armoire de commande

**Banc d'essais**

Vanne manuelle  
principale

**Microturbine**

- Ordinateur portable  
- Armoire de commande

**Banc d'essais**

Structure de test

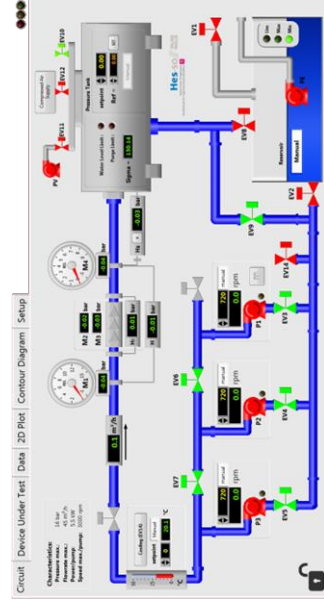
**Banc d'essais**

Réservoir pressurisable

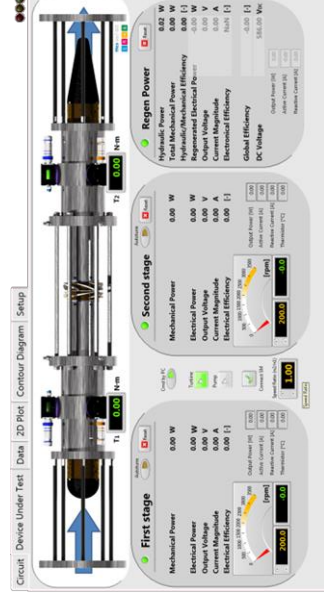


Logiciel de contrôle  $\mu$ Power

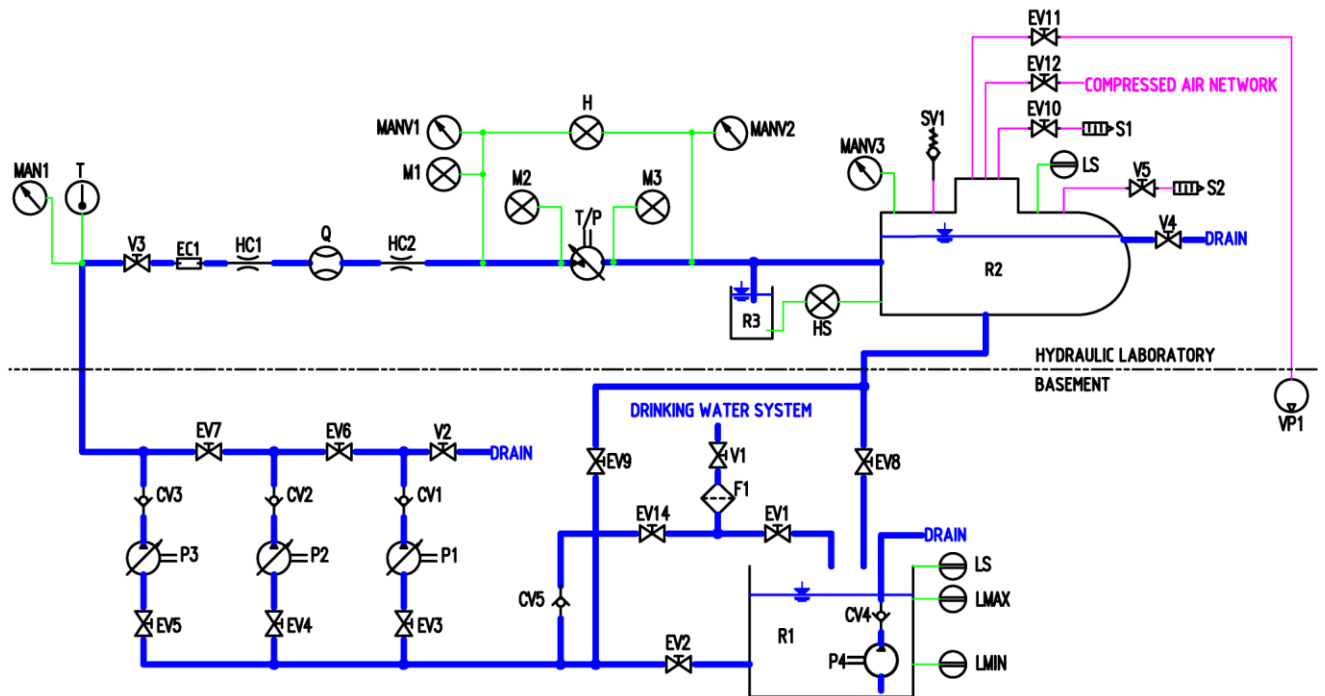
"Circuit"



"Device Under Test"





## Schéma du circuit hydraulique



Acronym	Component	Functionality
R <sub>1</sub>	Main reservoir	Supply the test rig with water
F <sub>1</sub>	Filter	Water filter
EV <sub>1</sub>	Solenoid valve	Control the water supply from the drinking water system
P <sub>4</sub>	Centrifugal pump	Drain the main reservoir
CV <sub>4</sub>	Check valve	Ensures unidirectional flow toward drain
P <sub>1, 2, 3</sub>	Centrifugal pumps	Supply the circuit with hydraulic power
CV <sub>1, 2, 3</sub>	Check valves	Ensure unidirectional flow in turbine mode operation
T/P	Turbine/Pump	Variable speed reduced-scale testing model
EV <sub>2, 3...9</sub>	Solenoid valves	Control the hydraulic circuit configuration
EV <sub>14</sub>	Solenoid valve	Control the fresh water supply for cooling
CV <sub>5</sub>	Check valve	Ensures unidirectional flow during cooling
EC <sub>1</sub>	Expansion compensator	Ensures axial direction flexibility for the testing model assembly
HC <sub>1, 2</sub>	Honeycomb sections	Ensures uniform flow upstream the flowmeter and the testing model
R <sub>2</sub>	Pressurised reservoir	Allows simulating different positive or negative implantation levels
EV <sub>10, 11, 12</sub>	Solenoid valves	Control the air pressure into the pressurised reservoir
VP <sub>1</sub>	Vacuum pump	Supply the pressurised reservoir with vacuum
SV <sub>1</sub>	Safety valve	Protect the pressurised reservoir from excessive pressure
S <sub>1, 2</sub>	Silencers	Silencers for pressurised air drain
R <sub>3</sub>	Level reservoir	Water reservoir for the zero implantation level of the testing model
V <sub>1, 2, ...</sub>	Manual valves	Security and control for filling, spillway and operation of the test rig

# Protocole d'utilisation


## 1. Mise en route électrique

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Banc d'essai	Structure de test	Ecran tactile	-	Enclenchement
		Eclairage	-	Enclenchement
	Armoire de commande	Interrupteur principal	-	Enclenchement
	Structure de test	Vanne manuelle Festo	-	Position ouvert
		Régulateur Festo	$p_{rel} = 1 \text{ bar}$	Réglage
	Ordinateur de commande	Bouton principale	-	Enclenchement
		Microsoft Windows	Computer Only Logon User : uadmin	Login
		Logiciel $\mu$ Power 	-	Lancement
Microturbine	Armoire de commande	Interrupteur principal	-	Enclenchement
		cDAQ	-	Branchement au réseau 220V
		Switch Cisco	-	Contrôle connexion réseau Wi-Fi
	Ordinateur Portable	Bouton principal	-	Enclenchement
		Microsoft Windows	Computer Only Logon User : uadmin	Login
		Carte réseau Wi-Fi	Réseau HydroCE07	Connexion
		Logiciel $\mu$ Power 	-	Lancement

## 2. Configuration du circuit hydraulique pour remplissage

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Banc d'essai	Réservoir pressurisable	Déversoir	-	Raccordement
		Vanne déversoir	-	Ouvert
		Vanne manuelle de mise à l'atmosphère	-	Ouvert
	Armoire de commande	EV9, EV8	-	Position Fermé
		EV2, EV3, EV4, EV5, EV6, EV7	-	Position Ouvert
		P1, P2, P3	-	Enclenchement
		Pompe de vidange	-	Position automatique
		Pompe à vide	-	Position automatique
	Circuit hydraulique	Vanne manuelle principale	-	Ouvert

### 3. Remplissage et configuration en circuit fermé

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Logiciel uPower	Interface "Circuit"	Mode Remplissage Réservoir	-	"Automatique"
			Sur l'interface: Réservoir :  MIN	
		P1, P2, P3	Vers le réservoir pressurisable: Aucun débordement dans le déversoir	Enclenchement
			Vers le réservoir pressurisable: débordement dans le déversoir	
		Remplissage Terminé		
Banc d'essais	Interface "Circuit"	P1, P2, P3	-	Arrêt
		Mode Remplissage Réservoir	-	"Manual"
		EV1	-	Position Fermé
	Armoire de Commande	EV2	-	Position Fermé
		EV9	EV2 = Fermé	Position Ouvert

### 4. Calibrage des convertisseurs de la microturbine

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Microturbine	Armoire de Commande	Regen	-	Enable = On
		1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> Stage	Regen = Enable On	Enable = On
Logiciel uPower	Interface	"Connect SM"	-	Impulsion
	"Device Under Test"	1 <sup>st</sup> stage "Autotune"	-	Enclenchement
		2 <sup>nd</sup> stage "Autotune"	1 <sup>st</sup> stage "Autotune Finished"	Enclenchement
Microturbine		1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> Stage	-	Enable = Off
		Regen	1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> = Enable On	Enable = Off

## 5. Démarrage des Pompes et microturbine

Section	Élément	Condition obligatoire	Action
<b>Microturbine</b>	Armoire de Commande	Regen	Enable = On
	1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> Stage	Regen = Enable On	Enable = On
<b>Logiciel uPower</b>	Interface	"Commande by PC"	Enclenchement
	"Device Under Test"	"Turbine"	Enclenchement
		"Speed ratio"	$n_1/n_2 = 1$
		1 <sup>st</sup> Stage "Speed"	300 [rpm]
	Interface	P1, P2, P3	Enclenchement
	"Circuit"	P1, P2, P3	720 [rpm]

## 6. Purge du circuit hydraulique et des paliers céramiques

Section	Élément	Condition obligatoire	Action
<b>Banc d'essais</b>	Réservoir pressurisable	Vanne déversoir	Position Fermé
		Vanne de mise à l'atmosphère	Position Fermé
	Structure de test	Vannes manuelles réservoir de purge (2x)	Position Fermé
<b>Logiciel uPower</b>	Interface	P1, P2, P3	1200 [rpm]
	"Circuit"	EV10	Position Fermé
		EV11	Position Ouvert
		Pompe à vide "PV"	Enclenchement
	Interface	Pompe à vide "PV"	Arrêt
	"Circuit"	EV11	Position Fermé

Remarque : Enlever les bulles d'airs présentent dans le circuit hydraulique et dans les paliers céramiques.

## 7. Purge des capteurs de pression

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Banc d'essais	Réservoir pressurisable	Vanne déversoir	-	Position Fermé
		Vanne de mise à l'atmosphère	-	Position Fermé
	Structure de test	Régulateur Festo	$p_{rel} = 2 \text{ [bar]}$	Réglage
Logiciel uPower	Interface "Device Under Test"	1 <sup>st</sup> Stage "Speed"	-	500 [rpm]
	Interface "Circuit"	P1, P2, P3	-	1200 [rpm]
		EV10	-	Position Fermé
		EV12	$M_4 \leq 1 \text{ [bar]}$	Position Ouvert
		EV12	$M_4 > 1 \text{ [bar]}$	Position Fermé
Banc d'essais	Structure de test	Vanne manuelles capteur de pression M <sub>1</sub> , M <sub>2</sub> , M <sub>3</sub> , H	-	Position Ouvert / Fermé  Remarque: Enlever les bulles d'airs du circuit des capteurs

## 8. Mise à l'atmosphère du réservoir pressurisable

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Logiciel uPower	Interface "Circuit"	-	Position Ouvert	
Banc d'essais	Réservoir pressurisable	Vanne du déversoir	Sur interface "Circuit" $M_4 = 0 \text{ [bar]}$	Position Ouvert
		Vanne de mise à l'atmosphère	Sur interface "Circuit" $M_4 = 0 \text{ [bar]}$	Position Ouvert
	Structure de test	Vannes manuelles réservoir de purge (2x)	-	Position Ouvert
		Régulateur Festo	$p_{rel} > MANV_1 \text{ [bar]} (M_1)$	Réglage

## 9. Mise en stand-by

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Logiciel iPower	Interface	P1 mode	-	"Manual"
	"Circuit"	P1, P2, P3	-	720 [rpm]
	Interface	"Speed ratio"	-	$n_1/n_2 = 1$
	"Device Under Test"	1 <sup>st</sup> stage "Speed"	-	300 [rpm]
	Interface	P1, P2, P3	-	Arrêt
	"Circuit"			
	Interface	1 <sup>st</sup> stage "Speed"	-	0 [rpm]
	"Device Under Test"	"Turbine"	Speed = 0 [rpm]	Arrêt
		"Commande by PC"	-	Arrêt
Microturbine	Armoire de Commande	1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> Stage	-	Enable = Off
		Regen	1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> = Enable On	Enable = Off
Banc	Structure de Test	Régulateur Festo	$p_{rel} = 1$ [bar]	Réglage

## 10. Refroidissement de l'eau du circuit - Uniquement à l'atmosphère

Section	Élément	Condition obligatoire	Action
Logiciel uPower	Interface "Circuit"	Mode Remplissage Réservoir	"Manual"
		EV1	Position Fermé
		PE	Réservoir : ● MIN (ON) Enclenchement
	Interface "Circuit"	PE	Réservoir : ● MIN (OFF) Arrêt
Banc d'essais	Armoire de commande	EV8	Niveau réservoir pressurisable supérieur à la moitié Position Ouvert
	Armoire de commande	EV8	Niveau réservoir pressurisable à moitié Position Fermé
Microturbine	Armoire de commande	Regen	- Enable = ON
		1 <sup>st</sup> , 2 <sup>nd</sup> Stage	Regen = Enable On Enable = ON
Logiciel uPower	Interface "Device Under Test"	"Commande by PC"	- Enclenchement
		"Turbine"	- Enclenchement
		"Speed ratio"	- $n_1/n_2 = 1$
		1 <sup>st</sup> Stage "Speed"	- 300 [rpm]
	Interface "Circuit"	P1, P2, P3	- 720 [rpm]
		Cooling (EV14)	Le niveau du réservoir pressurisable doit être plus bas que le niveau du déversoir Enclenchement
	<b>Refroidissement terminé</b>		
	Interface "Circuit"	Cooling (EV14)	Débordement du réservoir pressurisable par le déversoir Arrêt

## 11. Travail en mode exploratoire manuel

Section	Élément	Condition obligatoire	Action
Banc d'essais	Structure de test	$p_{rel} > MANV_1 (M_1)$ à maintenir pendant toute l'opération	Réglage
Logiciel uPower	Interface	-	$n_1/n_2 = \dots$
	"Device Under Test"	-	$n_{1st} = \dots$ [rpm]
	Interface	-	$n_{p1} = \dots$ [rpm]
	"Circuit"		$n_{p2} = \dots$ [rpm]
			$n_{p3} = \dots$ [rpm]

## 12. Travail en mode exploratoire régulé

Section		Élément	Condition obligatoire	Action
Banc d'essais	Structure de test	Régulateur Festo	$p_{rel} > MANV_1 (M_1)$ à maintenir pendant toute l'opération	Réglage
Logiciel uPower	Interface	"Speed ratio"	-	$n_1/n_2 = \dots$
	"Device Under Test"	1 <sup>st</sup> stage "Speed"	-	$n_{1st} = \dots$ [rpm]
	Interface	P1 select mode	-	[rpm] / [m³/h] / [bar]
	"Circuit"	P1	-	$n_{p1} = \dots / Q_{p1} = \dots / p_{p1} = \dots$





### 13. Mise sur pression du réservoir pressurisable

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Banc d'essais	Réservoir pressurisable	Vanne déversoir	-	Position Fermé
		Vanne de mise à l'atmosphère	-	Position Fermé
	Structure de test	Régulateur Festo	$p_{rel} > MANV_1 (M_1)$ à maintenir pendant toute l'opération	Réglage
Logiciel uPower	Interface	EV10	-	Position Fermé
	"Circuit"	EV12	$M_4 \leq \dots$ [bar]	Position Ouvert
	Mise en Surpression fini			
	Interface	EV12	$M_4 > \dots$ [bar]	Position Fermé
	"Circuit"			



### 14. Mise sous vide du réservoir pressurisable

Section		Élément	Condition obligatoire	Action
Banc d'essais	Réservoir pressurisable	Vanne déversoir	-	Position Fermé
		Vanne de mise à l'atmosphère	-	Position Fermé
	Structure de test	Régulateur Festo	$p_{rel} > MANV_1 (M_1)$ à maintenir pendant toute l'opération	Réglage
L'odiciel uPower	Interface	EV10	-	Position Fermé
	"Circuit"	EV11	-	Position Ouvert
		Pompe à vide	$M_4 \geq \dots$ [bar]	Enclenchement
	Mise en Sous vide fini			
	Interface	Pompe à vide	$M_4 > \dots$ [bar]	Arrêt
	"Circuit"	EV11	-	Position Fermé

