

Filière Systèmes industriels

Orientation Design & Materials

Travail de bachelor Diplôme 2019

François Pedroni

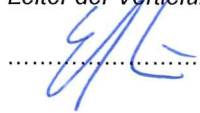
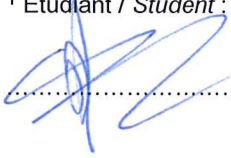
Détection de la cavitation

-  *Professeur*
Cécile Münch-Alligné
-  *Expert*
Gino Blommaert
-  *Date de la remise du rapport*
16.08.2019

SYND	ETE	TEVI
X	X	X

Filière / Studiengang SYND	Année académique / Studienjahr 2018/19	No TD / Nr. DA dm/2019/77
Mandant / Auftraggeber <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution	Etudiant / Student François Pedroni Professeur / Dozent Cécile Münch-Alligné	Lieu d'exécution / Ausführungsort <input checked="" type="checkbox"/> HES—SO Valais <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Etablissement partenaire Partnerinstitution
Travail confidentiel / vertrauliche Arbeit <input type="checkbox"/> oui / ja ¹ <input checked="" type="checkbox"/> non / nein	Expert / Experte Gino Blommaert Meggitt SA, Route de Moncor 4, 1752 Villars-sur-Glâne	

Titre / Titel Détection de la cavitation
Description / Beschreibung L'objectif de ce projet est d'analyser la capacité de différents capteurs à détecter la cavitation qui peut apparaître dans les machines hydrauliques des centrales hydroélectriques et pouvant provoquer une usure prématurée. La nouvelle veine d'essai pour la cavitation installée dans le laboratoire d'hydraulique de la HES-SO Valais permettra de mener différentes expériences et tester ces capteurs. Une analyse des mesures sera réalisée pour identifier la signature des différents régimes de cavitation observés. Les différentes étapes de ce projet seront les suivantes : <ul style="list-style-type: none"> – Etat de l'art sur la détection de la cavitation – Prise en main de l'instrumentation de la veine d'essai – Exploration des différents régimes de cavitation de la veine – Mesures expérimentales de détection pour ces différents régimes – Analyse des résultats – Synthèse.

Signature ou visa / Unterschrift oder Visum Responsable de l'orientation / filière Leiter der Vertiefungsrichtung / Studiengang:  ¹ Etudiant / Student : 	Délais / Termine Attribution du thème / Ausgabe des Auftrags: 13.05.2019 Présentation intermédiaire / Zwischenpräsentation 13 – 14.06.2019 Remise du rapport / Abgabe des Schlussberichts: 16.08.2019, 12:00 Expositions / Ausstellungen der Diplomarbeiten: 28, 29 – 30.08.2019 Défense orale / Mündliche Verfechtung: 02 – 05.09.2019
---	--

¹ 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.

Détection de la cavitation

Diplômant/e François Pedroni

Objectif du projet

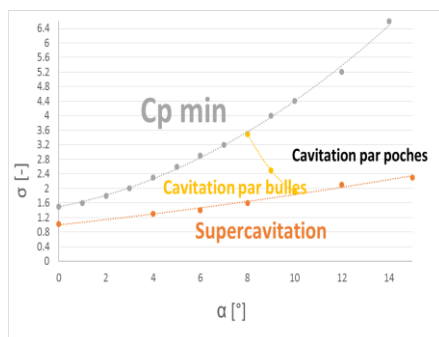
Actuellement, il n'existe pas de moyen de monitorer la cavitation dans les centrales hydroélectriques. Le but de ce travail est d'évaluer différents capteurs non-intrusifs à l'aide de la veine d'essai de la HES-SO Valais/Wallis.

Méthodes | Expériences | Résultats

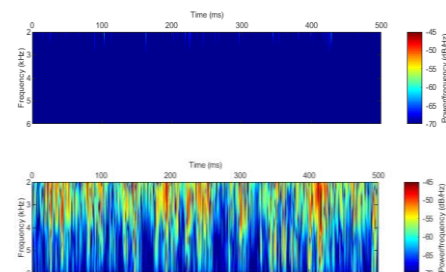
Pour réaliser ce projet plusieurs étapes ont été effectuées. La première fut d'observer le phénomène de la cavitation à l'aide d'une caméra haute vitesse de type Phantom V411. On a ainsi pu établir la carte de cavitation du profil NACA0015 monté dans la veine d'essai. Cette carte définit les zones d'apparitions des différents régimes de cavitation en fonction de l'angle d'incidence du profil et du paramètre de cavitation σ .

A partir de cette carte, 18 points de mesure ont été choisis, correspondant à 3 incidences et 6 valeurs de sigma. Certains points correspondent à des régimes cavitants et d'autres non-cavitants, ceci afin d'évaluer la sensibilité d'un accéléromètre et d'un microphone à ces différents régimes.

Ces deux capteurs ont permis de mettre en avant des différences dans la réponse en fréquence lorsque la cavitation apparaît. Les plus grosses différences apparaissent dans la plage de fréquences entre 3 et 5 kHz. Dans le futur, des mesures avec ces capteurs placés à différents endroits, permettraient de confirmer les fréquences trouvées.



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



Spectrogramme montrant l'intensité de fréquence sans (en haut) ou avec cavitation (en bas).

Travail de diplôme
| édition 2019 |

Filière
Systèmes industriels

Domaine d'application
Design & Materials

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

1. NOMENCLATURE	3
2. INTRODUCTION	4
2.1. Cadre du projet	4
2.2. Objectif	4
2.3. Cahier des charges.....	5
2.4. Méthodologie	5
3. ETAT DE L'ART SUR LA CAVITATION.....	7
3.1. La cavitation.....	7
3.1.1. Cavitation par poche	9
3.1.2. Notion de couche limite	10
3.1.3. Cavitation tourbillonnaire	11
3.2. Outils de détection de la cavitation	11
3.2.1. Détection visuelle	11
3.2.2. Accéléromètre	12
3.2.3. Fibres optiques.....	12
3.2.4. Capteur de pression sonore	13
3.2.5. Hydrophone	14
3.2.6. Rayons X	14
4. CAS D'ETUDE.....	16
4.1. Banc de test.....	16
4.2. Veine d'essai	17
4.3. Profil NACA0015.....	18
5. INSTRUMENTATION	21
5.1. Dispositif pour la caméra rapide	21
5.2. Description et disposition des capteurs	23
5.2.1. Accéléromètre	24
5.2.2. Microphone	24
5.2.3. Système d'acquisition.....	25
5.2.4. Interface LabView	26
6. RESULTATS	27
6.1. Plan d'expérience	27
6.2. Analyse modale	28
6.2.1. Analyse expérimentale	28

6.2.2.	Analyse numérique	29
6.2.3.	Comparaison des résultats.....	30
6.3.	Carte de cavitation.....	35
6.4.	Post-traitement des signaux	36
6.4.1.	Accéléromètre	38
6.4.2.	Microphone	46
7.	CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	51
7.1.	Conclusion.....	51
7.2.	Perspectives	52
8.	REMERCIEMENTS	53
9.	BIBLIOGRAPHIE	54
10.	ANNEXES.....	55
10.1.	Annexe 1 : Protocole d'utilisation	
10.2.	Annexe 2 : Spécifications de la caméra Phantom V411	
10.3.	Annexe 3 : Calibration Chart accéléromètre Kistler 8766A100AB.....	
10.4.	Annexe 4 : Calibration Chart Microphone G.R.A.S 46AE	
10.5.	Annexe 5 : Configuration de l'installation.....	
10.6.	Annexe 6 : Analyse modale expérimentale dans l'air	
10.7.	Annexe 7 : Analyse modale expérimentale dans l'eau	
10.8.	Annexe 8 : Périodogrammes et spectrogrammes de l'accéléromètre	
10.9.	Annexe 9 : Spectrogrammes du microphone	

1. NOMENCLATURE

σ	: paramètre de cavitation sigma	[-]
p_{∞}	: pression dans l'écoulement	[Pa]
p_v	: pression de vaporisation	[Pa]
V_{∞}	: vitesse dans l'écoulement	[m/s]
ρ	: masse volumique	[kg/m ³]
Re	: nombre de Reynolds	[-]
c	: corde du profil NACA	[mm]
ν	: viscosité cinématique	[m ² /s]
Sr	: nombre de Strouhal	[-]
f	: fréquence de lâché de tourbillons	[Hz]
Cp_{min}	: coefficient de pression minimum	[-]
p_m	: pression minimum sur le profil NACA	[Pa]
Y(k)	: FFT du signal (coup de marteau)	[-]
X(j)	: signal d'entrée (coup de marteau)	[-]
n	: longueur du signal	[sample]
W_n	: coefficient de Fourier	[-]
$C_x(t)$: fonction d'autocorrélation	[-]
$x(\theta)$: signal d'entrée (accéléromètre)	[g]
$S_x(f)$: densité spectrale	[Hz/sample]
X(f)	: transformée de Fourier de x(t)	[-]
$\bar{X}(f)$: conjugué de X(f)	[-]
$\hat{P}(f)$: périodogramme	[db/(rad/sample)]

2. INTRODUCTION

2.1. Cadre du projet

Les centrales hydroélectriques produisent en Suisse près de 60% de l'électricité. On y compte 638 centrales dont la plus grande, la Grande Dixence, se situe en Valais.¹

Pour chaque centrale, le but est de pouvoir utiliser les installations de manière optimale. En effet plus une turbine est rentable moins elle coûte au propriétaire de la centrale.

La performance d'une machine hydraulique est fortement influencée par la qualité de l'écoulement du fluide qui la traverse. Lorsqu'un fluide arrive dans une turbine, sa pression et sa vitesse sont perturbées ce qui provoquera la diminution du rendement de la machine.

Une trop grande dépression dans le fluide peut créer de la cavitation, c'est-à-dire, que le fluide atteint une pression inférieure à sa pression vapeur. Celle-ci provoquera un changement de phase d'eau sous forme liquide en vapeur d'eau sous forme gazeuse. On retrouve principalement ce phénomène sur les turbines de types Francis ou Kaplan mais il peut aussi se développer sur les augets des turbines Pelton quand le jet est de mauvaise qualité². Sur une turbine il est primordial d'éviter le développement de cavitation afin de maintenir un bon rendement ainsi qu'une durée de vie prolongée.

Actuellement, à ma connaissance, il n'existe aucun moyen de monitorer la cavitation. Dans les centrales hydroélectriques, les ingénieurs ne peuvent que constater le bruit et les dégâts, mais ils n'arrivent pas encore à quantifier ce phénomène.

Le but de ce travail est d'étudier la cavitation et de trouver le meilleur moyen pour la détecter avec une instrumentation la plus simple possible.

2.2. Objectif

La mise en place d'une nouvelle veine d'essai sur le banc de test hydraulique de la HES-SO Valais a pour but d'étudier le phénomène de la cavitation. Pour cette étude un profil de type NACA0015 a été monté dans la veine. En faisant varier un certain nombre de paramètres comme la vitesse du fluide, le niveau de pression dans la veine, l'incidence du profil NACA, le jeu de paroi, cela va permettre de créer de la cavitation contrôlée.

Le but de ce projet est de trouver le meilleur moyen de détecter et d'identifier la cavitation. L'objectif est ainsi d'analyser la capacité de différents capteurs à détecter la cavitation de manière non-intrusive.

¹Confédération Suisse. Energie – faits et chiffres, 27.11.2017, <https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/fr/home/wirtschaft/energie/energie---fakten-und-zahlen.html> (consulté le 14.05.2019)

² Ugyen Dorji, Reza Ghomashchi, *Hydro turbine failure mechanisms : An overview*. 2014

2.3. Cahier des charges

De ce fait, le projet est composé de 4 étapes qui permettront de répondre au mieux à l'objectif fixé :

- Détection de la cavitation de manière non-intrusive
- Paramétrage spécifique de la veine d'essai pour différents types de cavitation
- Mesures avec chaque capteur
- Analyse des résultats et comparaison des différents capteurs

2.4. Méthodologie

Ce travail débutera par un état de l'art de la cavitation, en réalisant des recherches par rapport à la physique d'un écoulement autour d'un profil et en étudiant le phénomène de la cavitation. Cela permettra d'identifier les paramètres influençant la cavitation.

Par la suite, la prise en main de la veine d'essai permettra d'observer l'écoulement et d'établir une carte de cavitation pour le profil NACA0015. De celle-ci découlera le choix des points de mesure.

Afin d'effectuer les meilleures mesures possibles, toute une instrumentation sera mise en place afin de synchroniser la caméra et les capteurs.

Une analyse modale de la structure fournira des informations sur ses fréquences propres. De plus elle permettra de réaliser l'analyse fréquentielle des mesures de la cavitation de manière plus claire.

De toutes ces étapes, une synthèse pourra être faite afin de voir l'efficacité des capteurs, la plage de fréquence de réponse de la cavitation et de déterminer quelles améliorations peuvent être apportées pour les recherches futures.

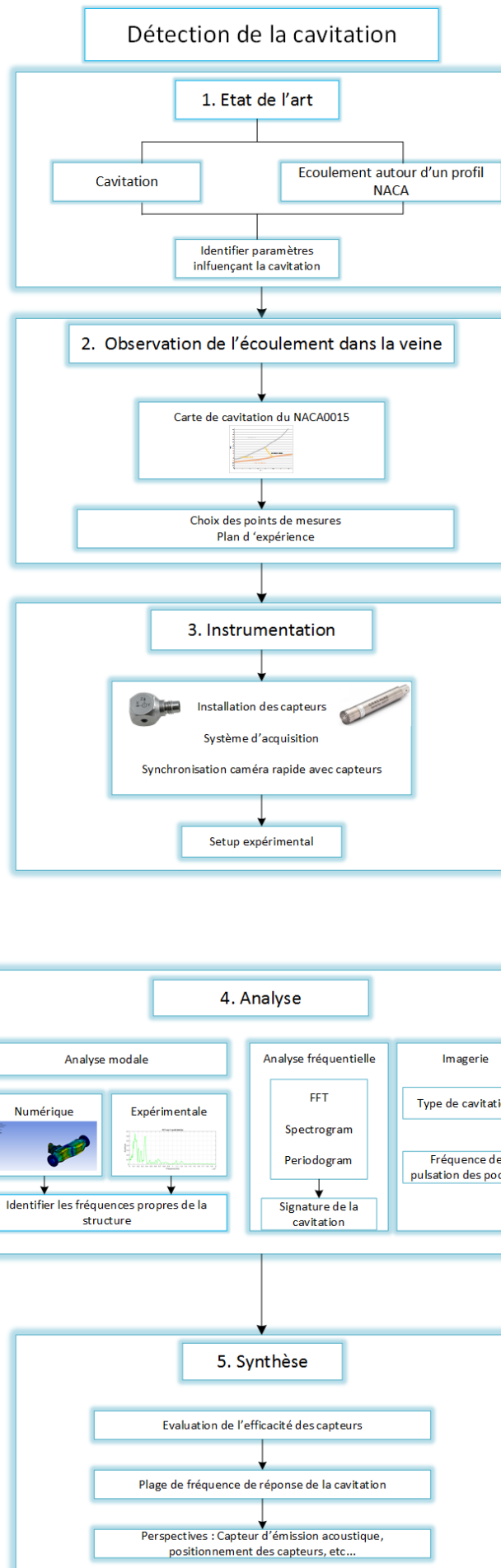


Figure 1: Méthodologie

3. ETAT DE L'ART SUR LA CAVITATION

3.1. La cavitation

Tout d'abord commençons par définir la cavitation. Il s'agit de « la formation locale de vapeur à l'intérieur d'un liquide en mouvement parce que la pression statique est inférieure à la pression de dégagement de vapeur, de petites bulles de vapeur se forment dans le liquide, bulles qui implosent et disparaissent lorsque la pression remonte, un peu plus en aval dans l'écoulement.³ »

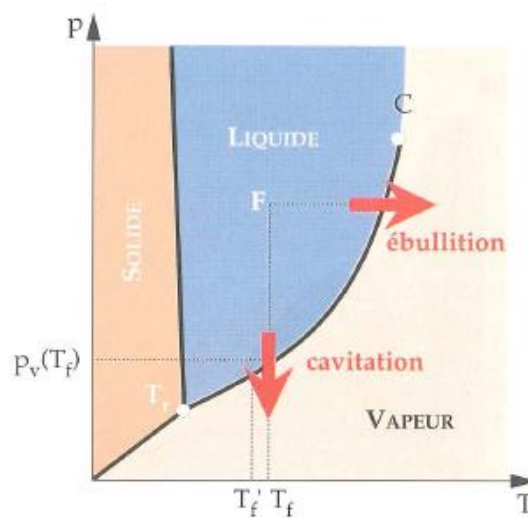


Figure 2: Diagrammes des états d'un corps et courbes de changement de phase
Source : J.P. Franc – F. Avellan – B. Belahadji – J.Y. Billard – L. Briançon-Marjollet – D. Fréchou – D.H. Fruman A. Karimi – J.L. Kueny – J.M. Michel. La cavitation, Mécanismes physiques et aspects industriels. Collection Grenoble Sciences. 1995, Chap 1. p.25)

Cette formation de bulles dans l'écoulement des machines hydrauliques peut venir d'une différence de pression entre le côté basse pression et le côté haute pression de la machine. La cavitation se situera généralement du côté basse pression, car elle est le résultat d'une forte dépression qui fait que le liquide se vaporise. En effet c'est lorsque la pression diminue à température constante jusqu'à atteindre la pression de vaporisation que le liquide commence à caviter.

Lorsque la cavitation se produit au sein d'un écoulement elle prend, les principales formes suivantes :

- Bulles isolées
- Poches
- Filaments tourbillonnaires⁴

³ Dr. Cécile Münch-Alligné. Cours d'hydraulique 2018 p.103

⁴ J.P. Franc – F. Avellan – B. Belahadji – J.Y. Billard – L. Briançon-Marjollet – D. Fréchou – D.H. Fruman A. Karimi – J.L. Kueny – J.M. Michel. La cavitation, Mécanismes physiques et aspects industriels. Collection Grenoble Sciences. 1995, Chap.1 p.27

Différents régimes pouvant survenir dans un écoulement sont à distinguer :

- Les régimes limites dans lesquelles on s'intéresse au seuil d'apparition ou de disparition de la cavitation
- Les régimes de cavitation développée
- Le régime de cavitation partielle, régime dans lequel une bulle se forme au bord d'attaque et se referme sur la paroi de l'aube de turbine
- Le régime supercavitant, régime où la cavité qui se forme au bord d'attaque se referme plus loin dans l'écoulement

On peut caractériser la cavitation à travers différents paramètres adimensionnels. Le *paramètre de cavitation* σ prend en compte, dans le cas d'une vanne, la différence de pression entre l'amont et l'aval. Dans le cas d'un écoulement autour d'un profil :

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_v}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$$

Avec :

- p_{∞} : pression dans l'écoulement à l'infini
- p_v : pression de vaporisation du fluide
- V_{∞} : vitesse de l'écoulement à l'infini
- ρ : masse volumique du fluide

On parle de paramètre de cavitation limite σ_{vi} lorsque la valeur de σ correspond à la naissance de la cavitation.⁵

⁵ Ibidem. Chap.4 p.122

3.1.1. Cavitation par poche

Comme il a été dit auparavant, il existe différents types de cavitations. Dans le cas de cavitation de paroi, elle peut prendre deux formes, soit en poche attachée soit en bulles séparées.