## 15. Vidange du circuit hydraulique

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Logiciel $\mu$ Power	Interface "Circuit"	Mode Remplissage Réservoir	-	"Manual"
		EV1	.	Position Fermé
		PE	Réservoir :  MIN (ON)	Enclenchement
	Vidange du Réservoir fini			
	Interface "Circuit"	PE	Réservoir :  MIN (OFF)	Arrêt
Banc d'essais	Circuit hydraulique	Vanne manuelle principal	-	Position Fermé
	Armoire de commande	EV3, EV4, EV5, EV6, EV7, EV9	-	Position Fermé
		P1, P2, P3	-	Hors tension
		EV8	Réservoir :  MAX (OFF)	Position Ouvert
	Vidange du Circuit Hydraulique fini			
	Armoire de commande	EV8	Réservoir :  MAX (ON) et/ou circuit hydraulique vide	Position Fermé
Structure de test	Vanne Festo	-	Position Fermé	

## 16. Arrêt électrique définitif

Section	Élément	Condition obligatoire	Action	
Microturbine	Portable de commande	Logiciel $\mu$ Power 	Shut down controller	Arrêt "Esc"
		Bouton principal	-	Arrêt
	Armoire de commande	Interrupteur principal	-	Arrêt
Banc d'essai	Ordinateur de commande	Logiciel $\mu$ Power 	Shut down controller	Arrêt "Esc"
		Bouton principal	-	Arrêt
	Armoire de commande	Interrupteur principal	-	Arrêt
	Structure de test	Ecran tactile	-	Arrêt
		Eclairage	-	Arrêt

## 10.2 Procédures

10.2.1 Procédure 0.1 – Mise en route du banc DN100

10.2.2 Procédure 0.2 – Vidange du banc DN100

10.2.3 Procédure 3.1 – Montage de la lentille dans la veine

<b>Procédure 0.1 – Mise en route du banc DN100</b>	
Date	07.06.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Procédure d'allumage du banc DN100
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31
Description	Décrire le processus de mise en route du banc de test DN100
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Allumage des armoires électrique (vannes et pompe) avec interrupteur principal</li> <li>2. Contrôler que la vanne de trop plein soit ouverte</li> <li>3. Contrôler que la vanne de mise à pression atmosphérique soit ouverte</li> <li>4. Contrôler que les vannes de purge des capteurs de pression soient fermées</li> <li>5. Contrôler que la vanne bleue soit ouverte</li> <li>6. Bloquer le diviseur avec la poignée</li> <li>7. Connecter l'ordinateur de contrôle sur le wifi « HydroCE07 »</li> <li>8. Lancer l'exécutable « nom de l'exécutable » du banc avec le logiciel MicroPower</li> <li>9. Entrer les bonnes valeurs dans le Setup et appuyer sur restart pour confirmer les nouvelles entrées</li> <li>10. Ouvrir les vannes QMA2 à QMA6 et contrôler sur l'exécutable que toutes les conduites soient en bleu (indique que le circuit est correctement ouvert)</li> <li>11. Enclenchement des trois pompes sur l'armoire électrique des pompes</li> <li>12. Monter la pression dans le réservoir jusqu'à 1,5 bar afin de procéder à la purge des capteurs de pression</li> <li>13. Remettre le réservoir à pression atmosphérique</li> <li>14. Contrôler que le débit affiché par l'exécutable corresponde à celui de du débitmètre</li> </ol>
Résultats	-

Procédure 0.2 – Vidange du banc DN100	
Date	07.06.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Procédure de vidange du banc DN100
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31
Description	Décrire le processus de vidange du banc de test DN100 lorsque la température de l'eau est trop élevée
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Ne plus avoir de débit dans le circuit</li> <li>2. Contrôler que la vanne de trop plein soit ouverte</li> <li>3. Contrôler que la vanne de mise à pression atmosphérique soit ouverte</li> <li>4. Bloquer le diviseur avec la poignée</li> <li>5. Ouvrir la vanne EV11 (eau usée) en contrôlant que le niveau ne descende pas au-dessous de la conduite où se situe la veine (scotch noir)</li> <li>6. Faire tourner les pompes à bas régime (720 tr/min) pour mélanger l'eau du banc avec l'eau du réseau pendant le remplissage</li> <li>7. Ouvrir la vanne de remplissage EV14 depuis l'exécutable (bouton Cooling)</li> <li>8. Vérifier pendant le remplissage que la pression ne dépasse pas les 5 bars</li> <li>9. Fermer la vanne de remplissage EV14 lorsque le réservoir est rempli (scotch bleu)</li> <li>10. Arrêter les pompes</li> <li>11. Répéter la procédure afin de diminuer la température si la température de l'eau est toujours trop élevée</li> </ol>
Résultats	-

Procédure 3.1 – Montage de la lentille dans la veine	
Date	26.06.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Procédure de montage du profil de lentille de la vanne papillon
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31 Appareil photo Nikon D800
Description	Décrire la marche à suivre afin de monter correctement la lentille dans la veine de cavitation
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Coller l'accéléromètre sur l'arrière du profil (prendre une photo pour se souvenir du référentiel du capteur) dans la situation actuelle, les deux axes Y correspondent. L'axe Z du capteur correspond à l'axe X de la balance. L'axe X du capteur correspond à -Z de la balance.</li> <li>2. Graisser et mettre le joint sur dans la rainure du profil.</li> <li>3. Monter le profil sur la balance (détrompeur) et serrer les 6 vis de maintien (serrage au couple à <b>0.6 Nm</b>).</li> <li>4. Insérer le couvercle du profil à fleur de la veine (positionnement grâce au système à bille). Vérifier que le couvercle puisse tourner complètement.</li> <li>5. Insérer toute la partie arrière (balance, réducteur angulaire et profil). Positionnement garanti à l'aide des deux goupilles et serrage avec les 4 vis.</li> <li>6. Régler la position de la lentille dans la veine grâce au réducteur. La lentille doit être à fleur avec la paroi en plexiglas. Lorsque le positionnement est correct, serrer la vis qui empêche la rotation de la balance sur le réducteur.</li> <li>7. Connecter les câbles à la balance, attention au détrompeur.</li> <li>8. Remplir la veine en suivant le protocole 0.2</li> <li>9. Aligner le profil afin de trouver l'incidence de 0°. Utilisation de la caméra Nikon D800 et utiliser la grille afin de déterminer quand le profil est à 0°.</li> </ol>
Résultats	-

## 10.3 Protocoles de mesure

10.3.1 Protocole de mesure 3.2 – Paramètres limites

10.3.2 Protocole de mesure 3.3 – Calibration de la lentille d'une vanne papillon

10.3.3 Protocole de mesure 3.4 – Carte de cavitation

10.3.4 Protocole de mesure 3.5 – Test de répétabilité

10.3.5 Protocole de mesure 3.6 – Temps d'acquisition

10.3.6 Protocole de mesure 4.1 – Mesure pour  $\sigma$  constant et variation de l'incidence

10.3.7 Protocole de mesure 4.2 – Mesure pour l'incidence constante et variation de  $\sigma$

10.3.8 Protocole de mesure 4.3 – Mesure des efforts pour une ouverture et une fermeture complète de la vanne

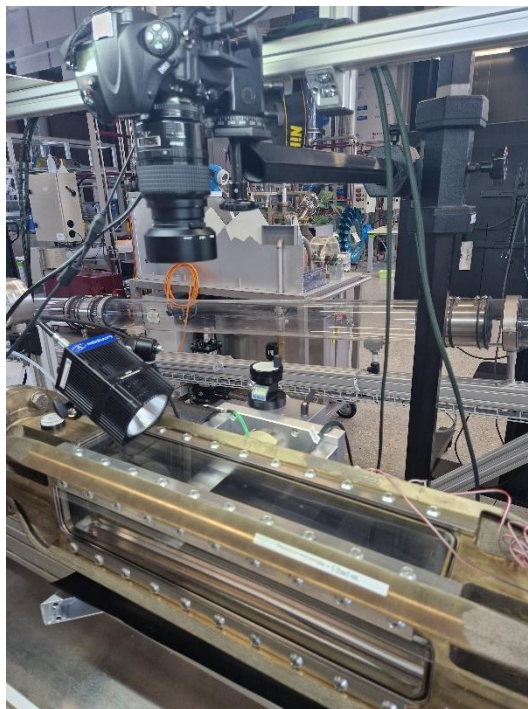
Protocole de mesure 3.2 – Paramètres limites	
Date	30.06.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Déterminer les paramètres limites (permettant une utilisation sans risque de dégâts) propre à la lentille de la vanne papillon.
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31
Description	Grâce à un calcul de résistance des vis de serrage du profil, il est possible de déterminer quel Moment Mx peut être supporté au maximum par les 6 vis de fixation du profil. Ensuite, il est question de déterminer pour quel débit on atteint cette valeur. Selon les calculs, le moment Mx maximal est de <b>100Nm</b> . Le test se fait avec l'incidence la plus critique (vanne fermée $\alpha=90^\circ$ ). Le principe est de réguler les pompes en vitesse de rotation et de tester plusieurs vitesses jusqu'à atteindre 100Nm de moment en Mx.
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suivre « Protocole_0.1_allumage_DN100 » pour l'allumage du banc de test</li> <li>2. Si la température de l'eau se trouve au-dessus de 25°C, appliquer le protocole de vidange « Protocole_0.2_vidange_DN100 » jusqu'à avoir une température qui se situe entre 15°C et 25°C.</li> <li>3. Mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>4. Mise à 0° de l'angle <math>\alpha</math>.</li> <li>5. Lancer la prise de mesure sur l'amplificateur avec la touche « Measure ».</li> <li>6. Réguler la vitesse des pompes à 720 rpm.</li> <li>7. Enregistrer les données du banc avec « Add sample » et prendre les forces mesurées par la balance</li> <li>8. Varier l'incidence jusqu'à 90° (vanne fermée) et attendre que la valeur du débit se stabilise. Attention au niveau de pression dans la veine qui ne doit pas dépasser les 4,5 bars.</li> <li>9. Enregistrer les données du banc avec « Add sample » et prendre les forces mesurées par la balance.</li> <li>10. Répéter les points 4 à 9 en augmentant les vitesses de rotation des pompes progressivement. Par exemple : 720rpm, 1000rpm, 1200rpm, 1400rpm... jusqu'à atteindre un moment Mx de <b>100Nm</b></li> <li>11. Remettre l'incidence du profil à 0°.</li> <li>12. Éteindre la veine (aucun débit).</li> </ol>
Résultats	Moment Mx maximal = 100Nm Résultantes Fx-Fy maximal = 800N Pression admissible maximal dans la veine = 4.5 bars Vitesse max dans la veine = 11.8 m/s Température = 15°C-25°C

Protocole de mesure 3.3 – Calibration de la lentille d'une vanne papillon	
Date	22.06.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Prise du polynôme à insérer sur LabView pour compenser la masse du profil de la lentille de la vanne papillon
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31
Description	La calibration vise à supprimer les forces engendrées par le déplacement du centre de masse lors de la rotation et également l'effet de la pression sur les différentes composantes de force / moment. Pour ce faire, la calibration est réalisée sur l'entier de la plage angulaire (-90° à +90°) ainsi que sur toute la plage de pression (-0.7 à +4.5 bars).
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suivre « Protocole_0.1_allumage_DN100 » pour l'allumage du banc de test</li> <li>2. Si la température de l'eau se trouve au-dessus de 25°C, appliquer le protocole de vidange « Protocole_0.2_vidange_DN100 » jusqu'à avoir une température qui se situe entre 15°C et 25°C.</li> <li>3. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit) ;</li> <li>4. Activation de l'acquisition sur l'amplificateur ;</li> <li>5. Dépressurisation de la veine jusqu'à -0.7 bar ;</li> <li>6. Acquisition pour les angles suivants : -90° à +90° par incrément de 10° (19 points sont enregistrés) ne pas oublier de changer la valeur de l'angle dans le soft banc ;</li> <li>7. Mise à l'atmosphère de la veine et arrêt de la mesure ;</li> <li>8. Les étapes 1 à 5 sont répétées pour des pressions de -0.7 à +4.5 bars par incrément de 0.5 bar. Les valeurs de pression suivante sont proposées (-0.7, -0.35, 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5, 4, 4.5).</li> <li>9. Traiter les valeurs dans MATLAB avec l'aide de la Curve Fitting Toolbox</li> <li>10. Trouver le polynôme pour <math>F_x</math>, <math>F_y</math>, <math>F_z</math> avec comme paramètre « alpha » et « M1 bar rel »</li> <li>11. Implémenter le polynôme dans LabView</li> <li>12. Répéter les points 1 à 8 afin de voir si le polynôme est correct (si <math>F_{xcorr}</math>, <math>F_{ycorr}</math>, <math>F_{zcorr}</math> sont tous égal à 0, le polynôme est correct). Acquisition pour les angles suivants : -90°, -45°, 0°, 45°, 90°. Acquisition pour les pressions suivantes : -0.35, 0, 1, 2, 3, 4.</li> </ol>
Résultats	

Protocole de mesure 3.4 – Carte de cavitation	
Date	06.07.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Création de la carte de cavitation afin de représenter de façon qualitative les régions où les divers régimes de cavitation apparaissent.
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31 Appareil photo Nikon D800
Description	Fixer le profil à une certaine incidence et faire varier le nombre de cavitation en jouant avec le niveau de pression $H_s$ . Le but est de commencer l'acquisition où la cavitation n'est pas présente et de diminuer le sigma afin de connaître le type de cavitation pour chaque incidence et chaque sigma. Après avoir balayer plusieurs incidences, il est possible de tracer la carte de cavitation.
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suivre « Protocole_0.1_allumage_DN100 » pour l'allumage du banc de test</li> <li>2. Si la température de l'eau se trouve au-dessus de 25°C, appliquer le protocole de vidange « Protocole_0.2_vidange_DN100 » jusqu'à avoir une température qui se situe entre 15°C et 25°C.</li> <li>3. Installation de la prise d'image depuis le coté de la veine [Figure 1].</li> <li>4. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>5. Lancer la mesure</li> <li>6. Fermer la vanne de vidange et de mise à l'atmosphère.</li> <li>7. Pressuriser le réservoir en aval à une valeur <math>H_s</math> de 2 bars</li> <li>8. Réguler la vitesse de l'écoulement dans la veine à 9,56 m/s (correspond à un Reynolds de 500'000).</li> <li>9. Régler l'incidence <math>\alpha</math> à 20°</li> <li>10. Si la cavitation est déjà présente, augmenter la pression <math>H_s</math>. (Attention, ne pas dépasser les 4.5 bars dans la veine)</li> <li>11. Acquisition de données et prise d'image depuis le coté de la veine. Indiquer le type de cavitation présent dans la veine.</li> <li>12. Diminuer la pression <math>H_s</math> de façons à balayer toute la plage de <math>\sigma</math>. Le but est d'avoir au moins 10 points par incidence. Acquisition de donnée et d'image pour chaque <math>\sigma</math>.</li> <li>13. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>14. Répéter les étapes 4 à 13 pour les incidences suivantes : 15° ; 13.8° ; 12.5° ; 15° ; 11.2° ; 10° ; 5° ; 0°</li> <li>15. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>16. Répéter les étapes 4 à 15 en changeant la disposition de la prise d'image afin de prendre des photos depuis le dessus du profil [Figure 2].</li> <li>17. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> </ol>
Résultats	-



*Figure 1 : Setup pour la prise d'image depuis le coté*



*Figure 2 : Setup pour la prise d'image depuis le dessus*

Protocole de mesure 3.5 – Test de répétabilité	
Date	20.07.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis – Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.R102
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Marche à suivre afin de vérifier lors de chaque changement sur la veine et le soft de mesure que les mesures restent identiques et cohérentes
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31
Description	Reprendre les mêmes points que pour la définition de l'angle limite selon un certain Reynolds effectué avant la carte de cavitation. Comparer les points et déterminer si les résultats sont pareils.
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suivre « Protocole_0.1_allumage_DN100 » pour l'allumage du banc de test</li> <li>2. Si la température de l'eau se trouve au-dessus de 25°C, appliquer le protocole de vidange « Protocole_0.2_vidange_DN100 » jusqu'à avoir une température qui se situe entre 15°C et 25°C.</li> <li>3. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>4. Lancer la mesure</li> <li>5. Réguler la vitesse de l'écoulement dans la veine à 3,82 m/s.</li> <li>6. Régler l'incidence du profil à 55°.</li> <li>7. Acquisition de donnée.</li> <li>8. Mise à zéro de l'angle alpha.</li> <li>9. Réguler la vitesse de l'écoulement dans la veine à 5,73 m/s.</li> <li>10. Régler l'incidence du profil à 45°.</li> <li>11. Acquisition de donnée.</li> <li>12. Mise à zéro de l'angle alpha.</li> <li>13. Réguler la vitesse de l'écoulement dans la veine à 7,64 m/s.</li> <li>14. Régler l'incidence du profil à 38,5°.</li> <li>15. Acquisition de donnée.</li> <li>16. Mise à zéro de l'angle alpha.</li> <li>17. Réguler la vitesse de l'écoulement dans la veine à 9,56 m/s.</li> <li>18. Régler l'incidence du profil à 33°</li> <li>19. Acquisition de donnée.</li> <li>20. Mise à zéro de l'angle alpha.</li> <li>21. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>22. Importer les données et les comparer avec les mesures de référence</li> </ol>
Résultats	-