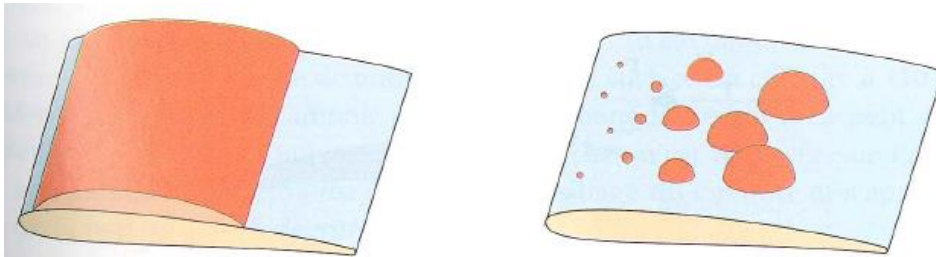


Figure 3: A gauche, cavitation en poche attachée, à droite en bulles séparées. Source : Ibidem

Ce qui influencera celle-ci sera, en plus des paramètres cités plus haut, la viscosité du fluide car c'est en effet grâce à elle que l'on définit le nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{V_{\infty} \times c}{\nu}$$

Avec :

Re	= nombre de Reynolds
c	= longueur de la corde
ν	= viscosité cinématique du fluide
V_{∞}	= vitesse de l'écoulement non perturbée en amont du profil

D'un point de vue géométrique, la forme de la section droite du profil ainsi que l'angle que fait la corde avec la vitesse incidente de l'écoulement sont des facteurs influençant le phénomène de cavitation.

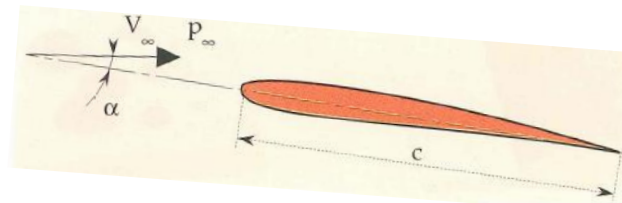


Figure 4: Configuration schématique. Source : Ibidem

La différence entre ces deux formes de cavitation de paroi se marque par la présence de germes dans le liquide ou non. En effet, si l'on considère le fluide comme un milieu homogène ces germes n'existent pas. La réalité du terrain a montré que la plupart des liquides rencontrés contiennent des inclusions de gaz et de vapeur, ce qui veut dire que le liquide est un milieu hétérogène. Ces microbulles, dont la taille varie entre le micromètre et le demi-millimètre, sont appelées germes de cavitation.

Dans le cas de la cavitation en poche attachée, la présence de germes est considérée comme nulle et c'est la viscosité qui possède la plus grande influence. Par contre, pour la cavitation

en bulles séparées, la présence de ces germes fait que des bulles se forment séparément sur toute la paroi du profil.⁶

3.1.2. Notion de couche limite

A la surface du corps immergé dans le fluide se forme ce qu'on appelle la *couche limite*. Cette dernière se caractérise par une couche de fluide de faible épaisseur à l'intérieur de laquelle la vitesse passe de zéro au contact du corps à la vitesse maximale de l'écoulement dans la zone éloignée.

L'écoulement dans la couche limite varie, il est d'abord laminaire au voisinage immédiat du corps et devient ensuite turbulent.⁷

L'état de la couche limite va être influencée par le nombre de Reynolds et comme celui-ci a un impact sur la cavitation alors, la couche limite va influencer la cavitation.

En dessous du nombre de Reynolds critique, entre 10^5 et 4×10^5 , le régime est appelé subcritique et la couche limite est laminaire. Ceci engendre une cavitation de cisaillement avec un décollement laminaire.

Pour un nombre de Reynolds légèrement supérieur au Reynolds critique, le régime est dit transcritique. Il en résulte que le décollement laminaire, la transition dans la couche limite entre laminaire et turbulent et le recollement à la paroi du profil se trouvent dans la même zone appelée *bulbe de décollement*.

Enfin pour un nombre de Reynolds très grand, le régime est dit supercritique et à ce moment-là, le bulbe de décollement est supprimé. La couche limite est turbulente et le décollement aussi.⁸

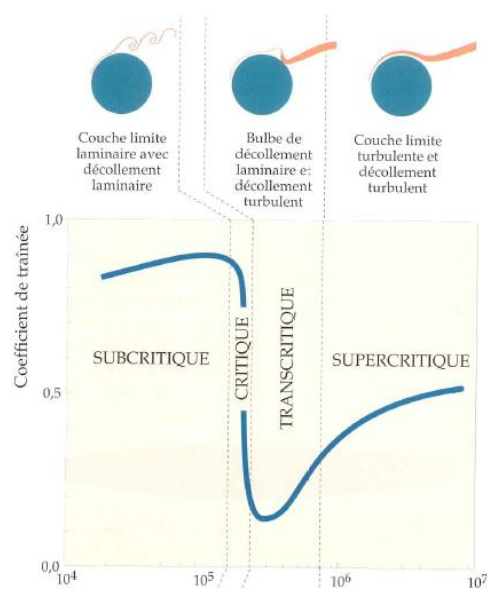


Figure 5: Trainée d'un cylindre circulaire en fonction du nombre de Reynolds et types de couche limite et de cavitation associés. Source : Ibidem. Chap.4 p.127

⁶ Ibidem. Chap.4 p.121

⁷ Dr. Cécile Münch-Alligné. *Cours d'hydraulique 2018* p.67

⁸ J.P. Franc – F. Avellan – B. Belahadji – J.Y. Billard – L. Briançon-Marjollet – D. Fréchou – D.H. Fruman A. Karimi – J.L. Kueny – J.M. Michel. *La cavitation, Mécanismes physiques et aspects industriels*. Collection Grenoble Sciences. 1995, Chap.4 p.124

Lorsque les lignes de courant se décolle, elles forment des tourbillons qui se détachent du corps à une certaine fréquence f . Cette fréquence est donnée par le nombre de Strouhal qui est défini par :⁹

$$Sr = \frac{f \times c}{V_{\infty}}$$

3.1.3. Cavitation tourbillonnaire

Le dernier type de cavitation qui peut être rencontré autour d'un profil se nomme la cavitation tourbillonnaire. Celle-ci se divise en une multitude de tourbillons dont les principaux sont :

- D'apex ou en cornet qui se développent le long du bord d'attaque d'ailes delta
- Marginaux pour ceux qui naissent à l'extrémité d'ailes ou de pales d'hélice
- Confinés pour ceux qui sont induits par des vitesses tangentielles dans les machines hydrauliques
- De sillage ou de Kármán pour ceux qui se forment à l'arrière de corps épais

Ces tourbillons sont dus au fait que la différence de pression entre l'intrados et l'extrados peut créer un écoulement transversal. Celui-ci confère au fluide un moment cinétique qui le fait entrer en rotation. La combinaison de ce moment cinétique et de la vitesse du fluide donne naissance à ces tourbillons.¹⁰

3.2. Outils de détection de la cavitation

A présent, on peut s'intéresser aux différentes techniques qui ont été mise au point pour détecter la cavitation. Plusieurs études ont été réalisées afin de déterminer quelle serait la meilleure solution pour la mise en évidence de la cavitation.

3.2.1. Détection visuelle

La première méthode est basée sur la détection par photographie ou caméra haute vitesse. L'étude réalisée par Liang Dong, Yuqi Zhao et Cui Dai montre que la méthode optique possède la meilleure capacité de détection, cependant elle reste la moins applicable dans le domaine industriel car la plupart du temps, les aubes de turbines ne sont pas visibles.¹¹

Cette technique réside simplement dans le fait d'observer le moment où apparaissent les premières cavités dans le fluide. Elle permet de confirmer très rapidement qu'il y a de la cavitation qui se forme. De plus, il est facile de voir de quel type de cavitation il s'agit, par poches, par bulles séparées ou tourbillonnaire.

⁹ Dr. Cécile Münch-Alligné. *Cours d'hydraulique 2018* p.65

¹⁰ J.P. Franc – F. Avellan – B. Belahadji – J.Y. Billard – L. Briançon-Marjollet – D. Fréchou – D.H. Fruman A. Karimi – J.L. Kueny – J.M. Michel. *La cavitation, Mécanismes physiques et aspects industriels*. Collection Grenoble Sciences. 1995, Chap.6

¹¹ Liang Dong, Yuqi Zhao, Cui Dai. *Detection of Inception Cavitation in Centrifugal Pump by Fluid-Borne Noise Diagnostic*. 2019

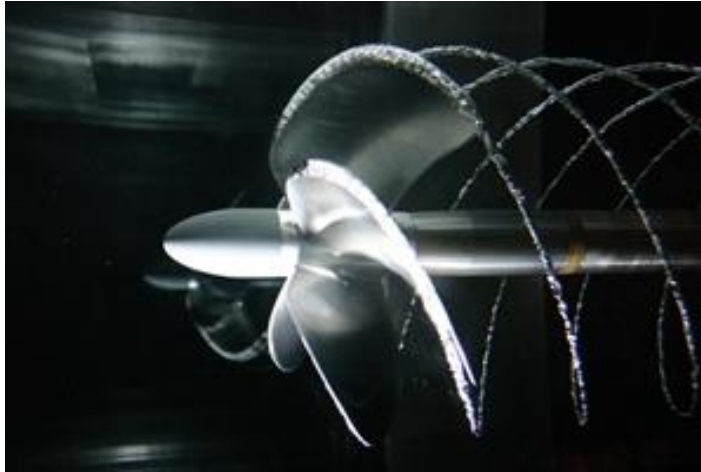


Figure 6: Cavitation tourbillonnaire sur une hélice. Source : Mecaflux Heliciel
<https://heliciel.com/aerodynamique-hydrodynamique/cavitation-%20helices-hydrofoils.htm>.
 (Consulté le 16.05.2019)

3.2.2. Accéléromètre

Un accéléromètre est un capteur capable de mesurer, comme son nom l'indique, des accélérations. De ce fait, il permet de détecter les vibrations que subit la structure d'une machine.

L'implosion des cavités formées par la dépression dans le fluide peut créer des vibrations dans les machines hydrauliques. Ainsi une forte augmentation des vibrations sur une turbine indiquera éventuellement la présence de la cavitation.