Protocole de mesure 3.6 – Temps d’acquisition	
Date	25.07.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d’Ingénierie, Laboratoire d’hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Déterminer le temps d’acquisition qui permet de faire converger les résultats
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d’acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d’acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d’acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31
Description	La démarche consiste à prendre des points de mesure dans les 4 type de cavitation (sans cavitation, cavitation poche, cavitation de cisaillement et supercavitation). Il est question de tester plusieurs temps d’acquisition (1s, 2s, 5s et 10s) en gardant la même fréquence d’acquisition de 2048 Hz. Le but est de comparer les moyennes et écarts type pour chaque temps d’acquisition et déterminer le meilleur temps d’acquisition afin de garantir de bons résultats.
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suivre « Protocole_0.1_allumage_DN100 » pour l’allumage du banc de test</li> <li>2. Si la température de l’eau se trouve au-dessus de 25°C, appliquer le protocole de vidange « Protocole_0.2_vidange_DN100 » jusqu’à avoir une température qui se situe entre 15°C et 25°C.</li> <li>3. Mise à zéro de l’angle alpha, mise à l’atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>4. Lancer la mesure</li> <li>5. Fermer la vanne de mise à l’atmosphère et la vanne de trop plein.</li> <li>6. Pressuriser le réservoir en aval à une valeur <math>H_s</math> de 2 bars.</li> <li>7. Réguler la vitesse de l’écoulement dans la veine à 9.56 m/s (<math>Re = 500000</math>).</li> <li>8. Régler l’incidence du profil à 5°.</li> <li>9. Jouer avec le niveau de pression <math>H_s</math> afin d’avoir un <math>\sigma = 5.3</math></li> <li>10. Acquisition de donnée pour ce point avec les temps suivants : 1s, 2s, 5s et 10s. prendre 3 mesures pour chaque temps. Toujours garder un <math>\sigma</math> constant de 5.3</li> <li>11. Mise à zéro de l’angle alpha, mise à l’atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>12. Répéter les étapes 3 à 10 pour les combinaisons d’angle et de <math>\sigma</math> suivants : 10° et <math>\sigma = 3.1</math>, 15° et <math>\sigma = 4.5</math>, 20° et <math>\sigma = 2.4</math></li> <li>13. Mise à zéro de l’angle alpha, mise à l’atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> </ol>
Résultats	-

Protocole de mesure 4.1 – Mesure pour $\sigma$ constant et variation de l'incidence	
Date	21.07.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Déterminer l'influence du type de cavitation sur la portance, la trainée et le moment sur la lentille de la vanne papillon.
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31
Description	Il est prévu de fixer $\sigma$ à une certaine valeur et ensuite de faire varier l'incidence $\alpha$ . Une prise de mesure est faite de sorte que le profil ne cavite pas pour chaque incidence. Ensuite, il est question de répéter le processus de mesure, mais cette fois en passant par des régimes cavitant. Le but étant de comparer les données avec et sans cavitation pour déterminer son influence sur le profil.
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Suivre « Protocole_0.1_allumage_DN100 » pour l'allumage du banc de test</li> <li>2. Si la température de l'eau se trouve au-dessus de 25°C, appliquer le protocole de vidange « Protocole_0.2_vidange_DN100 » jusqu'à avoir une température qui se situe entre 15°C et 25°C.</li> <li>3. Mise à zéro de l'angle <math>\alpha</math>, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>4. Lancer la mesure</li> <li>5. Fermer la vanne de mise à l'atmosphère et la vanne de trop plein.</li> <li>6. Pressuriser le réservoir en aval à une valeur <math>H_s</math> de 2 bars.</li> <li>7. Réguler la vitesse de l'écoulement dans la veine à 9.56 m/s (<math>Re = 500000</math>).</li> <li>8. Jouer avec le niveau de pression <math>H_s</math> afin d'avoir un <math>\sigma = 6.7</math></li> <li>9. Balayer les 9 incidences suivantes : 0°-2.5°-5°-7.5°-10°-12.5°-15°-17.5°-20°. Acquisition de donnée pour chacune de ces incidences. Toujours garder un <math>\sigma</math> constant de 6.7</li> <li>10. Mise à zéro de l'angle <math>\alpha</math>, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>11. Répéter les étapes 3 à 10 pour les <math>\sigma</math> suivants : 4 – 2.4</li> <li>12. Mise à zéro de l'angle <math>\alpha</math>, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> </ol>
Résultats	-

Protocole de mesure 4.2 – Mesure pour l'incidence constante et variation de $\sigma$	
Date	06.07.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Déterminer l'influence du type de cavitation sur la portance, la trainée et le moment sur la lentille de la vanne papillon.
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31 Appareil photo Nikon D800
Description	<p>Le protocole est le même que celui de la carte de cavitation car les points utilisés sont les mêmes.</p> <p>Fixer le profil à une certaine incidence et faire varier le nombre de cavitation en jouant avec le niveau de pression <math>H_s</math>. Le but est de commencer l'acquisition où la cavitation n'est pas présente et de diminuer le sigma afin de connaître le type de cavitation pour chaque incidence et chaque sigma. Après avoir balayer plusieurs incidences, il est possible de tracer la carte de cavitation.</p>
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>Suivre « Protocole_0.1_allumage_DN100 » pour l'allumage du banc de test</li> <li>Si la température de l'eau se trouve au-dessus de 25°C, appliquer le protocole de vidange « Protocole_0.2_vidange_DN100 » jusqu'à avoir une température qui se situe entre 15°C et 25°C.</li> <li>Installation de la prise d'image depuis le coté de la veine [Figure 1].</li> <li>Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>Lancer la mesure</li> <li>Fermer la vanne de vidange et de mise à l'atmosphère.</li> <li>Pressuriser le réservoir en aval à une valeur <math>H_s</math> de 2 bars</li> <li>Réguler la vitesse de l'écoulement dans la veine à 9,56 m/s (correspond à un Reynolds de 500'000).</li> <li>Régler l'incidence <math>\alpha</math> à 20°</li> <li>Si la cavitation est déjà présente, augmenter la pression <math>H_s</math>. (Attention, ne pas dépasser les 4.5 bars dans la veine)</li> <li>Acquisition de données et prise d'image depuis le coté de la veine. Indiquer le type de cavitation présent dans la veine.</li> <li>Diminuer la pression <math>H_s</math> de façons à balayer toute la plage de <math>\sigma</math>. Le but est d'avoir au moins 10 points par incidence. Acquisition de donnée et d'image pour chaque <math>\sigma</math>.</li> <li>Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>Répéter les étapes 4 à 13 pour les incidences suivantes : 15° ; 13.8° ; 12.5° ; 15° ; 11.2° ; 10° ; 5° ; 0°</li> <li>Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>Répéter les étapes 4 à 15 en changeant la disposition de la prise d'image afin de prendre des photos depuis le dessus du profil [Figure 2].</li> <li>Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> </ol>
Résultats	-

<b>Protocole de mesure 4.3 – Mesure des efforts pour une ouverture et une fermeture complète de la vanne</b>	
Date	26.07.2023
Lieu	HES-SO Valais-Wallis - Haute Ecole d'Ingénierie, Laboratoire d'hydraulique 23.RI02
Testeur	Rittiner Robin
Objet du test	Mesurer les efforts vus par la lentille lors de la fermeture et l'ouverture complète de la vanne. Constater aussi l'influence de la cavitation.
Appareils et capteurs utilisés	Banc de test DN100 Profil de la lentille 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A Kistler Charge Amplifier Type 5080A Kistler Système d'acquisition de données NI cDAQ-9174 National Instruments Carte d'acquisition NI 9223 National Instruments Logiciel d'acquisition LabView Débitmètre électromagnétique Proline Promag 53 HART Capteur de pression Deltabar M PMD55 HART Capteur de pression OPTIBAR DP 7060 KROHNE Capteur de température Easytemp TMR31
Description	Il est prévu de réguler le banc en fonction de la hauteur de chute. Ensuite, l'incidence de la lentille est modifiée afin de représenter une ouverture et une fermeture complète de la vanne. Il est prévu de tester deux hauteurs de chutes différentes ( $H = 2\text{bar}$ et $1\text{bar}$ ) ainsi que plusieurs niveaux de pression dans le réservoir en aval ( $H_s = 2\text{bar}$ , $0\text{bar}$ et $-0.4\text{bar}$ ).
Exécution	<ol style="list-style-type: none"> <li>Suivre « Protocole_0.1_allumage_DN100 » pour l'allumage du banc de test</li> <li>Si la température de l'eau se trouve au-dessus de <math>25^\circ\text{C}</math>, appliquer le protocole de vidange « Protocole_0.2_vidange_DN100 » jusqu'à avoir une température qui se situe entre <math>15^\circ\text{C}</math> et <math>25^\circ\text{C}</math>.</li> <li>Mise à zéro de l'angle <math>\alpha</math>, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>Lancer la mesure</li> <li>Fermer la vanne de mise à l'atmosphère et la vanne de trop plein.</li> <li>Pressuriser le réservoir en aval à une valeur <math>H_s</math> de <math>2\text{bars}</math>.</li> <li>Lancer les pompes en régulation par vitesse de pompe à <math>1000\text{ rpm}</math> (selon 3.2_limite).</li> <li>Régler l'incidence du profil à <math>90^\circ</math>.</li> <li>Passer en régulation en fonction de la hauteur de chute <math>H = 1\text{bars}</math>.</li> <li>Balayer les 22 incidences suivantes : <math>90^\circ</math>-<math>87.5^\circ</math>-<math>85^\circ</math>-<math>82.5^\circ</math>-<math>80^\circ</math>-<math>70^\circ</math>-<math>60^\circ</math>-<math>50^\circ</math>-<math>40^\circ</math>-<math>30^\circ</math>-<math>24^\circ</math>-<math>24^\circ</math>-<math>30^\circ</math>-<math>40^\circ</math>-<math>50^\circ</math>-<math>60^\circ</math>-<math>70^\circ</math>-<math>80^\circ</math>-<math>82.5^\circ</math>-<math>85^\circ</math>-<math>87.5^\circ</math>-<math>90^\circ</math>. Acquisition de donnée pour chacune de ces incidences. Prendre des photos pour chaque incidence. <b>Attention à ne pas dépasser la pression admise de 5 bars dans la veine.</b></li> <li>Mise à zéro de l'angle <math>\alpha</math>, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>Répéter les étapes 3 à 10 avec une pression dans le réservoir <math>H_s = 0\text{bar}</math> et <math>H_s = -0.4\text{bar}</math>.</li> <li>Mise à zéro de l'angle <math>\alpha</math>, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</li> <li>Lancer la mesure</li> <li>Fermer la vanne de mise à l'atmosphère et la vanne de trop plein.</li> <li>Pressuriser le réservoir en aval à une valeur <math>H_s</math> de <math>2\text{bars}</math>.</li> <li>Lancer les pompes en régulation par vitesse de pompe à <math>1300\text{ rpm}</math> (selon 3.2_limite).</li> <li>Régler l'incidence du profil à <math>90^\circ</math>.</li> <li>Passer en régulation en fonction de la hauteur de chute <math>H = 2\text{bars}</math>.</li> <li>Balayer les 18 incidences suivantes : <math>90^\circ</math>-<math>87.5^\circ</math>-<math>85^\circ</math>-<math>82.5^\circ</math>-<math>80^\circ</math>-<math>70^\circ</math>-<math>60^\circ</math>-<math>50^\circ</math>-<math>40^\circ</math>-<math>40^\circ</math>-<math>50^\circ</math>-<math>60^\circ</math>-<math>70^\circ</math>-<math>80^\circ</math>-<math>82.5^\circ</math>-<math>85^\circ</math>-<math>87.5^\circ</math>-<math>90^\circ</math>. Acquisition de donnée pour chacune de ces</li> </ol>

	<p>incidences. Prendre des photos pour chaque incidence. <b>Attention à ne pas dépasser la pression admise de 5 bars dans la veine.</b></p> <p>21. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</p> <p>22. Répéter les étapes 13 à 21 avec une pression dans le réservoir <math>H_s = 0\text{ bar}</math> et <math>H_s = -0.4\text{ bar}</math>.</p> <p>23. Mise à zéro de l'angle alpha, mise à l'atmosphère, veine éteinte (aucun débit).</p>
Résultats	-

## 10.4 Liste des capteurs

Liste des capteurs détaillée - TB - Influence de la cavitation sur une lentille de vanne - mai 2023

#	#LbV	Variable (symbole)	Variable enregistrée	Chassis NI	Carte NI	Carte Spec	Canal physique	Fréq. acq.	Période acq.
1		Pression absolue M1	M1	cRIO 9074	9203	AI ±20mA	cRIO/Mod4/ai1	50 Hz	4 s
2		Pression absolue M4	-	cDAQ 9174	9203	AI ±20mA	cDAQ2/Mod3/ai1	1000 Hz	4 s
3		Pression différentielle H	H	cRIO 9074	9203	AI ±20mA	cRIO/Mod4/ai5	50 Hz	4 s
4		Pression différentielle Hs	Hs	cRIO 9074	9203	AI ±20mA	cRIO/Mod4/ai3	50 Hz	4 s
5		Débit total Q	Q	cRIO 9074	9203	AI ±20mA	cRIO/Mod4/ai0	50 Hz	4 s
6		Température Tw	Tw						
7		Accélération X,Y,Z	Ax, Ay, Az	cDAQ 9174	9234	AI ±5V	ai0/ai1/ai2	2048 Hz	2 s
8		Force Fx, Fy, Fz	Fx, Fy, Fz	cDAQ 9174	9223	AI ±10V	ai0/ai1/ai2	1000 Hz	2 s
9		Moment Mx, My, Mz	Mx, My, Mz	cDAQ 9174	9223	AI ±10V	ai4/ai0/ai1	1000 Hz	2 s

TB - Influence de la cavitation sur les efforts supportés par une lentille d'une vanne papillon  
Rittiner Robin

Liste des capteurs détaillée - TB - Influence de la cavitation sur une lentille de vanne - mai 2023

Filtre	Range	Sensitivity	lex	Sortie	Capteur	Type	N° de série
	0...20 bar			4-20 mA	Pression absolue	Endress+Hauser Cerabar T	F70DE701052
	0...20 bar			4-20 mA	Pression absolue	Endress+Hauser Cerabar T	K610AE0152
	0...16 bar			4-20 mA	Pression différentielle	Endress+Hauser Deltabar M	PMD55-KAE3/0
	0...5 bar			4-20 mA	Pression différentielle	BAS NO. EX 95D2444	FCX-CII-5110626
	0...130 m3/h			4-20 mA	Débitmètre électromagnétique	Endress+Hauser Promag W	KB1B3B19000
	-50...150 °C			4-20 mA	Capteur de température compact	Endress+Hauser TMR31	F70206042BA
	± 50 g			2-20 mA	Accéléromètre	Kistler 8688A50	5741973
	-5...10 kN				Balance 6-axis Force/Moment Type 9306A	Kistler	5214120
					Balance 6-axis Force/Moment Type 9306A	Kistler	5214120

## 10.5 Certificats de calibration et fiches techniques

10.5.1 Balance

10.5.2 Accéléromètre

10.5.3 Amplificateur

## 6-Axis Force/Moment Sensor

Type 9306A, 9306A31

The 6 Axis Force/Moment Sensor measures all forces and the corresponding moments on the three orthogonal axis. All forces and moments are captured as physical, piezoelectric signals and do not need to be calculated. The unique measurement setup of Kistlers multi-axis force/moment sensor allows an extremely small and compact design. Therefore concise models of 3-dimensional dynamic and quasi-static processes are possible even in narrow installations.

- Very wide measuring range
- Large frequency range
- Easy installation with numerous centering options
- Stainless, sealed sensor case
- Robust multipole connector (one connector each for forces and torques)

### Description

Pretensioned piezoelectric 6-Axis Force/Moment Sensor with two mounting flanges. Measures forces and reaction torques in both tensile and compression directions.

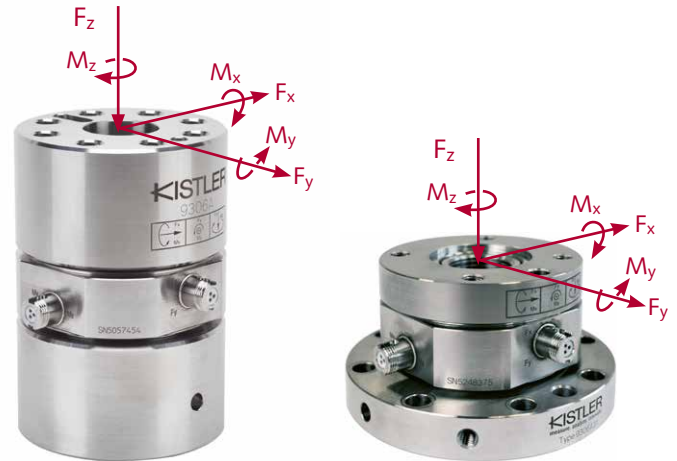
A force or reaction torque generates a proportional electrical charge. This is transferred by an electrode to the corresponding connector.

The multi-axis force/moment sensor consists of large-area quartz discs and is therefore very rigid. The resulting high natural frequency is a prerequisite for high dynamic force and torque measurements.

The two 3-pole V3 neg. connectors are provided with an anti-twist lock. One connector each for force and torque signals. After it has been correctly installed the 6-axis force/moment sensor is immediately ready for use without recalibration.

### Application

- Forces and moments during inspection of springs and damping elements
- Dynamic force and moment measurements during inspection of prostheses
- Forces and torques during the product inspection
- Dynamic forces and torques on objects in the wind tunnel
- Forces and torques during assembly processes with robots



### Technical data (Tref = 25 °C)

			9306A	9306A31
Shear forces range (as vector) <sup>1)</sup>	$\vec{F}_x, \vec{F}_y$	kN	-5 ... 5	-1 ... 1
Force range <sup>1)</sup>	$F_z$	kN	-5 ... 10	-2 ... 2
Reaction torque range (as vector) <sup>1)</sup>	$\vec{M}_x, \vec{M}_y, \vec{M}_z$	Nm	±200	±100
Overload	$F_x, F_y, F_z$	%	10	20
Force calibrated range <sup>2)</sup> (force application point 46.2 mm below cover plate surface, without moments)	$\vec{F}_x, \vec{F}_y$ $F_z$	kN	±10 ±30	±4 ±4
Moment calibrated range (force-free) <sup>2)</sup>	$\vec{M}_x, \vec{M}_y, \vec{M}_z$	Nm	±400	±100
Force threshold	$F_x, F_y, F_z$	N	<0.01	<0.01
Reaction torque threshold	$M_x, M_y, M_z$	Nm	<0.0002	<0.0002
Force sensitivity	$F_x, F_y$	pC/N	≈-7.3	≈-6.9
	$F_z$	pC/N	≈-3.6	≈-3.7
Reaction torque sensitivity	$M_x, M_y$	pC/Nm	≈-255	≈-265
	$M_z$	pC/Nm	≈-225	≈-205
Axial stiffness	$C_z$	N/μm	≈3.600	≈5.400
Lateral stiffness	$C_{Lxy}$	N/μm	≈250	≈900

<sup>1)</sup> All load combinations possible ( $F_x, F_y$  on cover-plate surface,  $F_z$  central)

<sup>2)</sup> Considerably higher forces and moments are permitted for individual loading ( $F_x, F_y$  and  $M_x, M_y$  as vector)

**Additional technical data** (T<sub>ref</sub> = 25 °C)

			9306A	9306A31
Force linearity, inclusive hysteresis	$F_x, F_y, F_z$	%FSO	$\leq \pm 0.5$	$\leq \pm 1.5$
Moment linearity, inclusive hysteresis	$M_x, M_y, M_z$	%FSO	$\leq \pm 1$	$\leq \pm 1.5$
Crosstalk	$F_z \rightarrow F_x, F_y$	%FSO	$\leq \pm 2^{1)}$	$\leq \pm 2^{3)}$
	$F_x \leftrightarrow F_y$	%FSO	$\leq \pm 2.5^{1)}$	$\leq \pm 2^{3)}$
	$F_x, F_y \rightarrow F_z$	%FSO	$\leq \pm 3.5^{2)}$	$\leq \pm 4^{3)}$
Natural frequency	$f_n (F_x, F_y, F_z)$	kHz	$\approx 18$	$\approx 13$
	$f_n (M_x, M_y, M_z)$	kHz	$\approx 11$	$\approx 11$
Operating temperature range		°C	-40 ... 80	-40 ... 80
Insulation resistance		$\Omega$	$> 10^{12}$	$> 10^{12}$
Ground isolation		$\Omega$	$> 10^8$	$> 10^8$
Connector, 2 x			V3 neg.	V3 neg.
Weight		kg	1.5	0.54

1) FSO: 20 kN

2) FSO: 60 kN

3) FSO: 8 kN

**Measurement range Type 9306A**

Different maximum values are permitted depending on the combination of forces  $F_x, F_y, F_z$  and reaction torques  $M_x, M_y, M_z$ :

$F_s = \vec{F_x, F_y}$ [kN]	Force application point (relating to cover-plate surface)	High shear forces ( $F_x, F_y$ )	Large ( $F_z$ )	High bending moments ( $M_x, M_y$ )	High torque ( $M_z$ )
	(az = 45 mm)	<b><math>\pm 21</math></b>	$\pm 14$	$\pm 12$	$\pm 3$
	(az = 0 mm)	<b><math>\pm 9</math></b>	$\pm 2.5$	$\pm 1$	$\pm 1.5$
	(az = -40 mm)	<b><math>\pm 4.5</math></b>	$\pm 1$	$\pm 0.5$	$\pm 1$
$F_z$ [kN]		$\pm 5$	<b><math>\pm 40</math></b>	$\pm 5$	$\pm 5$
$M_b$ [N·m]		$\pm 50$	$\pm 50$	<b><math>\pm 400</math></b>	$\pm 50$
$M_z$ [N·m]		$\pm 100$	$\pm 100$	$\pm 100$	<b><math>\pm 400</math></b>

Table 1 : Permitted loads Type 9306A

**Measurement range Type 9306A31**

Different maximum values are permitted depending on the combination of forces  $F_x, F_y, F_z$  and reaction moments  $M_x, M_y, M_z$ :

$F_s = \vec{F_x, F_y}$ [kN] Select one of the proposals	Force application point (relating to cover-plate surface)	High shear forces ( $F_x, F_y$ )	High axial forces ( $F_z$ )	High bending moments ( $M_x, M_y$ )	High torque moments ( $M_z$ )
	(az = 22.5 mm)	<b><math>\pm 8</math></b>	$\pm 2$	$\pm 1$	$\pm 1$
	(az = 0 mm)	<b><math>\pm 5.5</math></b>	$\pm 1.5$	$\pm 1$	$\pm 1$
	(az = -40 mm)	<b><math>\pm 3.5</math></b>	$\pm 1$	$\pm 1$	$\pm 0.5$
$F_z$ [kN]		$\pm 2$	<b><math>\pm 20</math></b>	$\pm 2$	$\pm 2$
$M_b \vec{M_x, M_y}$ [N·m]		$\pm 20$	$\pm 50$	<b><math>\pm 300</math></b>	$\pm 20$
$M_z$ [N·m]		$\pm 20$	$\pm 50$	$\pm 20$	<b><math>\pm 140</math></b>

Table 2 : Permitted loads Type 9306A31

**Mounting**

The two contact surfaces of the component that transfer the forces and reaction torques to the 6-axis force/moment sensor must be flat, rigid and clean.

The sensor can be secured from the outside with eight M8 screws.

Alignment and orientation is needed for exact measurement of the forces and reaction torques. The following options exist:

- Internal diameter 22 mm with centering ring
- External diameter 62 mm
- Pin hole 5H7
- Oblong hole 5H7

Intermediate adapters are available for installation from one side (e.g. from the front).

Dimensions of 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A

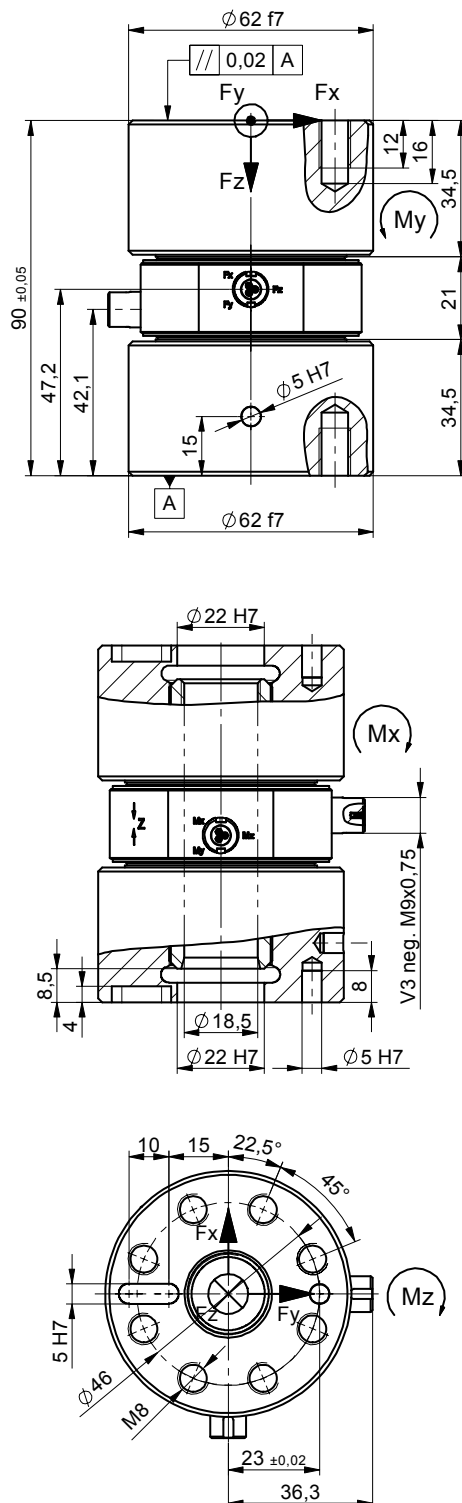


Fig. 1: Dimensions of the 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A

Dimensions of 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A31

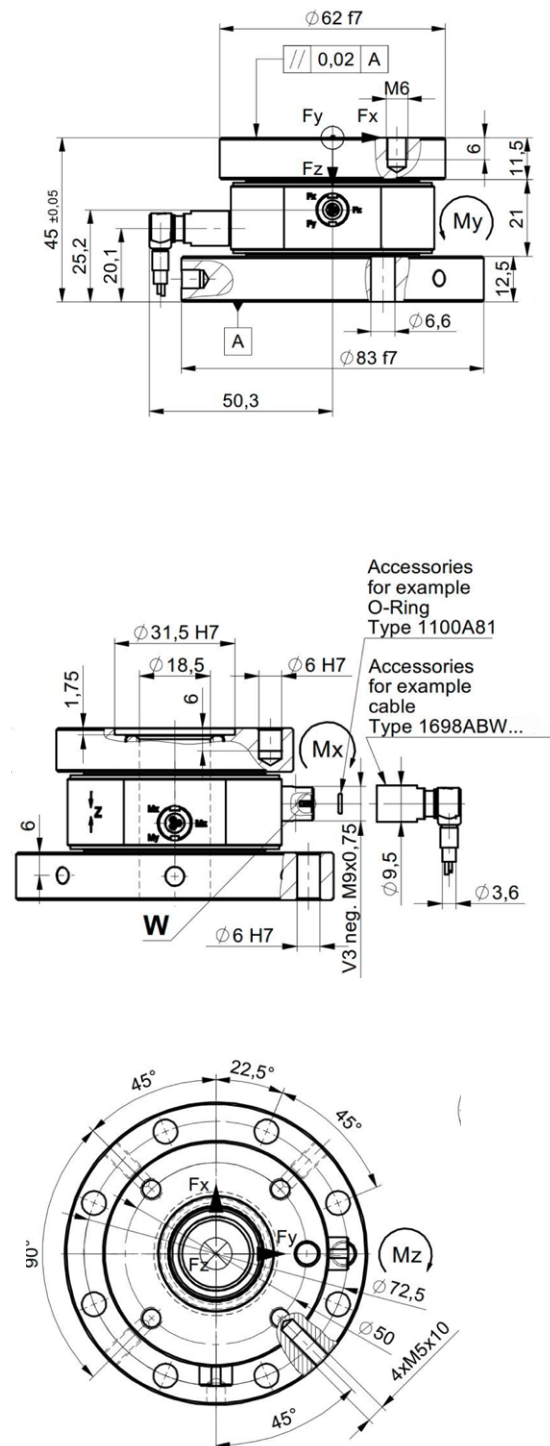


Fig. 2: Dimensions of the 6-Axis Force/Moment Sensor Type 9306A31

9306\_003-290e-02.20

### Force application

If possible, the resulting force vector should pass through the center of the sensor. Eccentric force application creates a moment loading on the sensor. This is only permitted up to the specified values. The maximum force and torque ranges must be reduced correspondingly.

In particular the bending moments  $M_x$ ,  $M_y$  must be observed. The resulting bending moments are calculated as follows:

$$M_x = F_y \cdot (a_z M_x - (-a_z)) + F_z \cdot a_y$$

$$M_y = -F_x \cdot (a_z M_y - (-a_z)) - F_z \cdot a_x$$

Any force-free torques must also be considered.

### Application

Type 9306A multi-axis force/moment sensor is built-in with the top side flushmounted in the wind tunnel. The high stiffness and resolution allow measurement of small and high dynamic effects such as vortex formation.

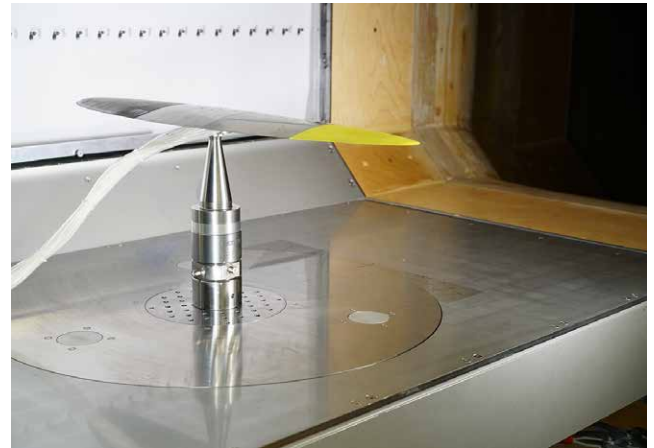


Fig. 3: Type 9306A in the ZHAW wind tunnel (before installation)

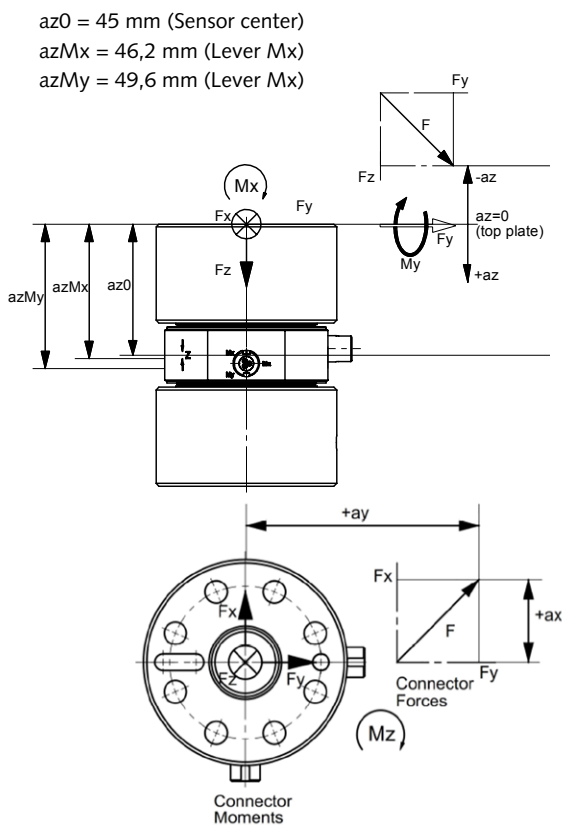


Fig. 4: Description of Type 9306A lever arms

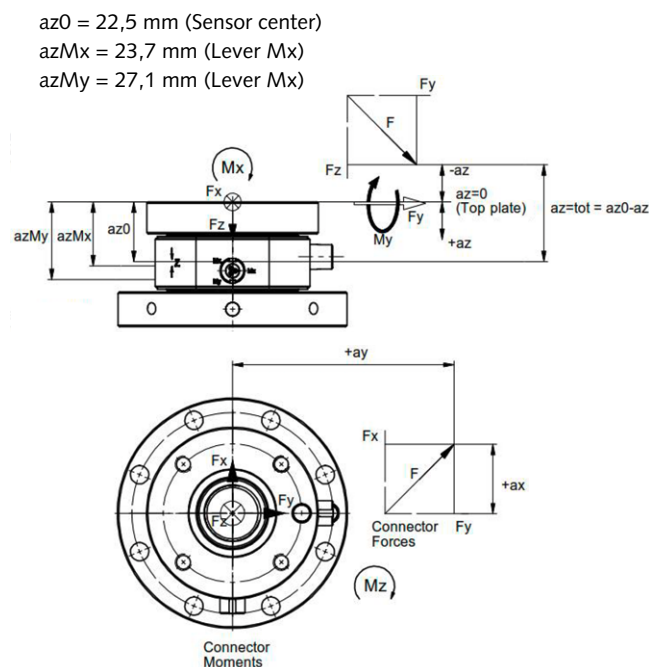


Fig. 5: Description of Type 9306A31 lever arms

## Measuring chain with 6-Axis Force/Moment Sensor

Output Signal	Cable	Cable Properties	Length [m] min max	Temp. Range	IEC/EN 60529	Connector Sensor	Connector Amplifier	IEC/EN 60529	Channels									
									5030A	5039A	5073A...	5074A...	5877B...	5015A...	5018A...	5080A...	5165A...	5167A...
separate 3	1698AA...	PFA synthetic braiding	0.2 20	-40...120°C	Plug screwed	IP65	3x BNC pos.	IP40	1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698AH...	PFA synthetic braiding	0.5 20				3x SMC neg.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698AF...	TPC black Ø3.6mm	0.5 20				3x Mini Coax neg.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698AE...	PFA synthetic braiding	0.2 20				3x KIAG 10-32 neg.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698AK...	TPC black Ø3.6mm	0.5 20			IP68	Fischer 9-pole pos.	IP65	1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698AL...	TPC black Ø3.6mm	0.5 20				3x KIAG 10-32 neg.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698AM...	PFA, steel braiding	0.3 10				Fischer 9-pole pos.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698AB...	TPC black Ø3.6mm	0.5 20				Fischer 9-pole pos.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698AI...	PFA, steel braiding	0.3 10				Fischer 9-pole pos.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698ABW...	TPC, Ø3.6mm, Y-Cable	0.5 20				Fischer 9-pole pos.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698ABB...	TPC, Ø3.6mm, Y-Cable	0.5 20				Fischer 9-pole pos.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698ABW...	TPC, Ø3.6mm, Y-Cable	0.5 20				Fischer 9-pole pos.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698ABB...	TPC, Ø3.6mm, Y-Cable	0.5 20				Fischer 9-pole pos.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8
	1698ABB...	TPC, Ø3.6mm, Y-Cable	0.5 20				Fischer 9-pole pos.		1	1	1-4	1-4	1	1	1	1-8	1,4	4,8

Note: The information provided corresponds to the current state of knowledge. Information subject to change without notice.