Le phénomène de la cavitation est caractérisé par des vibrations à haute fréquence.¹² Le standard international estime la fréquence minimum pour l'évaluation de la cavitation à 5kHz¹³. Ainsi, en filtrant les basses fréquences, il est possible de détecter uniquement les hautes fréquences dues à la cavitation.

Cette méthode ne permet pas de déterminer le type de cavitation se formant sur la machine, de plus un accéléromètre ressent n'importe quelles vibrations dues à l'environnement. Il est donc important de savoir différencier les fréquences dues à la cavitation et celles dues à l'environnement.

3.2.3. Fibres optiques

Une étude menée par l'école Politecnico di Milano a montré que l'utilisation de la fibre optique pour la mesure de la cavitation pouvait être un choix judicieux. Il existe différents types de capteurs à fibres optiques, dans cette étude c'est l'interférométrie optique qui caractérise le capteur. Cette technique permet de moduler la phase des ondes lumineuses et est reconnue comme étant la technologie de capteur à fibres optiques la plus sensible.¹⁴

¹² Pierpaolo Boffi, Giacomo Ferrarese, Maddalena Ferrario, Stefano Malavasi, Maria Vittoria Mastronardi, Marco Mattarei. *Coherent optical fiber interferometric sensor for incipient cavitation index detection*. 2018

¹³ ISA, ISA-RP75.23-1995, *Considerations for Evaluating Control Valve Cavitation*, Research Triangle Park, North Carolina 27709, 1995

¹⁴ Opsens inc. Jean-Talon Nord, *La technologie Interférométrie polarimétrique en lumière blanche*. 2014

Ces fibres optiques sont utilisées comme capteur de contraintes et de déformations. Comme pour l'accéléromètre, l'implosion des bulles de gaz crée une onde de choc qui va donner lieu à des toutes petites déformations.

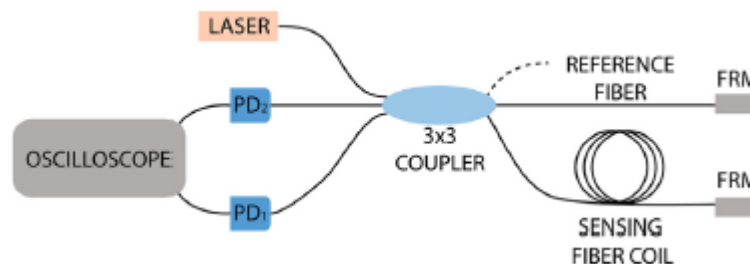


Figure 7: Schéma du capteur à fibres optiques utilisé dans l'étude de l'école Politecnico di Milano
Source : Pierpaolo Boffi, Giacomo Ferrarese, Maddalena Ferrario, Stefano Malavasi, Maria Vittoria Mastronardi, Marco Mattarei. *Coherent optical fiber interferometric sensor for incipient cavitation index detection*. 2018

L'ensemble du système consiste en un coupleur où se trouve d'un côté, la fibre servant de référence et la fibre servant à la mesure. Les deux sont terminées par un miroir de Faraday (FRM). De l'autre côté du coupleur se trouve le laser d'une longueur d'onde de 1550 nm ainsi que deux photodiodes (PD₁, PD₂) pour détecter le signal (Figure 7).

L'étude en question a conclu que ces fibres optiques étaient un bon outil pour la mesure de la cavitation: « *Experimental results show very good accordance between the data obtained by the standard approach, based on the use of an accelerometer, and the ones achieved by the exploitation of the optical fiber sensors, demonstrating the ability of the proposed fiber sensors to detect in a reliable way the cavitation occurrence* »¹⁵

L'avantage de cette méthode en comparaison à l'accéléromètre est la possibilité de travailler dans des conditions extrêmes, telle que sous l'eau par exemple. La transmission peut se faire également sur de longue distance sans avoir la mesure qui est altérée.¹⁶ Cette méthode reste expérimentale et donc les résultats obtenus dans cette étude ne peuvent pas être appliqués à tous les cas de cavitations rencontrés.

3.2.4. Capteur de pression sonore

Comme il a été dit plus haut, l'implosion des bulles de gaz dans le fluide crée des vibrations dues à l'onde de choc. Ces vibrations vont rendre la machine plus bruyante qu'en fonctionnement normal.

Le but est de mesurer le bruit ambiant induit par la cavitation.

Des chercheurs chinois ont montré que cette méthode n'était pas forcément la plus appropriée. En effet, le capteur de pression sonore mesure tous les sons de l'environnement. Si l'environnement est changeant il sera difficile d'avoir des mesures précises de la cavitation. Il

¹⁵ Pierpaolo Boffi, Giacomo Ferrarese, Maddalena Ferrario, Stefano Malavasi, Maria Vittoria Mastronardi, Marco Mattarei. *Coherent optical fiber interferometric sensor for incipient cavitation index detection*. 2018

¹⁶ Ibidem.

sera d'autant plus difficile de mettre en évidence la cavitation naissante.¹⁷ Cependant dans les centrales hydroélectriques les employés sont capable d'entendre la différence si la machine cavite ou non et donc le capteur de pression sonore devrait aussi être capable d'entendre la cavitation.

3.2.5. Hydrophone

Toutes les techniques citées précédemment sont des techniques dites de mesures non-intrusives car il n'est pas nécessaire installées dans les machines hydrauliques. Dans le cas de l'hydrophone, on peut parler de méthode semi-intrusive car il doit être placé dans le fluide, mais pas forcément à l'endroit exact où se situe la cavitation.

L'hydrophone va enregistrer les ondes sonores provoquées par la cavitation. Comme il est placé dans l'eau, il sera capable de détecter très rapidement les premières formations de cavités de vapeur.

Les mêmes chercheurs chinois cité précédemment ont testé cette méthode et ils ont mis en évidence l'efficacité de cette technique.

Leurs travaux ont d'abord montré la capacité de l'hydrophone à détecter la cavitation dans une pompe centrifuge. Cependant ils ont été plus loin. Ils ont déterminé la bande de fréquence la plus adéquate pour avoir des mesures plus précises. Ils en ont conclu que les ondes sonores produites par la cavitation se situaient entre 2000 et 3000 Hz et en dessous de 100 Hz. « *The spectra of flow-borne noise influenced by cavitation are mainly concentrated in the frequency band of 2000-3000 Hz and below 100 Hz.* »¹⁸

Cette étude a donc permis de mettre en évidence l'efficacité de ce capteur mais aussi la bande fréquence où il est le plus performant. Cependant son implémentation dans une centrale peut être délicate. En effet si l'eau est fortement chargée en sédiment, la réponse en fréquence peut être différente.

3.2.6. Rayons X

La dernière méthode qui va être présentée ici, utilise les rayons X pour mesurer la cavitation. L'objectif de cette technique est de mesurer la densitométrie du fluide. Là où les bulles apparaîtront la densité se verra changée et donc la cavitation peut être détectée. Le problème de cette méthode, c'est qu'elle est relativement dangereuse. En effet l'utilisation de rayons X entraîne des précautions importantes à prendre de la part de l'utilisateur.

C'est Mr. Harish Ganesh à l'Université du Michigan en 2015 qui a montré l'utilité des rayons X dans la mesure de la cavitation.¹⁹

¹⁷ Liang Dong, Yuqi Zhao, Cui Dai. *Detection of Inception Cavitation in Centrifugal Pump by Fluid-Borne Noise Diagnostic*. 2019

¹⁸ Ibidem.

¹⁹ Harish Ganesh. *Bubbly Shock Propagation as a Cause of Sheet to Cloud Transition of Partial Cavitation and Stationary Cavitation Bubbles Forming on a Delta Wing Vortex*, University of Michigan, 2015

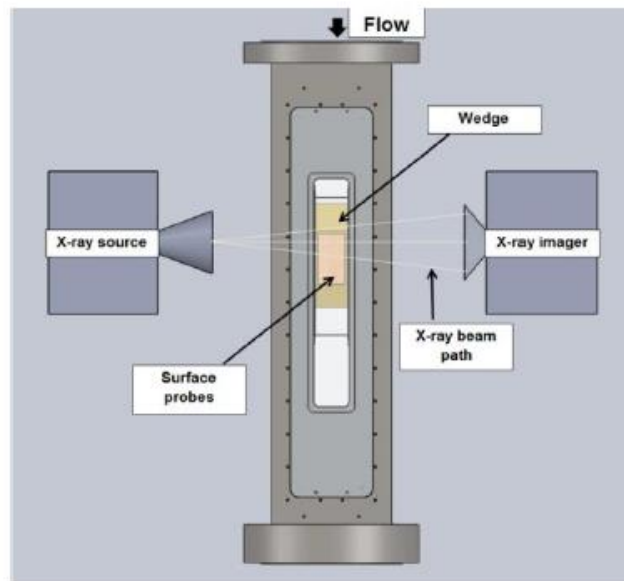


Figure 8: Schéma de la densitométrie par rayons X. Source : Harish Ganesh. *Bubbly Shock Propagation as a Cause of Sheet to Cloud Transition of Partial Cavitation and Stationary Cavitation Bubbles Forming on a Delta Wing Vortex*, University of Michigan, 2015

Les images obtenues permettent de voir très précisément le comportement des poches de gaz. Grâce à cet outil on est capable de les dimensionner.