Fig. 6: Measuring chain 9306A with cable and charge amplifier

### Signal processing

6 charge amplifier channels are needed for the complete measuring system. They convert the measurement signal into electrical voltage. The measured value is exactly proportional to the applied force or torque.

Type 5167A80... and Type 5080A... multichannel charge amplifiers were built specifically for multi-component force sensors.

Type 5080A... is ideal for measuring very small forces and is characterized by its extremely low noise level.

Type 5167A80... offers voltage output as well as digital data (Ethernet interface).

### Included accessories

- Centering ring D 22 (2 x)
- Cylindrical pin D5 x 12 (2 x)

### Optional accessories

- Connecting cable 3-core
- Connecting Y-cable 2x 3-core

### Ordering code

- 6-Axis Force/Moment Sensor  
D 62x90 mm, ±5kN / ±200 N·m
- 6-Axis Force/Moment Sensor  
D 62x45 mm, ±1kN / ±100 N·m

### Type

1698A...  
1698AB...

### Type

9306A  
9306A31



Fig. 7: Multichannel charge amplifier Type 5167A80... and Type 5080A...

# Kalibrierschein Calibration Certificate

Type **Kistler 9306A**

Serial No. **5214120**

Bearbeiter Calibration Technician	Datum Date
F. Marsel	17. Jul. 2019

Referenzgeräte Reference Equipment	Typ Type	Serien Nr. Serial No.
Gebrauchsnormale Working Standard	Kistler Z20738-130	1612504
	Kistler Z20738-130	1612532
	Kistler Z20738-130	1612524
	Kistler Z20738-130	1612533
	Kistler Z20738-130	1612511
	Kistler Z20738-130	1612522
Präzisionskalibrator Precision Calibrator	Kistler 5395A	1490902

Umgebungstemperatur Ambient Temperature	Relative Feuchte Relative Humidity
23°C	48%

## Messergebnisse Results of Measurement

### Hauptrichtungen Main Components

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	Empfindlichkeit Sensitivity	Linearität <sup>1)</sup> Linearity <sup>1)</sup>	CMC <sup>2)</sup> CMC <sup>2)</sup>
kN	pC / N	±%FSO	%
Fx -10 ... 10	-7,341	0,03	0,31
Fy -10 ... 10	-7,378	0,03	0,31
Fz -30 ... 30	-3,735	0,06	0,54

1) Linearität einschliesslich Hysterese  
linearity including hysteresis

2) Die angegebene erweiterte Messunsicherheit (CMC) ist die kombinierte Standardmessunsicherheit multipliziert mit einem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  und stellt die Kalibrier- und Messfähigkeit der Kalibriereinrichtung am zugeordneten Messpunkt des Kalibrierbereiches dar.  
The reported expanded uncertainty of measurement (CMC) is stated as the combined standard uncertainty multiplied by a coverage factor  $k = 2$  and represents the calibration and measuring capability of the calibration system at the assigned measuring point of the calibration range.

Messverfahren Measurement Procedure	Kontinuierliche Kalibrierung, Vergleichsverfahren Continuous Calibration, Comparison Method
--	--

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstelltoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards. The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

Seite Page 1 / 2

Kistler Instrumente GmbH  
Umberto-Nobile-Str. 14 Tel. +49 7031 3090 0  
D-71063 Sindelfingen Fax +49 7031 3090 980  
Info.de@kistler.com

Geschäftsführung: Rolf A. Sonderegger, Claudio Valeri, Dr. Thomas Wagner  
HRB 210182 Amtsgericht Stuttgart  
ISO 9001 certified

www.kistler.com

## Kalibrierschein Calibration Certificate

Serial No. 5214120  
Date 17. Jul. 2019

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	Empfindlichkeit Sensitivity	Linearität <sup>1)</sup> Linearity <sup>1)</sup>	CMC <sup>2)</sup> CMC <sup>2)</sup>
N·m	pC / N·m	±%FSO	%
Mx -400 ... 400	-256,2	0,06	0,71
My -400 ... 400	-262,1	0,04	0,71
Mz -400 ... 400	-226,9	0,02	0,21

1) Linearität einschliesslich Hysterese  
linearity including hysteresis

2) Die angegebene erweiterte Messunsicherheit (CMC) ist die kombinierte Standardmessunsicherheit multipliziert mit einem Erweiterungsfaktor  $k = 2$  und stellt die Kalibrier- und Messfähigkeit der Kalibriereinrichtung am zugeordneten Messpunkt des Kalibrierbereiches dar.  
The reported expanded uncertainty of measurement (CMC) is stated as the combined standard uncertainty of measurement multiplied by a coverage factor  $k = 2$  and represents the calibration and measuring capability of the calibration system at the assigned measuring point of the calibration range.

Messverfahren Kontinuierliche Kalibrierung, Vergleichsverfahren  
Measurement Procedure Continuous Calibration, Comparison Method

### Übersprechen Crosstalk

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	→Fx %FSO	→Fy %FSO	→Fz %FSO	→Mx %FSO	→My %FSO	→Mz %FSO
kN						
Fx -10 ... 10		0,6	-0,1			
Fy -10 ... 10	0,4		-0,1			
Fz -30 ... 30	0,1	-0,1		-0,348	0,571	0,528

Kalibrierter Bereich Calibrated Range	→Fx %FSO	→Fy %FSO	→Fz %FSO	→Mx %FSO	→My %FSO	→Mz %FSO
N·m						
Mx -400 ... 400	-0,05	0,11	0,14		-1,5	0,3
My -400 ... 400	-0,06	0,05	0,19	0,0		0,2
Mz -400 ... 400	-0,20	0,01	-0,25	0,2	0,2	

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards. The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

Seite Page 2 / 2

Kistler Instrumente GmbH

Umberto-Nobile-Str. 14 Tel. +49 7031 3090 0  
D-71063 Sindelfingen Fax +49 7031 3090 980  
Info.de@kistler.com

Geschäftsführung: Rolf A. Sonderegger, Claudio Valeri, Dr. Thomas Wagner  
HRB 210182 Amtsgericht Stuttgart  
ISO 9001 certified

www.kistler.com

## 10.5.2 Accéléromètre

# Miniature PiezoBeam® Accelerometer

Type 8688A...

## Light Weight, IEPE Triaxial TEDS Accelerometer

World Patent: W0/2007/062532  
European Patent: 2006790940  
U.S. Patent: 12088325

Type 8688A... is a high sensitivity triaxial accelerometer that simultaneously measures vibration in three orthogonal axes. The sensor is designed primarily for modal analysis applications and has selective use as a general purpose vibration sensor.

- IEPE,  $\pm 5$  g,  $\pm 10$  g, and  $\pm 50$  g ranges
- Smallest PiezoBeam triaxial with lowest mass
- Low cost, miniature and lightweight triaxial
- High sensitivity, low noise and high dynamic range
- Choice of ranges and sensitivities
- Ground Isolated Mounts
- TEDS Option
- Conforming to CE

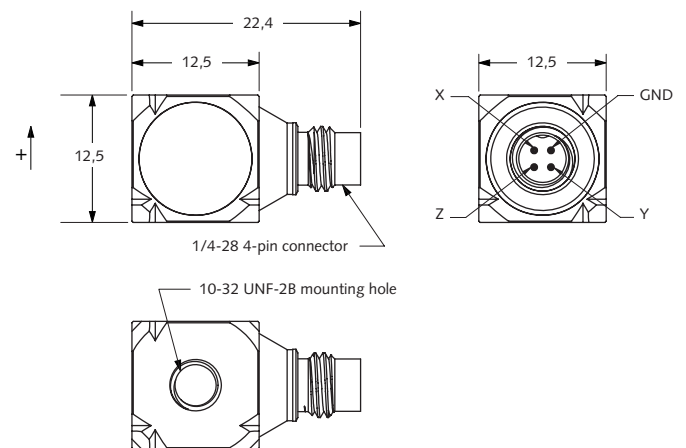
### Description

Internal to the PiezoBeam accelerometer is a unique sensing element consisting of a ceramic beam supported by a center post that when bending occurs as a result of being subjected to vibration, the cantilevered beam element yields an electrical charge. The charge signal is converted by the internal low noise charge amplifier to a proportional high level voltage signal at an output impedance of less than 500 ohms. Patented methods are used to thermally compensate the sensing element.

Type 8688A... is a miniature and lightweight triaxial accelerometer which reduces mass loading on thin-walled structures important to multichannel modal applications or general vibration measurements.

Type 8688A... triaxial accelerometers, have an integral 4-pin connector and is designed for easy installation in confined areas where sensor may be mounted on any of three faces. Type 8688A... has welded titanium housing and is ground isolated when mounted with the mounting clip or adhesive mounting adapter. The sensing element design provides outstanding amplitude and phase response over a wide frequency range.

The accelerometer operates directly from the internal power source found in most FFT analyzers, from several Kistler Piezotron® power supply couplers or any industry standard IEPE (Integrated Electronic Piezo Electric) compatible power source.



### Application

This miniature and light weight, triaxial accelerometer series is ideally suited for multiple channel modal analysis on small components or subsystems and well as full vehicle testing for aviation, space, automotive as well as a wide range of general test structures.

### Accessing TEDS Data

Accelerometers with a "T" suffix are variants of the standard version incorporating the "Smart Sensor" design (PiezoSmart®). Viewing an accelerometer's data sheet requires an Interface/Coupler such as Kistler's Type 5134B... or Type 5000M04 with TEDS Editor software. The Interface provides negative current excitation (reverse polarity) altering the operating mode of the PiezoSmart sensor allowing the program editor software to read or add information contained in the memory chip.

8688A\_000-843e-03.10

## Technical Data

Specification	Unit	Type 8688A5 Type 8688A5T	Type 8688A10 Type 8688A10T	Type 8688A50 Type 8688A50T
Acceleration range	g	±5	±10	±50
Acceleration limit	gpk	±8	±16	±80
Threshold (1 ... 10 kHz)	grms	0,00014	0,00016	0,00036
Sensitivity (±10 %)	mV/g	1 000	500	100
Resonant frequency mounted, nom.	kHz	15	15	25
Frequency response (±5 %)	Hz	0,5 ... 3 000	0,5 ... 3 000	0,5 ... 5 000
Phase shift <5°	Hz	2 ... 3 000	2 ... 3 000	2 ... 5 000
Amplitude non-linearity	%FSO	±1	±1	±1
Time constant nom.	s	1,1	1,1	1,1
Transverse sensitivity typ. (max 3 %)	%	1,5	1,5	1,5
<b>Environmental</b>				
Base strain sensitivity @ 250 µε	g/µε	0,004	0,004	0,004
Random vibration max.	grms	50	50	100
Shock limit (1 ms pulse)	gpk	7 000	7 000	10 000
Temperature coeff. of sensitivity	%/°C	0,17	0,23	0,23
Operating temperature range	°C	-40 ... 55	-40 ... 65	-40 ... 65
<b>Output</b>				
Bias nom.	VDC	13	13	13
Impedance	Ω	≤100	≤100	≤100
Voltage Full Scale	V	±5	±5	±5
<b>Power Supply</b>				
Voltage	VDC	22 ... 30	22 ... 30	22 ... 30
Constant current	mA	2 ... 20	2 ... 20	2 ... 20
<b>Construction</b>				
Sensing element	Type	PiezoBeam	PiezoBeam	PiezoBeam
Housing/base	material	Titanium	Titanium	Titanium
Sealing housing/ connector (EN 60529)	Type	IP 68	IP 68	IP 68
Connector	Type	1/4-28, 4-pin (pos.)	1/4-28, 4-pin (pos.)	1/4-28, 4-pin (pos.)
Ground isolated		with accessory	with accessory	with accessory
Mass	grams	6,7	6,7	6,5
Mounting	Type	wax, adhesive, Clip, magnet, stud (10-32 UNF-2B)	wax, adhesive, Clip, magnet, stud (10-32 UNF-2B)	wax, adhesive, Clip, magnet, stud (10-32 UNF-2B)
Mounting torque, stud	N·m	0,7	0,7	0,7

1 g = 9,80665 m/s<sup>2</sup>, 1 Inch = 25,4 mm, 1 Gramm = 0,03527 oz, 1 lbf-in = 0,113 N·m

## Mounting

The cube shape configuration of the triaxial accelerometer allows for the sensor to be attached to the test surface using any available side with wax, adhesive and/or tape. The off-ground mounting clip can be used in three sensor orientations for mounting flexibility. The primary mounting surface also has a 10-32 UNF threaded hole which is compatible with ground isolated screw-on mounting accessories. Namely, an adhesive mounting base and a magnetic mounting base. The specified frequency response is unaffected when the adhesive mounting base or magnetic mounting base is used. When the ground isolated mounting clip is used, the upper frequency limits are as follows:

- Without grease 1 kHz ( $\pm 5\%$ ) for all ranges
- With grease 3 kHz ( $\pm 5\%$ ) for 5g and 10g ranges
- With grease 4 kHz ( $\pm 5\%$ ) for the 50g range.

Reliable and accurate measurements require that the mounting surface be clean and flat. The instruction manual for the Type 8688A... series provides detailed information regarding mounting surface preparation.



Fig. 1: Mounting accessories

## Accessories Included

- Ground isolated mounting clip
- Ground isolated adhesive mounting base
- Mounting wax

## Type

800M155  
800M157  
8432

## Optional Accessories

- Magnetic mounting base

## Type

800M159

## Optional Cables

- Teflon® jacketed breakout cable – ¼-28 4-pin (neg.) to 3x BNC (pos.)
- Flexible silicone jacketed breakout cable – ¼-28 4-pin (neg.) 3x BNC (pos.)

## Type

1756B...  
1734A...

## Ordering Key

Type 8688A

## Measuring range

$\pm 5$ g	5
$\pm 10$ g	10
$\pm 50$ g	50

## TEDS Templates / Variants

Standard	–
Default, IEEE 1451.4 V0.9 Template 0 (UTID 1)	T
IEEE 1451.4 V0.9 Template 24 (UTID 116225)	T01
LMS Template 117, Free format Point ID	T02
LMS Template 118, Automotive Format (Field 14 Geometry = 0)	T03
LMS Template 118, Aerospace Format (Field 14 Geometry = 1)	T04
P1451.4 v1.0 template 25 – Transfer Function Disabled	T05
P1451.4 v1.0 template 25 – Transfer Function Enabled	T06






Measure	Connect	Amplify	Output	Analyze
 Type 8688... Low impedance IEPE	 Type 1756B... or Type 1734A... 4-pin neg. 3x BNC pos.	 Type 51... Power supply / signal conditioner	 Type 1511 BNC pos. BNC pos.	 not supplied

Fig. 2: Measuring chain

Teflon® is a registered trademark of DuPont

Page 3/3

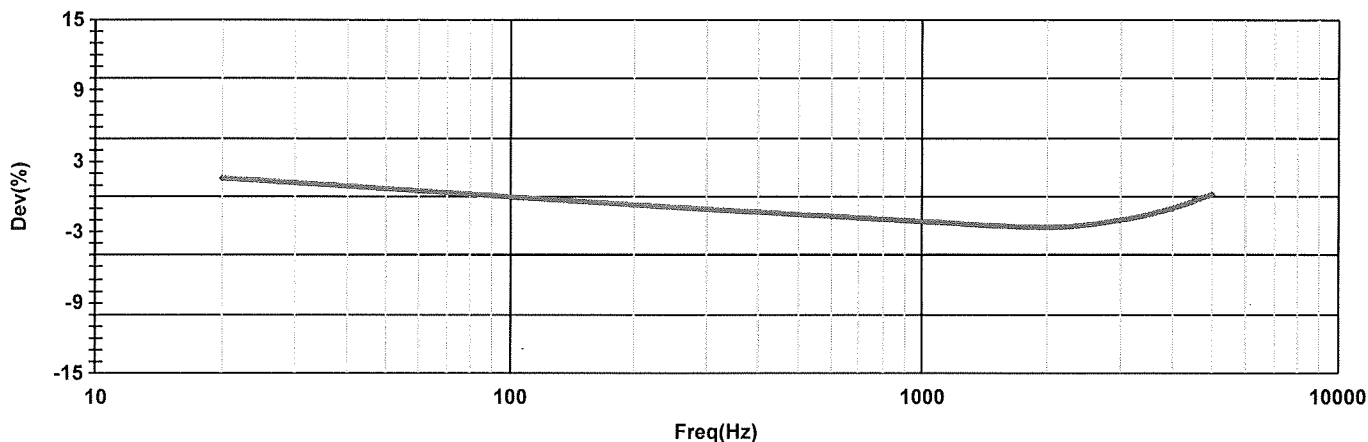
This information corresponds to the current state of knowledge. Kistler reserves the right to make technical changes. Liability for consequential damage resulting from the use of Kistler products is excluded.

©2010, Kistler Group, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Switzerland  
Tel. +41 52 224 11 11, Fax +41 52 224 14 14, info@kistler.com, www.kistler.com  
Kistler is a registered trademark of Kistler Holding AG.

**KALIBRIERSCHEIN**  
**BESCHLEUNIGUNGSSENSOR**

**CALIBRATION CERTIFICATE**  
**ACCELEROMETER**

Typ / Type	8688A50	Hersteller / Manufacturer	Kistler		
Serien-Nr / Serial Number	5741973	Cert ID # / Cert ID #	41-5741973-200729T1406		
Bereich	Range	g	$\pm 50$		
Max. Bereich	Max. Range	g	$\pm 80$		
Betriebstemperaturbereich	Temp. Range, operating	°C	-40 bis 65		
Ausgangsimpedanz	Output Impedance	$\Omega$	$\leq 100$		
			X Achse	Y Achse	Z Achse
Zeitkonstante	Time Constant	s	1,2	1,2	1,2
Ruhe Spannung	Bias Voltage	V <sub>OC</sub>	14,0	13,6	14,3
Resonanzfrequenz montiert (fn)	Mounted Resonant Frequency (fn)	kHz	25,0	25,0	25,0
Seitenempfindlichkeit	Transverse Sensitivity	%	3,0	3,0	3,0
Typischer Frequenzgang	Typical Frequency Response				



Empfindlichkeit bei 159 Hz, 3,0g rms	Sensitivity at 159 Hz, 3,0 g rms	mV/g	X Achse 102,1	Y Achse 102,4	Z Achse 104,4	$g = g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
Umgebungstemperatur	Environmental Temperature	°C	$22 \pm 4$			
Relative Feuchte	Relative Humidity	%	$30 \pm 30$			
Kalibriert von	Calibration Technician		Mark Thomas			
Datum	Calibration Date		29.07.2020			

Dieser Sensor ist gemäss Kistler Testprozedur 978-5473-701 kalibriert worden, unter Verwendung einer Vergleichstechnik nach Kistler Arbeitsnormen. Kistler Arbeitsnormen werden periodisch mit einem primären Standardsystem abgeglichen, welches seinerseits periodisch mit dem National Institute of Standards and Technology (NIST) oder anderen anerkannten nationalen Standards in Einklang gebracht wird. Messungen werden von anerkannten Werten physikalischer Konstanten abgeleitet, gemäss dem International System of Units (SI). Diese Kalibrierung erfüllt oder übersteigt die Anforderungen von ISO 9001:2015, ANSI/NCSL Z540-1-1994 (R2002), und entspricht ISO/IEC 17025:2017, verifiziert durch das ANSI-ASQ National Accreditation Board/ANAB. Siehe Zertifizierung AC-1117. Die geschätzte Ungenauigkeit beträgt  $\pm 0.84\%$  der gemessenen Werte gegenüber dem primären Standard. Zertifizierungen sind bei Kistler dokumentiert und können schriftlich angefordert werden. Dieses Zertifikat kann nicht ohne schriftliches Einverständnis von Kistler Instrumente AG, und nur in seiner Gesamtheit, reproduziert werden. *This sensor was calibrated per Kistler test procedure 978-5473-701 using a comparison technique against a Kistler working standard. Kistler working standards are periodically calibrated against a primary standard system, which in turn is periodically recertified to the National Institute of Standards and Technology (NIST) or another recognized national standard. Measurements are derived from accepted values of natural physical constants according to the International System of Units (SI). This calibration meets or exceeds the requirements of ISO 9001:2015, ANSI/NCSL Z540-1-1994 (R2002), and is accredited to ISO/IEC 17025:2017 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ANAB. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is  $\pm 0.84\%$  of reading with respect to the primary standard. Certificates are on file at Kistler and may be requested in writing. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval of Kistler Instrument Corporation.*

Referenz Geräte/Reference	Hersteller/Mfg.	Typ/Type	Serien-Nr/SN	Referenz Geräte/Reference	Hersteller/	Typ/Type	Serien-Nr/SN
Beschleunigungs-Sensor/Accel.(GN)	Kistler	8076K	C148323	Multimeter/Multimeter (UUT)	HP	34401A	3146A65537
Ladungsverstärker/Charge Amp.(GN)	Kistler	5020	C93919	Multimeter/Multimeter (Std)	HP	34401A	3146A65544
Beschleunigungs-Sensor/Accel.(BN)	Kistler	8002K	C139113	Funktionsgenerator/Function Gen.	Wavetek	270	D91050465
Ladungsverstärker/Charge Amp. (BN)	Kistler	5020	C92253	Ladungsverstärker/Charge Amp.(UUT)	Kistler	5010	C72053

GN = Gebrauchsnorm/Working Standard, BN = Bezugsnorm/Primary Standard, UUT = Funktionsgenerator / Unit Under Test, Std = Normal / Standard

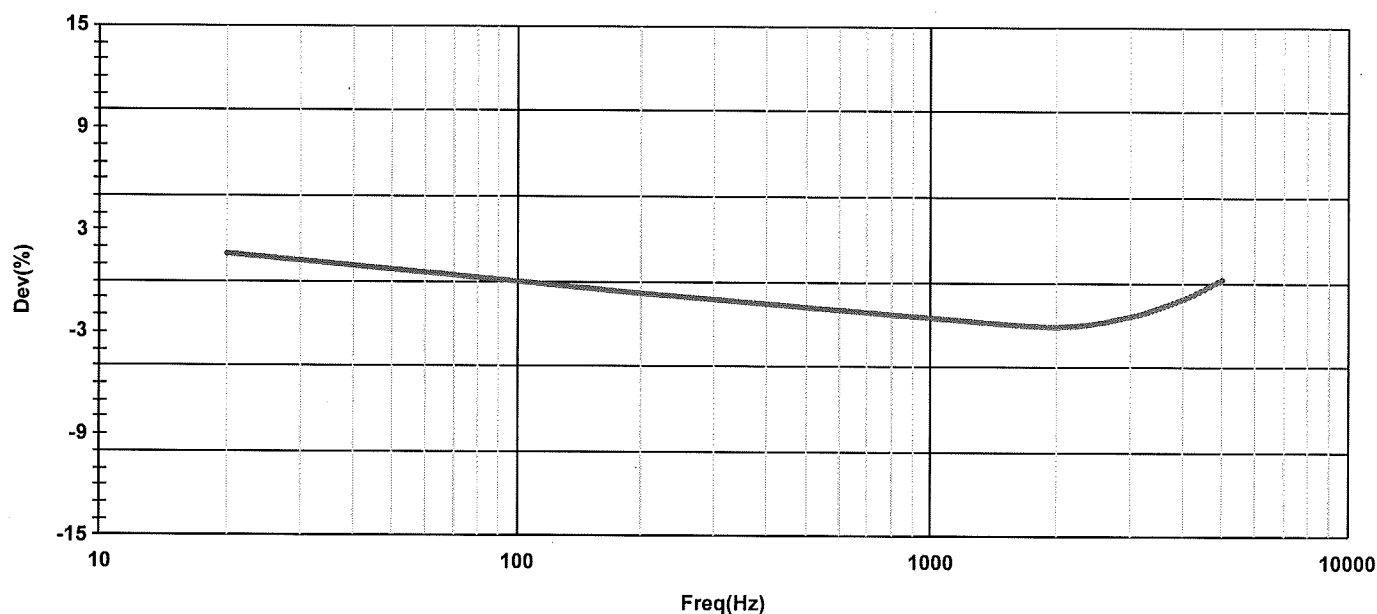
## ACCELERATION CALIBRATION CERTIFICATE

Type	8688A50			Manufacturer	Kistler		
Serial Number	5741973			Certificate ID #	41-5741973-200729T1406		
	X Axis	Y Axis	Z Axis		X Axis	Y Axis	Z Axis
Time Constant	sec. 1.2	1.2	1.2	Mounted Resonant Freq.(nom)	kHz 25.0	25.0	25.0
Bias Voltage	V <sub>DC</sub> 14.0	13.6	14.3	Transverse Sensitivity	% 3.0	3.0	3.0

### Reference Specifications

Range	g	± 50	Temp. Range, operating	°C	-40 to 65
Max Range	g	± 80	Output Impedance	Ω	≤100

### Frequency Response (Typical for Each Axis)



		X Axis	Y Axis	Z Axis		
Sensitivity at 100 Hz, 3.0 g rms	mV/g	102.6	102.9	104.8		
Sensitivity at 159 Hz, 3.0 g rms	mV/g	102.1	102.4	104.4		
Environmental Temperature	°C	22 ± 4		Condition	New	
Relative Humidity	%	30 ± 30		NIST Test Report Number	684/292867-19	
Calibration Date		7/29/2020		Calibration Technician:	Mark Thomas	

This sensor was calibrated per Kistler test procedure 978-5473-701 using a comparison technique against a Kistler working standard. Kistler working standards are periodically calibrated against a primary standard system, which in turn is periodically recertified to the National Institute of Standards and Technology (NIST) or another recognized national standard. Measurements are derived from accepted values of natural physical constants according to the International System of Units (SI). This calibration meets or exceeds the requirements of ISO 9001:2015, ANSI/NCSL Z540-1-1994 (R2002), and is accredited to ISO/IEC 17025:2017 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ANAB. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is ± 0.84% of reading with respect to the primary standard. Certificates are on file at Kistler and may be requested in writing. This certificate shall not be reproduced, except in full, without written approval of Kistler Instrument Corporation.

Reference Equipment	Manufacturer	Type	Serial Number	Reference Equipment	Manufacturer	Type	Serial Number
Accelerometer (Working Std.)	Kistler	8076K	C148323	Multimeter (Standard)	HP	34401A	3146A65537
Charge Amplifier (Working Std.)	Kistler	5020	C93919	Multimeter (Test)	HP	34401A	3146A65544
Accelerometer (Primary Std.)	Kistler	8002K	C139113	Function Generator	Wavetek	270	D91050465
Charge Amplifier (Primary Std.)	Kistler	5020	C92253	Charge Amplifier (Test)	Kistler	5010	C72053

Haute école valaisanne  
Haute Ecole d'Ingénierie (HEI)  
Cédric Clivaz  
Rte du Rawyl 47  
1950 Sion

### Certificate of Compliance

Date  
20.05.2021  
Purchase order item/date  
CLC\_F\_21143 / 12.05.2021  
Delivery item/date  
80692072 / 26.05.2021  
Order item/date  
531012 000010 / 19.05.2021  
Customer number  
1008541

Material: Our / Your reference  
18010953 8688A50 /

Serial No. 0005741973 / Quantity 1 PC

Condition: New

KISTLER INSTRUMENT CORPORATION hereby certifies all material used in the manufacturer of the specific instrumentation or part meets applicable terms, conditions and specifications of your purchase order.

KISTLER INSTRUMENT CORPORATION further certifies the test equipment used in calibration of your product is in conformance with the requirements of ANSI/NCSL Z540-1, ISO 9001 and ISO/IEC 17025. The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor  $k=2$  such that coverage probability corresponds to approximately 95 %.

Decision Rule: Calibration acceptance criteria is based on published product specifications, excluding calibration uncertainty.

Kistler is not accredited for the following tests:

For Vibration: Bias Voltage, Capacitance, Mounted Resonant Frequency, Time Constant and Transverse Sensitivity.

For Rotational Vibration: Mounted Resonant Frequency, Time Constant and Transverse Sensitivity.

For Charge: Capacitor, Deviation, Drift, Internal Calibration, Offset Voltage, Piezotron Current, Pot Linearity, Noise and Time Constant.

For Gain: Bias, Current Source, Filter Cutoff Frequency, Frequency Response, High-Pass Filter, Noise, Offset, Overload, Piezotron Current, System Test Amplitude and Time Constant.

For Dynamic Force: Bias Voltage and Time Constant.

For Impulse Force Hammer: None

For Static Force: Linearity.

For Absolute Pressure (single unit): Input Impedance, Output and Sensitivity.

For Absolute Pressure Systems: Amplifier Output (Before & After), Current Range (Before & After), Voltage Range (Before & After), and Zero(Before & After).

For Sinusoidal Pressure: Bias Voltage and Time Constant.

For Dynamic Pressure: Bias Voltage, Linearity and Time Constant.

For Static Pressure: Linearity.

For Pressure (Current) and Pressure (Voltage): Accuracy, Hysteresis, Non-Linearity, Repeatability and Temperature Performance Supply Voltage.

# Kalibrierschein

## Calibration Certificate

 Type **Kistler 5080A1060000** Serial No. **5612586**

Bearbeiter		Datum
Calibration Technician		Date
U. Schäffler		23. Jul. 2019
Referenzgeräte	Typ	Serie Nr.
Reference Equipment	Type	Serial No.
Ladungskalibrator		
Charge Calibrator	Kistler 5395	1258084
Umgebungstemperatur		Relative Feuchte
Ambient Temperature		Relative Humidity
°C		%
24		40

Geräteeinstellungen		
Instrument settings		
HP Filter	LP Filter	Ausgangsbereich FS
HP Filter	LP Filter	Output Range FS
	kHz	V
DC (Long)	1,0	± 10

Einschub Serie-Nr.		
Slide-In Unit Serial-No.		
1	5067A0	5586991
2	5067A0	5586992
3	5067A0	5586993
4	5067A0	5586994
5	5067A0	5586995
6	5067A0	5586996
7	---	
8	---	
9	5245A2	5583325

## Messergebnisse des 5245A2 Results of Measurement of 5245A2

Bereich	Abweichung						
Range	Deviation						
		Σ1	Σ2	Σ3	Σ4	Σ5	Σ6
Nullpunktabweichung							
Offset Voltage	mV	0,3	2,0	-0,3	-0,1	-1,3	1,5
Abweichung Ausgang							
Output Deviation	%	-0,01	0,00	-0,02	0,01	-0,02	0,01

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards. The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

Kistler Instrumente AG  
 Eulachstrasse 22  
 8408 Winterthur  
 Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11  
 Fax +41 52 224 14 14  
 info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732  
 Swift: ZKBK HZZ80A  
 Account: 1132-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8  
 VAT: 229 713  
 ISO 9001 certified

www.kistler.com

# Kalibrierschein Calibration Certificate

Type Kistler 5067A0 Serial No. 5586991

<b>Bearbeiter</b> Calibration Technician		<b>Datum</b> Date
U. Schäffler		23. Jul. 2019
<b>Referenzgeräte</b> Reference Equipment	<b>Typ</b> Type	<b>Serie Nr.</b> Serial No.
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395	1258084
<b>Umgebungstemperatur</b> Ambient Temperature		<b>Relative Feuchte</b> Relative Humidity
°C		%
24		40

<b>Geräteeinstellungen</b> Instrument settings		
<b>HP Filter</b> HP Filter	<b>LP Filter</b> LP Filter	<b>Ausgangsbereich FS</b> Output Range FS
	<b>kHz</b>	<b>V</b>
DC (Long)	1,0	± 10

## Messergebnisse Results of Measurement

<b>Nullpunktabweichung</b> Offset Voltage	<b>Measure Sprung (Bereich 10pC) Drift (Bereich 10pC)</b> Measure Jump (Range 10pC) Drift (Range 10pC)	
mV	mV	pC/s
-0,5	-0,8	0,004

<b>Bereichseinstellung</b> Range setting	<b>Abweichung Spannungsausgang Abweichung Anzeige</b> Voltage output error Readout error	
pC	% / FSO	% / FSO
2	0,01	
10	0,01	
28	0,00	
78	0,00	
217	0,01	
606	0,00	-0,34
1'691	0,00	
4'717	0,01	
13'160	-0,01	
36'720	0,01	
102'500	-0,01	
285'800	0,01	
797'400	0,00	
2'100'000	0,01	

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards. The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

Kistler Instrumente AG  
Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur  
Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11  
Fax +41 52 224 14 14  
info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732  
Swift: ZKBKCHZZ80A  
Account: 1132-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8  
VAT: 229 713  
ISO 9001 certified

www.kistler.com

# Kalibrierschein Calibration Certificate

Type Kistler 5067A0 Serial No. 5586992

<b>Bearbeiter</b> Calibration Technician		<b>Datum</b> Date
U. Schäffler		23. Jul. 2019
<b>Referenzgeräte</b> Reference Equipment	<b>Typ</b> Type	<b>Serie Nr.</b> Serial No.
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395	1258084
<b>Umgebungstemperatur</b> Ambient Temperature		<b>Relative Feuchte</b> Relative Humidity
°C		%
24		40

## Geräteeinstellungen

Instrument settings

<b>HP Filter</b> HP Filter	<b>LP Filter</b> LP Filter	<b>Ausgangsbereich FS</b> Output Range FS
	<b>kHz</b>	<b>V</b>
DC (Long)	1,0	± 10

## Messergebnisse Results of Measurement

### Nullpunktabweichung

Offset Voltage

mV

0,0

### Measure Sprung (Bereich 10pC) Drift (Bereich 10pC)

Measure Jump (Range 10pC)

Drift (Range 10pC)

mV

pC/s

-6,0

0,006

### Bereichseinstellung

Range setting

pC

2

10

28

78

217

606

1'691

4'717

13'160

36'720

102'500

285'800

797'400

2'100'000

### Abweichung Spannungsausgang Abweichung Anzeige

Voltage output error

Readout error

% / FSO

% / FSO

0,05

-0,02

0,01

-0,01

0,01

0,00

-0,30

-0,01

0,00

-0,01

0,01

-0,01

-0,01

0,01

0,01

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards.