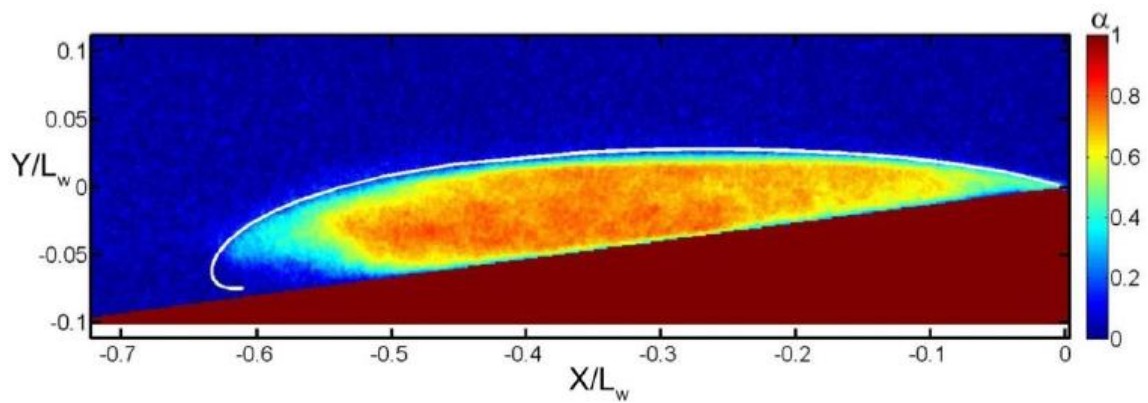


Figure 9: Image obtenue par densitométrie par rayons X d'une poche attachée. Source : Ibidem.

4. CAS D'ETUDE

Les tests et mesures présentés ont été effectués sur le banc de test de la HES-SO Valais/Wallis.

4.1. Banc de test

L'infrastructure à disposition a les caractéristiques suivantes :

- Pression maximale : **160 mCE**
- Débit maximal : **120 (136) m³/h**
- Puissance des pompes : **2x 18.5kW & 1x 5.5 kW**
- Vitesse maximale des pompes : **3'500 / 3000 rpm**

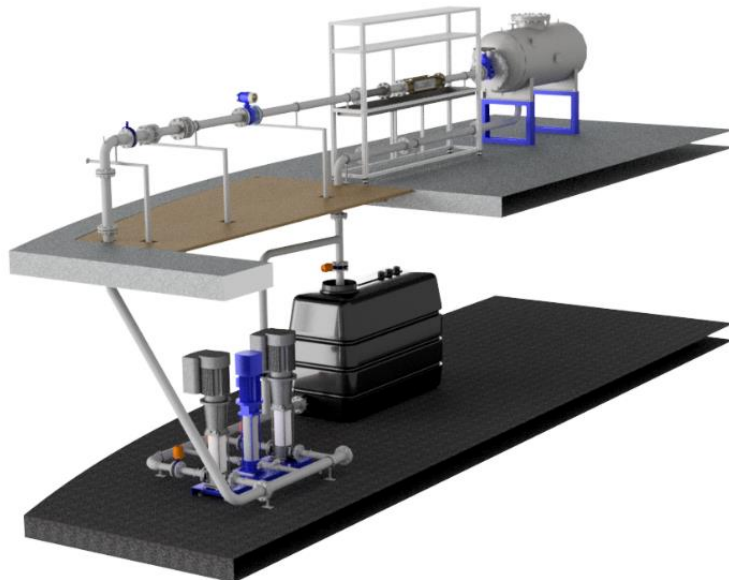


Figure 10: Banc de test de la HES-SO Valais/Wallis.

Source: *Design and control of a new hydraulic test rig for small hydro turbines*
Hasmatuchi V., Botero F., Gabathuler S., Münch C., 2015

Il est composé de deux réservoirs. Celui situé au niveau des pompes permet de remplir le circuit d'eau et le réservoir supérieur qui est pressurisable. Le réservoir pressurisable permet de faire tourner le banc de test en circuit fermé et de le mettre, ou non, en pression.

Le protocole d'utilisation du banc de test se trouve en annexe de ce rapport (Cf. annexe 1).

4.2. Veine d'essai

Sur le banc de test est montée une veine d'essai. Celle-ci est la partie centrale et la plus importante de l'infrastructure. En effet c'est dans cette veine que tous les tests et mesures se dérouleront.

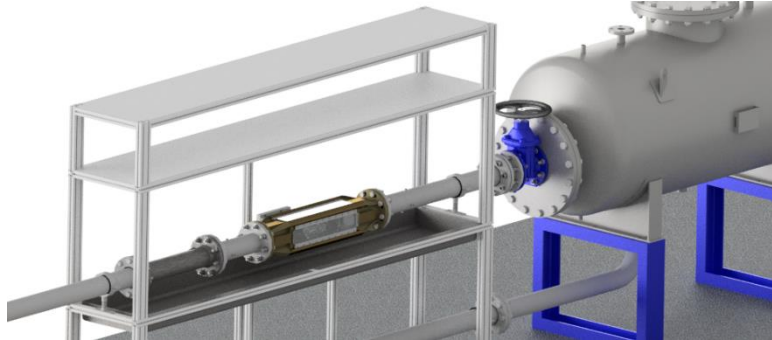
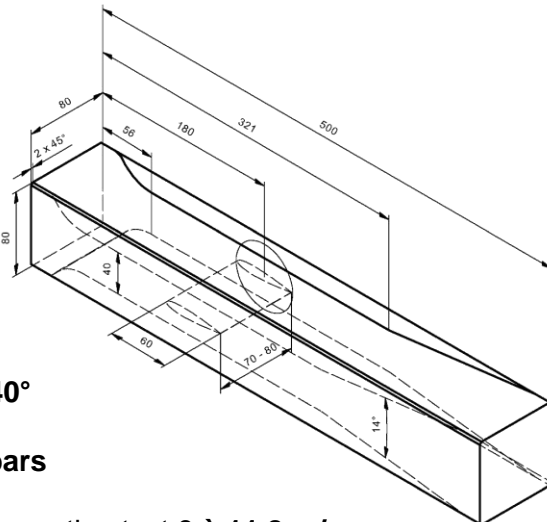


Figure 11: Veine d'essai montée sur l'infrastructure

Elle a pour caractéristiques principales :

- Longueur **500mm**
- Section transversale de **40 x 80mm**
- Profil NACA0015
- Angle d'incidence du profil : **-40° à 40°**
- Pression relative de travail : **-1 à 5 bars**
- Vitesse d'écoulement à l'entrée de la section test **0 à 11.8 m/s**



Les parois de celle-ci sont en plexiglas afin de pouvoir observer le phénomène de manière visuelle.



Figure 12: Veine d'essai

4.3. Profil NACA0015

NACA est l'ancienne appellation pour la NASA. NACA signifie National Advisory Committee for Aeronautics. Les 4 chiffres qui suivent déterminent le type de profil. Le premier indique la cambrure en pourcent de la corde, le second, la position de la cambrure en dixième de la corde depuis le bord d'attaque et les deux derniers l'épaisseur maximum en pourcent de la corde²⁰.

Pour rappel, la veine d'essai a une longueur de 500mm. Sa section est de 40x80mm et le profil est interchangeable.

Cependant pour toutes les mesures effectuées dans ce projet, c'est un profil NACA0015 possédant les caractéristiques suivantes qui est utilisé :

- Longueur de corde : **60mm**
- Largeur de profil : **86.5mm**



Figure 13: Profil NACA0015 utilisé pour les mesures

Ce profil a pour particularité d'être symétrique. Cela implique un même type de cavitation autant sur l'extrados que sur l'intrados.

La pression du fluide qui s'écoule varie en fonction de l'endroit où l'on se situe. Pour chaque profil NACA, on peut connaître sa courbe de pression minimum. Cette dernière permet de savoir à quelle endroit la pression sera au plus bas et donc, dans notre cas, l'endroit où va naître la cavitation.²¹

Le coefficient de pression minimum se calcule de la manière suivante :

$$Cp_{min} = \frac{p_m - p_{vap}}{0.5 \times \rho \times V_{\infty}^2}$$

Lorsque le paramètre de cavitation est égal à $-Cp_{min}$, alors il y a naissance de la cavitation.

²⁰ National Advisory Committee for Aeronautics, Report No. 460, *The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable density wind tunnel*, Eastman N. Jacobs, Kenneth E. Ward and M. Pinkerton, p.4, 1935

²¹ Dr. Cécile Münch-Alligné. *Cours d'hydraulique 2018, Chap. 5 Cavitation*

Apparition de
la cavitation

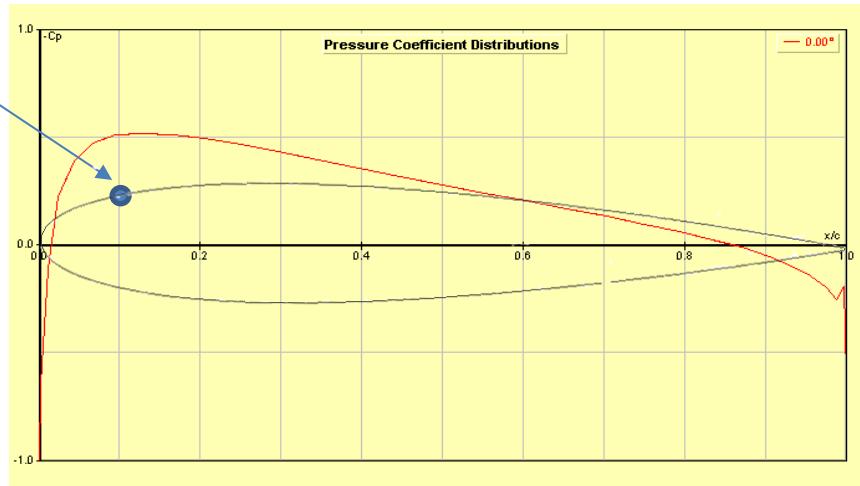


Figure 14: Courbe du coefficient de pression minimum pour un profil NACA0015 avec un angle d'incidence de 0° .
Source : Javafoil

L'angle d'inclinaison du profil est réglable au moyen d'un petit volant équipé d'un capteur. Cela permet de savoir exactement à quelle angle le profil se trouve. Il est important de noter que pour obtenir l'angle 0° , il a été nécessaire de faire ce réglage à l'œil en s'aidant de la traînée que formait le profil avec une vitesse du fluide élevée, celle-ci étant minimum pour une incidence nulle. La précision du positionnement a été estimée à $\pm 0.5^\circ$.