The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

### Kistler Instrumente AG

Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur  
Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11  
Fax +41 52 224 14 14  
info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732  
Swift: ZKBKCHZZ80A  
Account: 1132-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8  
VAT: 229 713  
ISO 9001 certified

www.kistler.com

# Kalibrierschein Calibration Certificate

Type Kistler 5067A0 Serial No. 5586993

<b>Bearbeiter</b> Calibration Technician		<b>Datum</b> Date
U. Schäffler		23. Jul. 2019
<b>Referenzgeräte</b> Reference Equipment	<b>Typ</b> Type	<b>Serie Nr.</b> Serial No.
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395	1258084
<b>Umgebungstemperatur</b> Ambient Temperature		<b>Relative Feuchte</b> Relative Humidity
°C		%
24		40

## Geräteeinstellungen

Instrument settings

<b>HP Filter</b> HP Filter	<b>LP Filter</b> LP Filter	<b>Ausgangsbereich FS</b> Output Range FS
	kHz	V
DC (Long)	1,0	± 10

## Messergebnisse Results of Measurement

### Nullpunktabweichung

Offset Voltage

mV

0,2

### Measure Sprung (Bereich 10pC) Drift (Bereich 10pC)

Measure Jump (Range 10pC)

mV

-6,4

Drift (Range 10pC)

pC/s

0,006

### Bereichseinstellung

Range setting

pC

2

10

28

78

217

606

1'691

4'717

13'160

36'720

102'500

285'800

797'400

2'100'000

### Abweichung Spannungsausgang Abweichung Anzeige

Voltage output error

% / FSO

0,06

0,01

0,01

-0,01

0,01

0,00

0,00

0,01

0,01

0,00

0,01

-0,01

0,01

0,01

Readout error

% / FSO

-0,23

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards.

The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

### Kistler Instrumente AG

Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur  
Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11  
Fax +41 52 224 14 14  
info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732  
Swift: ZKBKCHZZ80A  
Account: 1132-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8  
VAT: 229 713  
ISO 9001 certified

www.kistler.com

# Kalibrierschein Calibration Certificate

Type Kistler 5067A0 Serial No. 5586994

Bearbeiter Calibration Technician		Datum Date
U. Schäffler		23. Jul. 2019
Referenzgeräte Reference Equipment	Typ Type	Serie Nr. Serial No.
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395	1258084
Umgebungstemperatur Ambient Temperature		Relative Feuchte Relative Humidity
°C		%
24		40

Geräteeinstellungen Instrument settings		
HP Filter HP Filter	LP Filter LP Filter	Ausgangsbereich FS Output Range FS
	kHz	V
DC (Long)	1,0	± 10

## MessergebnisseResults of Measurement

Nullpunktabweichung Offset Voltage	Measure Sprung (Bereich 10pC) Measure Jump (Range 10pC)	Drift (Bereich 10pC) Drift (Range 10pC)
mV	mV	pC/s
0,0	-5,6	0,007

Bereichseinstellung Range setting	Abweichung Spannungsausgang Voltage output error	Abweichung Anzeige Readout error
pC	% / FSO	% / FSO
2	-0,01	
10	-0,01	
28	0,00	
78	-0,01	
217	0,01	
606	0,00	-0,28
1'691	0,00	
4'717	0,00	
13'160	-0,01	
36'720	0,01	
102'500	0,00	
285'800	-0,01	
797'400	0,00	
2'100'000	-0,01	

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards. The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

**Kistler Instrumente AG**  
Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur  
Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11  
Fax +41 52 224 14 14  
info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732  
Swift: ZKBKC HZZ80A  
Account: 113 2-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8  
VAT: 229 713  
ISO 9001 certified

[www.kistler.com](http://www.kistler.com)

# Kalibrierschein Calibration Certificate

Type Kistler 5067A0 Serial No. 5586995

Bearbeiter Calibration Technician		Datum Date
U. Schäffler		23. Jul. 2019
Referenzgeräte Reference Equipment	Typ Type	Serie Nr. Serial No.
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395	1258084
Umgebungstemperatur Ambient Temperature		Relative Feuchte Relative Humidity
°C		%
24		40

Geräteeinstellungen Instrument settings		
HP Filter HP Filter	LP Filter LP Filter	Ausgangsbereich FS Output Range FS
	kHz	V
DC (Long)	1,0	± 10

## MessergebnisseResults of Measurement

Nullpunktabweichung Offset Voltage	Measure Sprung (Bereich 10pC) Measure Jump (Range 10pC)	Drift (Bereich 10pC) Drift (Range 10pC)
mV	mV	pC/s
0,9	-8,1	0,003

Bereichseinstellung Range setting	Abweichung Spannungsausgang Voltage output error	Abweichung Anzeige Readout error
pC	% / FSO	% / FSO
2	0,04	
10	-0,01	
28	0,00	
78	-0,01	
217	0,00	
606	0,01	-0,17
1'691	-0,01	
4'717	-0,01	
13'160	0,00	
36'720	0,01	
102'500	0,04	
285'800	0,04	
797'400	0,04	
2'100'000	0,04	

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstellertoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards. The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

Kistler Instrumente AG  
Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur  
Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11  
Fax +41 52 224 14 14  
info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732  
Swift: ZKBKCHZZ80A  
Account: 1132-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8  
VAT: 229 713  
ISO 9001 certified

www.kistler.com

# Kalibrierschein Calibration Certificate

Type Kistler 5067A0 Serial No. 5586996

<b>Bearbeiter</b> Calibration Technician		<b>Datum</b> Date
U. Schäffler		23. Jul. 2019
<b>Referenzgeräte</b> Reference Equipment	<b>Typ</b> Type	<b>Serie Nr.</b> Serial No.
Ladungskalibrator Charge Calibrator	Kistler 5395	1258084
<b>Umgebungstemperatur</b> Ambient Temperature		<b>Relative Feuchte</b> Relative Humidity
°C		%
24		40

<b>Geräteeinstellungen</b> Instrument settings		
<b>HP Filter</b> HP Filter	<b>LP Filter</b> LP Filter	<b>Ausgangsbereich FS</b> Output Range FS
	kHz	V
DC (Long)	1,0	± 10

## MessergebnisseResults of Measurement

<b>Nullpunktabweichung</b> Offset Voltage	<b>Measure Sprung (Bereich 10pC)</b> Measure Jump (Range 10pC)	<b>Drift (Bereich 10pC)</b> Drift (Range 10pC)
mV	mV	pC/s
0,0	-7,3	0,000

<b>Bereichseinstellung</b> Range setting	<b>Abweichung Spannungsausgang</b> Voltage output error	<b>Abweichung Anzeige</b> Readout error
pC	% / FSO	% / FSO
2	-0,04	
10	-0,01	
28	-0,01	
78	0,01	
217	0,01	
606	0,01	-0,27
1'691	0,00	
4'717	0,00	
13'160	0,00	
36'720	-0,01	
102'500	0,01	
285'800	0,01	
797'400	0,01	
2'100'000	0,01	

## Bestätigung Confirmation

Das oben durch die Seriennummer identifizierte Gerät entspricht der Vereinbarung der Bestellung und hält die Herstelltoleranzen gemäss den Spezifikationen der Datenblätter ein, sofern nicht anders auf dem Kalibrierschein vermerkt. Das Kistler Qualitätsmanagement System ist nach ISO 9001 zertifiziert. Das Dokument erfüllt die Anforderungen von EN 10204 Abnahmeprüfzeugnis "3.1". Die aufgeführten Referenzgeräte sind auf nationale Normale rückgeführt. Das Dokument wurde elektronisch erstellt und ist daher ohne Unterschrift gültig.

The equipment identified by Serial No. complies with the agreement of the order and meets the manufacturing tolerances specified in the data sheets, unless otherwise specified on the calibration certificate. The Kistler Quality Management System is certified per ISO 9001. This document fulfils the requirements of EN 10204 Inspection Certificate "3.1". The reference equipment is traceable to national standards. The document was issued electronically and is therefore valid without signature.

**Kistler Instrumente AG**  
Eulachstrasse 22  
8408 Winterthur  
Switzerland

Tel. +41 52 224 11 11  
Fax +41 52 224 14 14  
info@kistler.com

ZKB Winterthur BC 732  
Swift: ZKBKC HZZ80A  
Account: 113 2-0374.628

IBAN: CH67 0070 0113 2003 7462 8  
VAT: 229 713  
ISO 9001 certified

www.kistler.com

## 10.6 Feuilles Excel

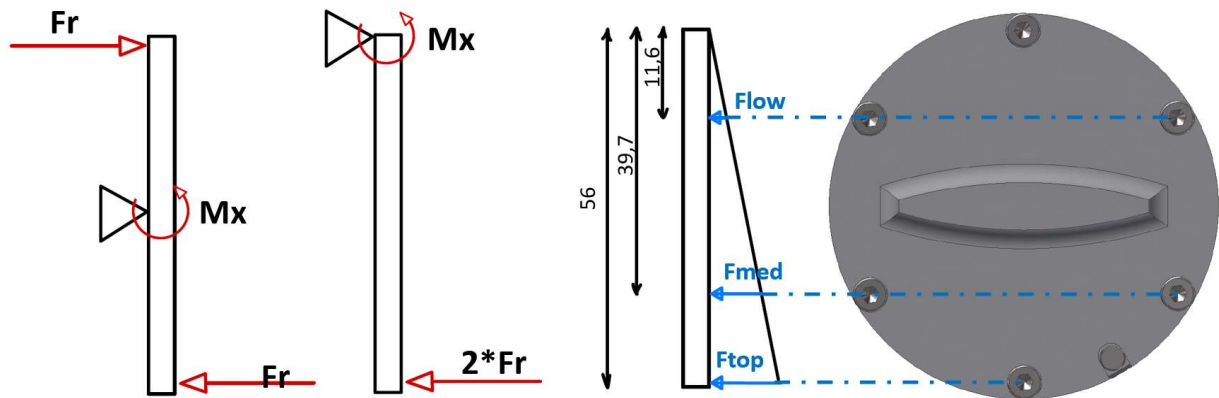
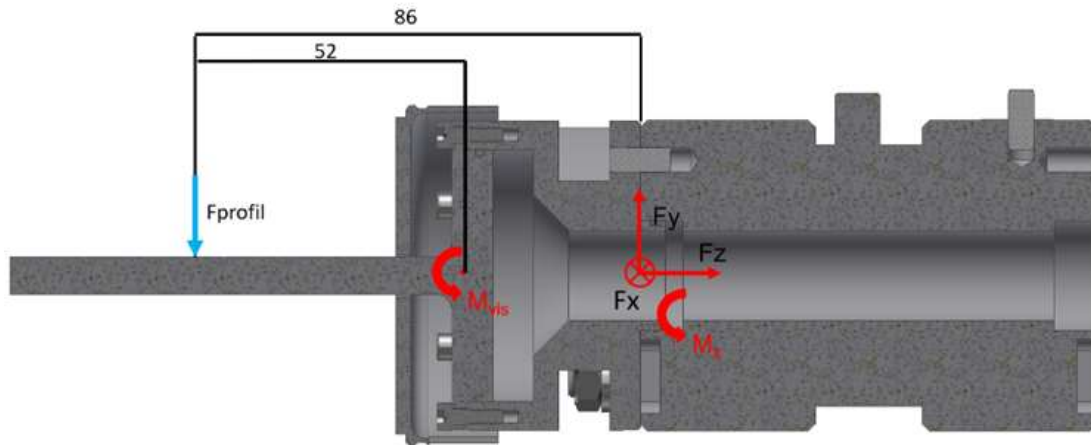
10.6.1 Calculs de résistance des vis

10.6.2 Calculs de pertes de charges

10.6.3 Validation de la calibration

10.6.4 Répétabilité

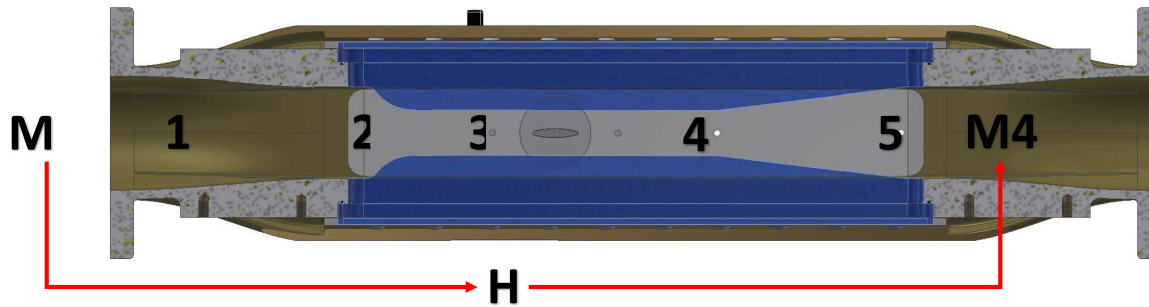
## 10.6.1 Calculs de résistance des vis



Paramètres					
E	Rp0.2	S	Coef sécu	% de Rp0.2 pour précharge	Fprécontrainte
Mpa	N/mm <sup>2</sup>	mm <sup>2</sup>	-	%	N
210000	640	5,03	2	40	1130

Calculs												
	nbr de vis	$\sigma$ admissible	$\sigma$ précontrainte	$\sigma$ déplacement	Mvis par vis	Fvis par vis	$\epsilon$	Lo	$\Delta L$	Mvis tot	Mx	Fprofil
	-	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	Nm	N	-	mm	mm	Nm	Nm	N
low	2	244,4	224,7		19,8	1,2	99,3	0,000094	3	0,000282		
med	2	292,2	224,7		67,6	13,5	340,0	0,000322	3	0,000966	56,2	1080,0
top	1	320	224,7		95,3	26,9	479,6	0,000454	3	0,001362		

## 10.6.2 Calculs de pertes de charge



Re = 500'000 et incidence 0°							
ζ <sub>exp1</sub>	ζ <sub>fr1</sub>	ζ <sub>exp2</sub>	ζ <sub>fr2</sub>	ζ <sub>exp4</sub>	ζ <sub>fr4</sub>	ζ <sub>exp5</sub>	ζ <sub>fr5</sub>
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,159	0,01	0	0,01	0,06	0,03	0,08	0,01
ζ <sub>1</sub>		ζ <sub>2</sub>		ζ <sub>4</sub>		ζ <sub>5</sub>	
[-]		[-]		[-]		[-]	
0,169		0,01		0,09		0,09	
A1	C1	A2	C2	A4	C4	A5	C5
[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]
0,006	4,781	0,003	9,562	0,003	9,562	0,006	4,781
Δp <sub>1</sub>		Δp <sub>2</sub>		Δp <sub>4</sub>		Δp <sub>5</sub>	
[Pa]		[Pa]		[Pa]		[Pa]	
1925,8		455,8		4102,4		1025,6	
Δp <sub>tot</sub>	H	Δp <sub>vanne</sub>	Δp <sub>vanne thé</sub>	delta			
[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]			
7509,6	13272,4	5762,8	9116,359748	3353,6			

Re = 500'000 et incidence 5°							
ζ <sub>exp1</sub>	ζ <sub>fr1</sub>	ζ <sub>exp2</sub>	ζ <sub>fr2</sub>	ζ <sub>exp4</sub>	ζ <sub>fr4</sub>	ζ <sub>exp5</sub>	ζ <sub>fr5</sub>
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,159	0,01	0	0,01	0,06	0,03	0,08	0,01
ζ <sub>1</sub>		ζ <sub>2</sub>		ζ <sub>4</sub>		ζ <sub>5</sub>	
[-]		[-]		[-]		[-]	
0,169		0,01		0,09		0,09	
A1	C1	A2	C2	A4	C4	A5	C5
[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]
0,006	4,781	0,003	9,562	0,003	9,562	0,006	4,781
Δp <sub>1</sub>		Δp <sub>2</sub>		Δp <sub>4</sub>		Δp <sub>5</sub>	
[Pa]		[Pa]		[Pa]		[Pa]	
1925,8		455,8		4102,4		1025,6	
Δp <sub>tot</sub>	H	Δp <sub>vanne</sub>	Δp <sub>vanne thé</sub>	delta			
[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]			
7509,6	14493,7	6984,1	12762,90365	5778,8			

Re = 500'000 et incidence 10°							
ζ <sub>exp1</sub>	ζ <sub>fr1</sub>	ζ <sub>exp2</sub>	ζ <sub>fr2</sub>	ζ <sub>exp4</sub>	ζ <sub>fr4</sub>	ζ <sub>exp5</sub>	ζ <sub>fr5</sub>
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,159	0,01	0	0,01	0,06	0,03	0,08	0,01
ζ <sub>1</sub>		ζ <sub>2</sub>		ζ <sub>4</sub>		ζ <sub>5</sub>	
[-]		[-]		[-]		[-]	
0,169		0,01		0,09		0,09	
A1	C1	A2	C2	A4	C4	A5	C5
[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]
0,006	4,781	0,003	9,562	0,003	9,562	0,006	4,781
Δp <sub>1</sub>		Δp <sub>2</sub>		Δp <sub>4</sub>		Δp <sub>5</sub>	
[Pa]		[Pa]		[Pa]		[Pa]	
1925,8		455,8		4102,4		1025,6	
Δp <sub>tot</sub>	H	Δp <sub>vanne</sub>	Δp <sub>vanne thé</sub>	delta			
[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]			
7509,6	19567,8	12058,2	20511,80943	8453,6			

Re = 500'000 et incidence 15°							
ζ <sub>exp1</sub>	ζ <sub>fr1</sub>	ζ <sub>exp2</sub>	ζ <sub>fr2</sub>	ζ <sub>exp4</sub>	ζ <sub>fr4</sub>	ζ <sub>exp5</sub>	ζ <sub>fr5</sub>
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,159	0,01	0	0,01	0,06	0,03	0,08	0,01
ζ <sub>1</sub>		ζ <sub>2</sub>		ζ <sub>4</sub>		ζ <sub>5</sub>	
[-]		[-]		[-]		[-]	
0,169		0,01		0,09		0,09	
A1	C1	A2	C2	A4	C4	A5	C5
[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]
0,006	4,781	0,003	9,562	0,003	9,562	0,006	4,781
Δp <sub>1</sub>		Δp <sub>2</sub>		Δp <sub>4</sub>		Δp <sub>5</sub>	
[Pa]		[Pa]		[Pa]		[Pa]	
1925,8		455,8		4102,4		1025,6	
Δp <sub>tot</sub>	H	Δp <sub>vanne</sub>	Δp <sub>vanne thé</sub>	delta			
[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]			
7509,6	33720,4	26210,8	35097,98503	8887,2			

Re = 500'000 et incidence 20°							
ζ <sub>exp1</sub>	ζ <sub>fr1</sub>	ζ <sub>exp2</sub>	ζ <sub>fr2</sub>	ζ <sub>exp4</sub>	ζ <sub>fr4</sub>	ζ <sub>exp5</sub>	ζ <sub>fr5</sub>
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,159	0,01	0	0,01	0,06	0,03	0,08	0,01
ζ <sub>1</sub>		ζ <sub>2</sub>		ζ <sub>4</sub>		ζ <sub>5</sub>	
[-]		[-]		[-]		[-]	
0,169		0,01		0,09		0,09	
A1	C1	A2	C2	A4	C4	A5	C5
[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]	[m <sup>2</sup> ]	[m/s]
0,006	4,781	0,003	9,562	0,003	9,562	0,006	4,781
Δp <sub>1</sub>		Δp <sub>2</sub>		Δp <sub>4</sub>		Δp <sub>5</sub>	
[Pa]		[Pa]		[Pa]		[Pa]	
1925,8		455,8		4102,4		1025,6	
Δp <sub>tot</sub>	H	Δp <sub>vanne</sub>	Δp <sub>vanne thé</sub>	delta			
[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[Pa]			
7509,6	51614,1	44104,5	61079,61031	16975,1			

10.6.3 Validation de la calibration

Validation de la calibration du profil										
Alpha	FxMeanN	FyMeanN	FzMeanN	M1barRel	FxMeanCorrectedN	FyMeanCorrectedN	FzMeanCorrectedN	erreur reative Fx [%]	erreur reative Fy [%]	erreur reative Fz [%]
-90	14,8	11,8	-110,8	-0,3	-0,4	0,0	0,7	-2,4	-0,3	-0,6
-45	10,3	2,6	-110,7	-0,3	-0,9	0,3	1,0	-8,3	13,1	-0,9
0	0,4	-0,8	-110,5	-0,3	0,0	-0,2	0,0	9,0	29,0	0,0
45	-11,9	3,3	-109,8	-0,3	-1,2	0,3	0,4	10,2	8,4	-0,4
90	-16,1	12,3	-109,0	-0,3	-0,6	-0,7	1,2	3,9	-5,8	-1,1
-90	14,8	11,3	-0,4	0,0	-0,3	-0,8	0,2	-1,7	-6,7	-48,5
-45	10,4	2,3	-0,4	0,0	-0,7	-0,2	-0,5	-6,8	-10,4	125,5
0	0,6	-1,1	-0,4	0,0	0,2	-0,8	-0,8	40,3	68,4	200,8
45	-11,4	3,1	0,1	0,0	-0,7	-0,2	-0,2	6,2	-5,6	-277,3
90	-15,6	11,8	0,6	0,0	0,0	-1,5	-0,2	0,3	-12,3	-33,9
-90	15,6	12,5	308,1	1,0	0,3	-0,5	0,1	1,9	-4,1	0,0
-45	11,3	3,3	306,9	1,0	-0,1	-0,2	-0,2	-1,1	-4,6	-0,1
0	1,2	-0,1	306,2	1,0	0,5	-0,7	-1,3	43,6	770,3	-0,4
45	-11,1	4,2	305,5	1,0	-0,6	-0,1	0,7	5,2	-2,3	0,2
90	-15,4	13,0	305,6	1,0	0,1	-1,3	-0,2	-0,5	-10,1	0,0
-90	16,4	13,6	615,1	2,0	0,4	-0,6	-1,2	2,2	-4,3	-0,2
-45	12,1	4,4	612,6	2,0	-0,2	-0,2	-2,9	-1,3	-5,3	-0,5
0	1,8	0,9	611,2	2,0	0,3	-0,8	-2,3	19,4	-90,8	-0,4
45	-10,4	5,3	609,9	2,0	-0,6	-0,1	-2,3	6,1	-2,0	-0,4
90	-14,9	14,1	609,1	2,0	-0,1	-1,3	-2,1	0,7	-9,4	-0,4
-90	16,9	14,7	930,5	3,0	0,0	-0,5	-5,2	0,0	-3,7	-0,6
-45	12,7	5,5	928,4	3,0	-0,5	-0,1	-5,8	-3,7	-2,2	-0,6
0	2,5	2,0	926,9	3,0	0,2	-0,7	-7,4	7,0	-33,9	-0,8
45	-9,7	6,3	925,3	3,0	-0,8	-0,1	-4,6	7,8	-1,2	-0,5
90	-14,5	15,4	924,8	3,0	-0,4	-1,1	-6,2	2,6	-7,0	-0,7
-90	17,2	15,3	1232,8	4,0	-0,3	-0,4	-4,8	-1,6	-2,6	-0,4
-45	12,9	6,0	1227,9	4,0	-0,8	0,0	-5,1	-5,9	0,5	-0,4
0	2,8	2,5	1223,8	4,0	-0,1	-0,6	-6,3	-4,2	-24,3	-0,5
45	-9,2	6,8	1221,3	4,0	-0,8	0,1	-6,4	9,0	1,4	-0,5
90	-13,6	16,3	1218,5	3,9	0,0	-0,5	-6,6	0,1	-2,9	-0,5

	FxMeanCorrectedN	FyMeanCorrectedN	FzMeanCorrectedN
Moyenne	-0,3	-0,4	-2,3
σ	0,4	0,5	2,8

## 10.6.4 Répétabilité

### 3.5 - Répétabilité

	Q [m³/h]	Alpha [°]	Fx mean [N]	Fy mean [N]	Mz mean [Nm]	Fx std [N]	Fy std [N]	Mz std [Nm]	Fx mean corrected [N]	Fy mean corrected [N]	Fd [N]	FI [N]	Std Fd [N]	Std FI [N]	Mean resultant Fx-Fy [N]
Référence	41,54	55,00	-11,99	779,91	1,17	7,84	18,38	0,11	-0,43	772,67	633,18	442,83	19,55	4,12	780,00
	62,74	45,00	-22,75	746,96	1,75	10,17	17,69	0,12	-12,90	741,65	533,55	515,30	19,70	5,32	747,31
	83,36	38,50	-32,19	743,98	2,35	9,10	9,91	0,10	-23,85	739,44	478,98	563,85	13,30	2,09	744,67
	104,41	33,00	-53,21	745,84	3,05	10,62	9,79	0,10	-46,38	741,69	442,85	596,77	14,24	2,43	747,73
Test 1	41,91	55,00	-12,90	781,51	1,24	7,21	16,44	0,11	-1,34	774,27	635,01	443,00	17,60	3,53	781,61
	62,62	45,00	-23,51	731,45	1,76	9,53	15,48	0,12	-13,62	726,19	523,12	503,86	17,68	4,21	731,82
	83,71	38,50	-32,69	753,64	2,43	8,78	10,00	0,07	-24,36	749,08	485,38	571,08	13,10	2,36	754,35
	104,42	33,00	-54,71	752,15	3,11	9,64	9,93	0,09	-47,87	748,00	447,54	601,25	13,49	3,08	754,14
Erreur abs	0,37	0,00	-0,91	1,59	0,07	-0,63	-1,94	0,00	-0,91	1,59	1,83	0,17	-1,95	-0,60	1,61
	-0,12	0,00	-0,76	-15,51	0,02	-0,64	-2,21	0,00	-0,72	-15,46	-10,42	-11,44	-2,01	-1,11	-15,48
	0,35	0,00	-0,50	9,66	0,07	-0,32	0,09	-0,03	-0,51	9,64	6,40	7,23	-0,20	0,27	9,67
	0,01	0,00	-1,50	6,31	0,06	-0,98	0,14	-0,01	-1,50	6,31	4,69	4,48	-0,75	0,65	6,40
Erreur rel	1%	0%	8%	0%	6%	-8%	-11%	-1%	211%	0%	0%	0%	-10%	-14%	0%
	0%	0%	3%	-2%	1%	-6%	-12%	0%	6%	-2%	-2%	-2%	-10%	-21%	-2%
	0%	0%	2%	1%	3%	-4%	1%	-28%	2%	1%	1%	1%	-1%	13%	1%
	0%	0%	3%	1%	2%	-9%	1%	-11%	3%	1%	1%	1%	-5%	27%	1%

	Q [m³/h]	Alpha [°]	Fx mean [N]	Fy mean [N]	Mz mean [Nm]	Fx std [N]	Fy std [N]	Mz std [Nm]	Fx mean corrected [N]	Fy mean corrected [N]	Fd [N]	FI [N]	Std Fd [N]	Std FI [N]	Mean resultant Fx-Fy [N]
Référence	41,54	55,00	-11,99	779,91	1,17	7,84	18,38	0,11	-0,43	772,67	633,18	442,83	19,55	4,12	780,00
	62,74	45,00	-22,75	746,96	1,75	10,17	17,69	0,12	-12,90	741,65	533,55	515,30	19,70	5,32	747,31
	83,36	38,50	-32,19	743,98	2,35	9,10	9,91	0,10	-23,85	739,44	478,98	563,85	13,30	2,09	744,67
	104,41	33,00	-53,21	745,84	3,05	10,62	9,79	0,10	-46,38	741,69	442,85	596,77	14,24	2,43	747,73
Test 2	41,69	55,00	-12,52	773,40	1,24	7,74	16,53	0,11	-0,94	766,18	628,16	438,69	17,98	3,14	773,50
	62,65	45,00	-23,02	732,48	1,78	9,97	17,50	0,13	-13,14	727,22	523,51	504,93	19,42	5,33	732,84
	83,63	38,50	-32,26	750,31	2,43	8,70	9,77	0,08	-23,93	745,76	482,98	568,74	12,89	2,23	751,00
	104,48	33,00	-53,32	751,00	3,13	9,12	9,63	0,09	-46,51	746,83	445,76	601,01	12,89	3,11	752,89
Erreur abs	0,15	0,00	-0,52	-6,51	0,06	-0,10	-1,85	0,00	-0,51	-6,49	-5,02	-4,14	-1,57	-0,98	-6,50
	-0,09	0,00	-0,27	-14,48	0,03	-0,20	-0,19	0,01	-0,24	-14,43	-10,04	-10,37	-0,28	0,01	-14,46
	0,27	0,00	-0,07	6,33	0,08	-0,41	-0,14	-0,02	-0,08	6,32	4,00	4,90	-0,41	0,14	6,33
	0,07	0,00	-0,11	5,16	0,08	-1,50	-0,16	-0,01	-0,13	5,14	2,91	4,24	-1,35	0,68	5,16
Erreur rel	0%	0%	4%	-1%	5%	-1%	-10%	-3%	118%	-1%	-1%	-1%	-8%	-24%	-1%
	0%	0%	1%	-2%	2%	-2%	-1%	6%	2%	-2%	-2%	-2%	-1%	0%	-2%
	0%	0%	0%	1%	3%	-4%	-1%	-20%	0%	1%	1%	1%	-3%	7%	1%
	0%	0%	0%	1%	3%	-14%	-2%	-9%	0%	1%	1%	1%	-9%	28%	1%

	Q [m³/h]	Alpha [°]	Fx mean [N]	Fy mean [N]	Mz mean [Nm]	Fx std [N]	Fy std [N]	Mz std [Nm]	Fx mean corrected [N]	Fy mean corrected [N]	Fd [N]	FI [N]	Std Fd [N]	Std FI [N]	Mean resultant Fx-Fy [N]
Test 1	41,91	55,00	-12,90	781,51	1,24	7,21	16,44	0,11	-1,34	774,27	635,01	443,00	17,60	3,53	781,61
	62,62	45,00	-23,51	731,45	1,76	9,53	15,48	0,12	-13,62	726,19	523,12	503,86	17,68	4,21	731,82
	83,71	38,50	-32,69	753,64	2,43	8,78	10,00	0,07	-24,36	749,08	485,38	571,08	13,10	2,36	754,35
	104,42	33,00	-54,71	752,15	3,11	9,64	9,93	0,09	-47,87	748,00	447,54	601,25	13,49	3,08	754,14
Test 2	41,69	55,00	-12,52	773,40	1,24	7,74	16,53	0,11	-0,94	766,18	628,16	438,69	17,98	3,14	773,50
	62,65	45,00	-23,02	732,48	1,78	9,97	17,50	0,13	-13,14	727,22	523,51	504,93	19,42	5,33	732,84
	83,63	38,50	-32,26	750,31	2,43	8,70	9,77	0,08	-23,93	745,76	482,98	568,74	12,89	2,23	751,00
	104,48	33,00	-53,32	751,00	3,13	9,12	9,63	0,09	-46,51	746,83	445,76	601,01	12,89	3,11	752,89
Erreur abs	-0,22	0,00	0,39	-8,11	-0,01	0,53	0,09	0,00	0,40	-8,08	-6,85	-4,31	0,37	-0,38	-8,11
	0,03	0,00	0,49	1,04	0,01	0,44	2,02	0,01	0,48	1,03	0,38	1,07	1,74	1,12	1,02
	-0,08	0,00	0,43	-3,33	0,01	-0,09	-0,23	0,01	0,43	-3,32	-2,40	-2,33	-0,21	-0,13	-3,34
	0,06	0,00	1,39	-1,15	0,01	-0,52	-0,30	0,00	1,36	-1,18	-1,78	-0,24	-0,60	0,03	-1,25
Erreur rel	-1%	0%	-3%	-1%	-1%	7%	1%	-2%	-30%	-1%	-1%	-1%	2%	-11%	-1%
	0%	0%	-2%	0%	1%	5%	13%	6%	-4%	0%	0%	0%	10%	27%	0%
	0%	0%	-1%	0%	0%	-1%	-2%	10%	-2%	0%	0%	0%	-2%	-5%	0%
	0%	0%	-3%	0%	0%	-5%	-3%	2%	-3%	0%	0%	0%	-4%	1%	0%