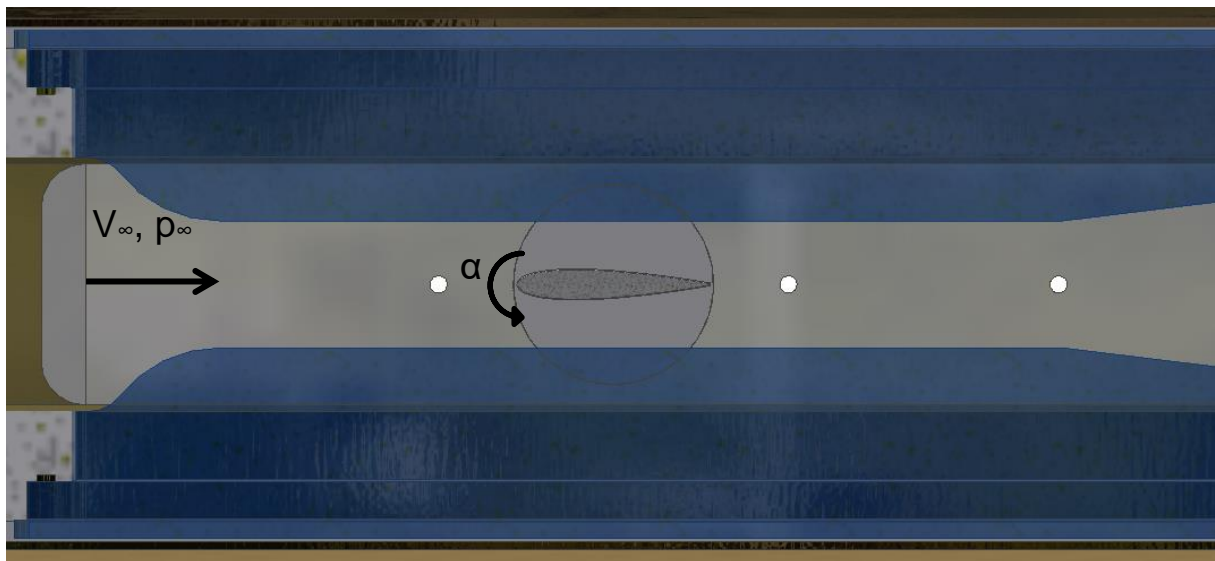
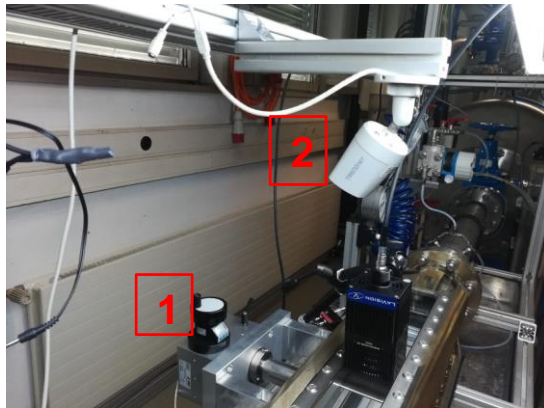


Figure 15: Veine d'essai avec profil NACA0015 et paramètres variables

Afin d'avoir la valeur de l'angle d'incidence directement dans l'interface de contrôle du circuit, une petite caméra TRENDnet du type TV-IP314PI a été installée. Elle permet la lecture de la valeur d'angle indiquée par le capteur incrémental et l'enregistrement dans l'interface de contrôle.



1	Affichage de l'incidence
2	Caméra TRENDnet

Figure 16: Dispositif de détection de l'incidence avec la caméra TRENDnet

En plus de l'angle d'incidence du profil NACA, il est important de connaître la distance qui sépare la paroi de la veine du profil. Celle-ci est ajustable et a été réglé pour une valeur de 1mm.

Le système de rotation du profil NACA est un système Werner de type DT 100/140 avec les caractéristiques suivantes :

SPÉCIFICATIONS	VALEURS
DÉMULTIPLICATION	48:1
MAX MOMENT D'ENTRÉE	2 Nm
MAX MOMENT DE SORTIE	40 Nm
JEU	$\pm 0.05^\circ$
MASSE	4.2 kg

Tableau 1: Caractéristiques du système de rotation du profil NACA

5. INSTRUMENTATION

Pour les prises de mesures, une instrumentation a été mise en place afin d'obtenir les informations les plus précises possibles, dans le but de documenter correctement les mesures réalisées.

Comme présenté dans la méthodologie la première étape sera l'établissement d'une carte de cavitation, soit une carte permettant de déceler le type de cavitation obtenu dans la veine. Celle-ci consiste en un graphique représentant le paramètre de cavitation en fonction de l'angle d'incidence. Pour ce faire, l'utilisation de la caméra rapide est nécessaire afin de déterminer de manière visuelle la cavitation qui se forme sur le profil. Suite de quoi les mesures avec les capteurs pourront être réalisées mais toujours en utilisant la caméra afin de visualiser ce qu'on mesure.

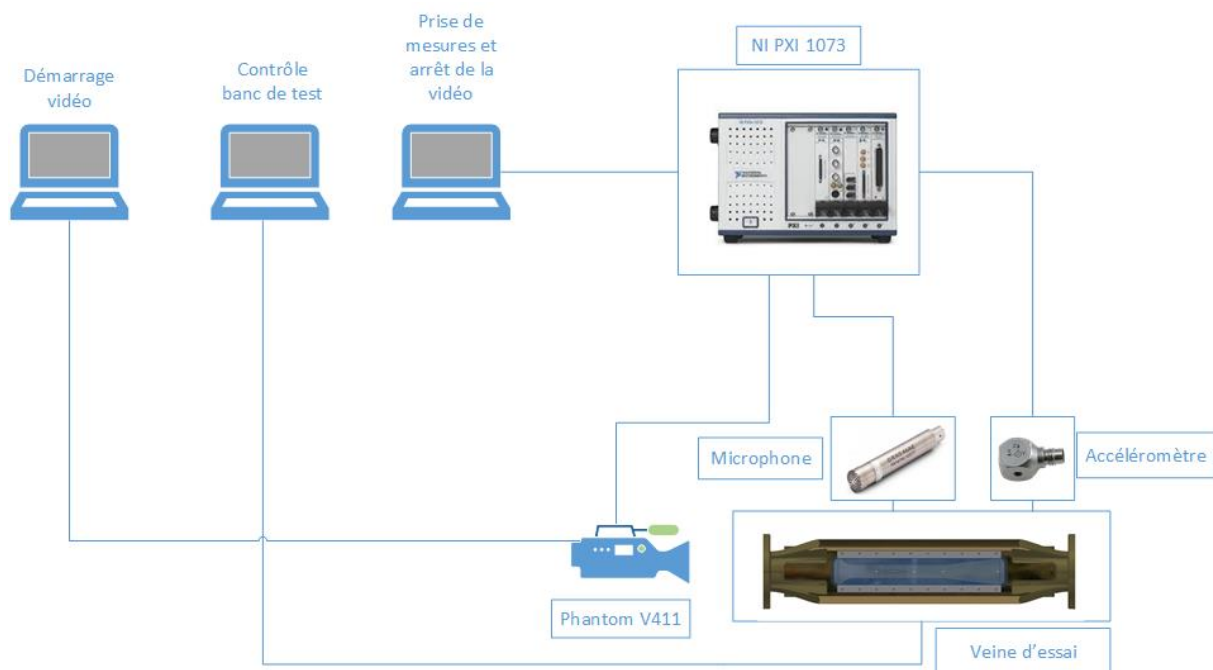


Figure 17: Architecture globale de l'instrumentation pour les mesures de cavitation

5.1. Dispositif pour la caméra rapide

La caméra utilisée pour les prises de vidéos est une Phantom V411. Il s'agit d'une caméra rapide permettant la visualisation d'un phénomène en slow motion. Toutes les spécifications techniques sont visibles en annexe (Cf. annexe 2) mais voici les principales :

SPÉCIFICATIONS	VALEURS
CCD RESOLUTION	1'280 x 800 pixels
MAXIMUM FRAME RATE	4'200 fps (1280 x 800) 600'000 fps (128 x 8)
RECORDING DEPTH	12 bits monochrome
BUFFER MEMORY	16 GB

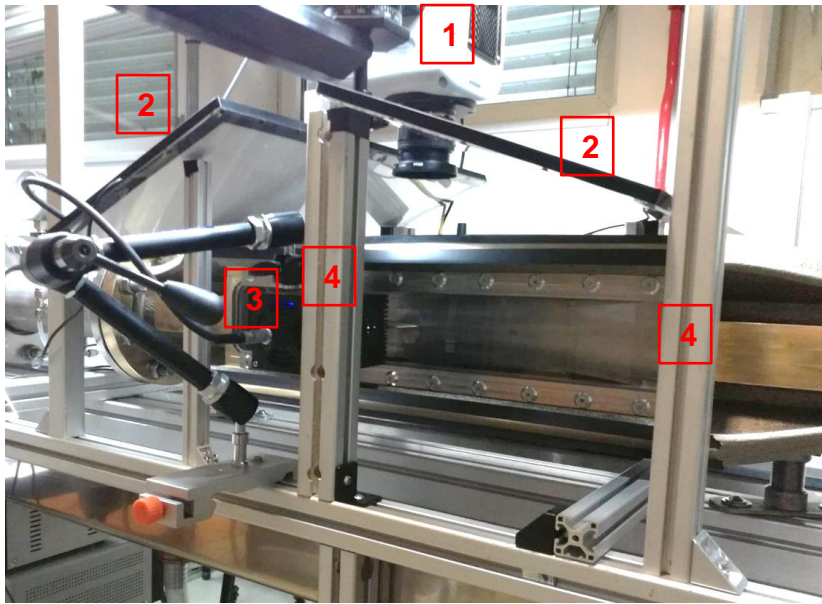
Tableau 2: Spécifications techniques de la caméra Phantom V411

Il faut prendre beaucoup de temps pour mettre en place l'éclairage. Deux panneaux LED ainsi que la lampe LED Constellation 120 ont été utilisées. Les deux panneaux sont posés sur le dessus de la veine de manière à ne pas avoir de reflets, tandis que la Constellation est mise sur le côté. Les panneaux LED sont alimentés en 24V par deux alimentations placées sous le banc de test.

DÉNOMINATION	SPÉCIFICATIONS	VALEURS
PANNEAU LED PHLOX-LEDW-BL 500X250- MSLLUB-Q-1R-24V	Source type	White LED
	Input voltage	24 VDC
	Luminance	$\geq 30'000 \text{ cd/m}^2$
CONSTELLATION 120	Source type	White LED
	Input voltage	48 VDC
	Luminance	12'000 lm

Tableau 3: Caractéristiques techniques des éléments d'éclairage

La structure du banc de test a dû être quelque peu modifiée afin de pouvoir positionner la caméra correctement. Grâce à ces modifications, les prochaines visualisations seront réalisées sans difficulté.



1	Caméra Phantom V411
2	Phlox LedW
3	Constellation 120
4	Support Phlox LedW

Figure 18: Dispositif d'éclairage pour la caméra Phantom V411

La caméra est montée sur un trépied dont la position a été marquée au sol pour pouvoir remonter le dispositif au même endroit plus facilement.

L'enregistrement vidéo est réalisé depuis un ordinateur qui est connecté à la caméra. C'est avec le logiciel Phantom que les ajustements techniques tel que le temps d'exposition ou la taille de l'image sont réglés.

Pour la première étape, qui est l'établissement d'une carte de cavitation, la caméra est utilisée de manière indépendante. Par la suite, lorsque les mesures avec les capteurs seront faites, la vidéo pourra être stoppée depuis l'interface LabView.

5.2. Description et disposition des capteurs

Pour les mesures non intrusives de la cavitation 2 capteurs seront principalement utilisés. Ces 2 capteurs sont :

- Un accéléromètre
- Un microphone

Un troisième capteur est installé, un capteur d'émission acoustique, mais pour des raisons de temps, les données de celui-ci n'ont pas pu être analysées.

Le but est de voir quels types de signaux la cavitation va donner.

5.2.1. Accéléromètre

L'accéléromètre est un capteur permettant la mesure d'accélération. Il est capable de détecter les vibrations subies par une structure. Celui utilisé est un accéléromètre IEPE 3 axes Kistler (Cf. annexe 3) dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- Dénomination : Kistler 8766A100AB
- Technologie : Piézoélectrique, avec un cristal PiezoStar®
- Plage de mesure : $\pm 100g$
- Signal de sortie : ± 5 VDC

Il a été vissé et collé sur le profil NACA. De cette manière, il est placé au plus près du phénomène et sera plus apte à le détecter.

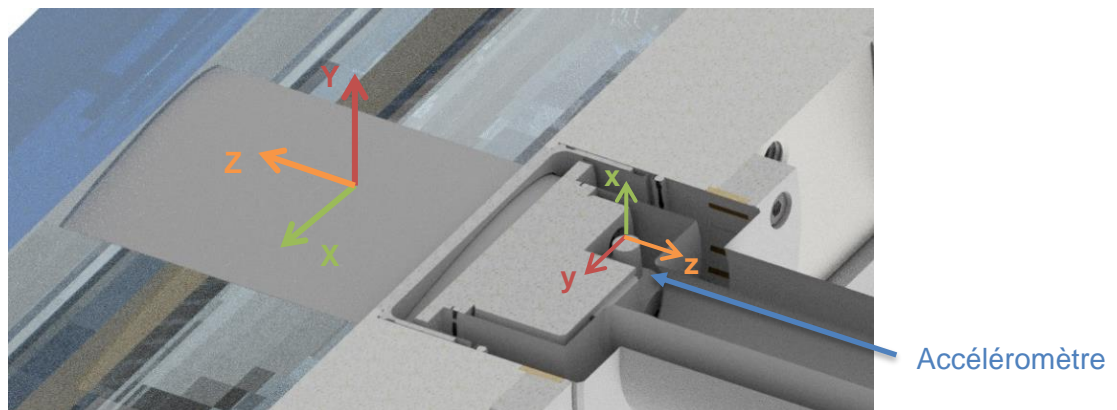


Figure 19: Positionnement de l'accéléromètre avec le système de coordonnées propre au profil NACA et au capteur

L'image ci-dessus montre l'emplacement de l'accéléromètre. On remarque que ces 3 axes ne correspondent pas aux axes du profil NACA. Cela n'a aucune incidence sur les mesures. Cependant, il faut être attentif à ne pas inverser les axes lors de la lecture des fichiers.

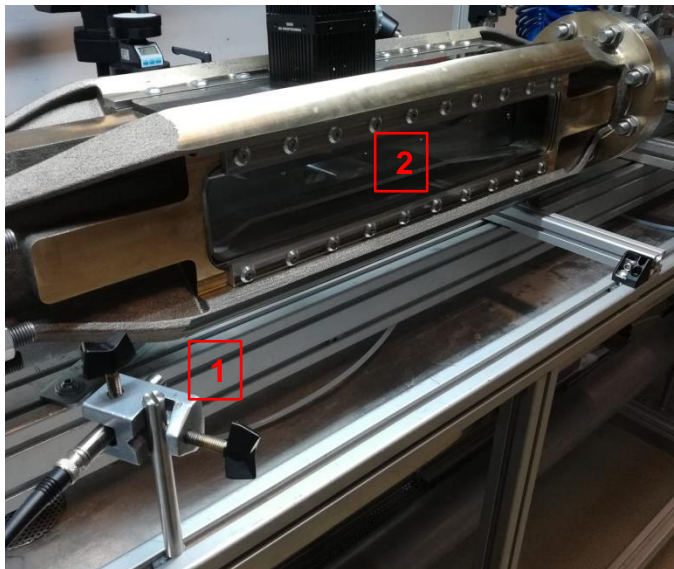
5.2.2. Microphone

Le microphone permet d'enregistrer les sons produits par la cavitation. Son utilisation a pour but de déterminer si il est capable de distinguer le bruit de la cavitation par rapport aux bruits de l'environnement qui l'entoure.

C'est un microphone G.R.A.S 46 AE (Cf. annexe 4) dont les caractéristiques principales sont les suivantes :

- Plage de mesure : 15...120 dB
- Plage de fréquence : 3.5... 20'000 Hz
- Signal de sortie : ± 8 VDC

Il est positionné à l'extérieur de la veine et en amont du profil. C'est un premier test, dans le futur, il serait intéressant de voir si les résultats obtenus changent en fonction du positionnement du microphone.



1	Microphone G.R.A.S
2	Profil NACA

Figure 20: Positionnement du microphone G.R.A.S 46 AE

5.2.3. Système d'acquisition

Le système d'acquisition est composé d'un châssis National Instruments dont la dénomination est NI PXIe-1073.

Ce châssis est complété par un module NI PXIe-4497. Il a pour caractéristiques d'avoir 16 entrées analogiques 24 bits et un conditionnement à courant constant IEPE. Il est conçu pour les applications acoustiques et vibratoires.

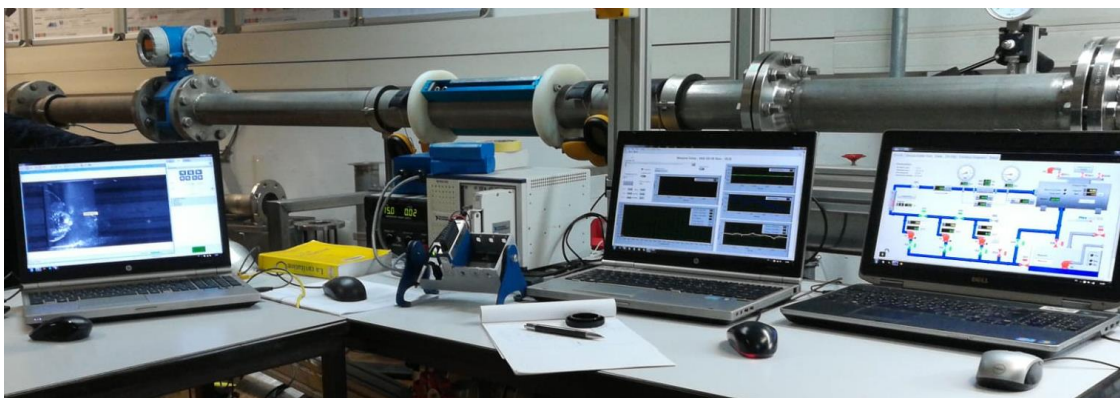


Figure 21: Dispositif pour les prises de mesure. De gauche à droite, ordinateur pour caméra, système d'acquisition, ordinateur de prise de mesures, ordinateur de gestion du banc de test

L'accéléromètre est connecté sur la carte NI PXIe-4497. Chaque axe de l'accéléromètre a un connecteur, de la sorte on obtient les vibrations du profil sur les 3 axes.

Comme pour l'accéléromètre le microphone est connecté sur la carte NI PXIe-4997. Tout le setup de l'installation se trouve résumé en annexe (Cf. annexe 5).

5.2.4. Interface LabView

L'interface LabView permet l'observation du comportement des signaux en direct mais également l'acquisition de ceux-ci.

On retrouve sur cette interface les signaux de l'accéléromètre, du microphone et du capteur d'émission acoustique. En plus de ceux-ci, le soft donne le signal FFT en temps réel de tous les capteurs cités précédemment.

Comme il a été mentionné plus haut pour la caméra, cette interface permet aussi de stopper l'enregistrement de la vidéo. De la sorte, on peut connaître exactement quel point du signal de mesure correspond à quelle image.

La fréquence d'acquisition est de 40 kHz. Elle a été choisie comme tel car la cavitation est un phénomène que l'oreille humaine peut entendre. Hors, l'oreille humaine est capable de distinguer des sons entre 20 et 20'000 Hz, d'où le choix des 40kHz. Il découle du théorème de Shannon qui dit que la fréquence d'échantillonnage doit être égale ou supérieure à deux fois la fréquence du signal²² :

$$F_e \geq 2 \times f_{max}$$

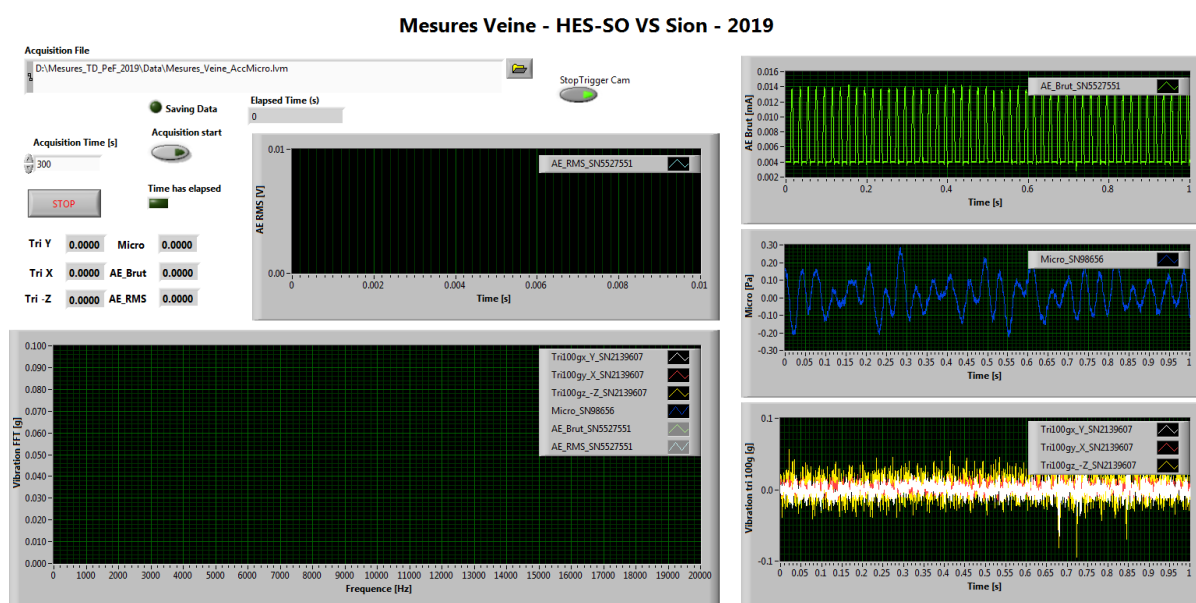


Figure 22: Interface LabView pour la prise de mesures

²² Francis Cottet, *Traitement du signal Aide-mémoire*, Chap. 6 Numérisation des signaux, 2000

6. RESULTATS

Dans cette partie sera présenté tout d'abord, le plan d'expérience suivi de l'analyse modale de la structure, que ce soit expérimental ou numérique.

Ensuite, les premiers résultats obtenus sont ceux de la détection visuelle. Ceux-ci ont permis de caractériser le profil considéré au niveau de la cavitation. De cette caractérisation seront tirés les différents points de mesures jugés intéressants pour la détection de la cavitation. Ces points de mesures seront analysés au niveau des signaux bruts afin de voir leurs caractéristiques (valeurs moyennes, écart-type, peak to peak). Mais ils seront aussi post-traités afin d'essayer de déterminer à quelle fréquence le phénomène se produit.

6.1. Plan d'expérience

Pour pouvoir avoir la meilleure répétabilité possible sur les mesures, il est important de suivre la même procédure pour chaque point de mesure. Pour ce faire un plan d'expérience est établi afin que par la suite les tests réalisés puissent être reproduit.

Pour chaque mesure la caméra est installée et synchronisée, comme il a été expliqué dans la partie instrumentation. Le temps d'acquisition dure 120 secondes, de cette manière il est possible d'observer la régularité du phénomène.

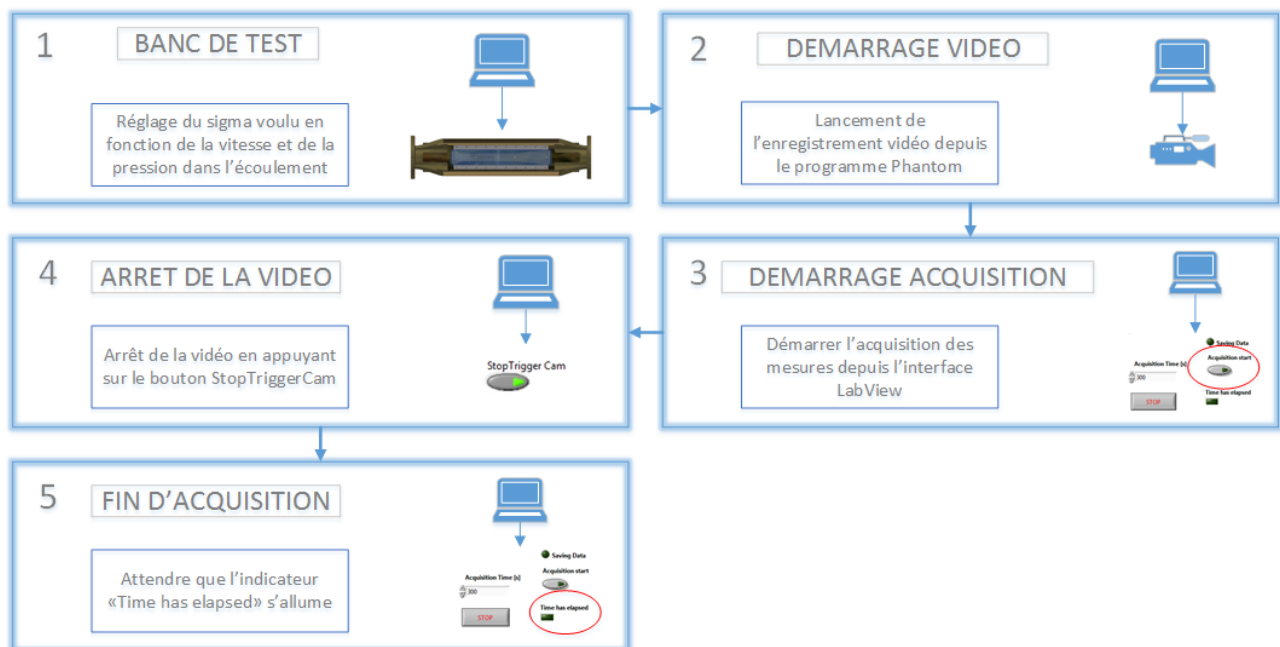


Figure 23: Plan d'expérience pour chaque mesure réalisée

6.2. Analyse modale

Pour être sûr de correctement détecter les fréquences de la cavitation, il est nécessaire de pouvoir écarter toutes les fréquences induites pas d'autres phénomènes physiques. Comme n'importe quelle structure, le banc de test de la HES-SO Valais/Wallis à des fréquences propres. Les fréquence propres d'un système sont les fréquences auxquelles il faut exciter la structure pour la faire entrer en résonance.

Le but de l'analyse modale est de trouver les fréquences propres de la veine d'essai et du profil pour pouvoir les identifier lors de l'analyse des signaux mesurés par les capteurs. Ces fréquences pourraient être excitées par d'autres phénomènes que la cavitation et n'auraient alors pas de lien avec la « signature » de la cavitation que nous recherchons.

Une analyse expérimentale sera réalisée ainsi qu'une analyse numérique sur ANSYS Workbench.

6.2.1. Analyse expérimentale

Afin de déterminer les fréquences propres de la structure, il faut la faire entrer en vibrations. Les fréquences propres sont déterminées en regardant la fréquence des oscillations de la veine d'essai pour revenir à son état stable.

Pour ce faire, des coups de marteau en nylon sont donnés à différents endroits sur le banc de test :

- Axe du profil NACA
- Corps de la veine d'essai
- Tuyau amont court
- Tuyau amont long
- Tuyau aval

Chaque coup de marteau va faire vibrer la structure et grâce à l'accéléromètre, on mesure ces vibrations pour trouver les fréquences propres.

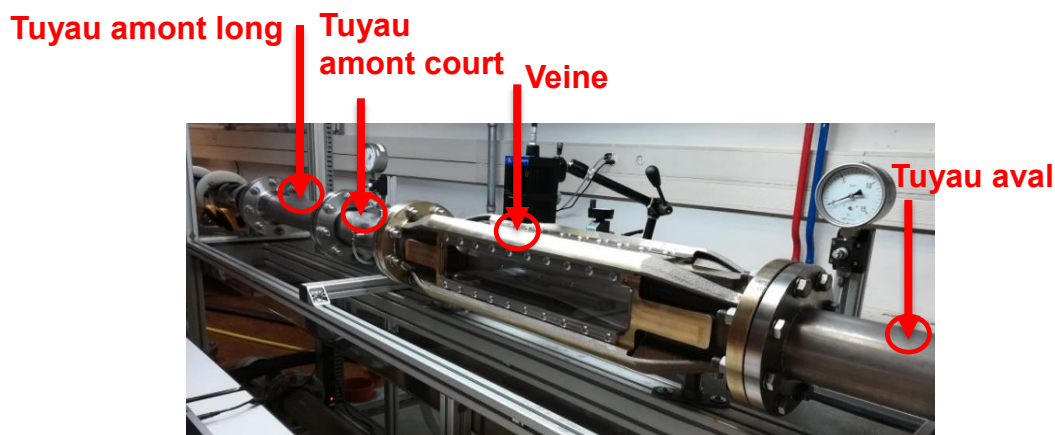


Figure 24: Emplacement et direction (flèche) du coup de marteau sur l'axe du profil NACA



Figure 25: Emplacement et direction (flèches) des coups de marteaux

Les mesures sont réalisées sur 30 secondes à une fréquence d'acquisition de 25 kHz. Durant les 30 secondes, plusieurs coups de marteaux sont frappés. Ces coups sont donnés afin d'être sûr d'avoir un signal propre sur les 30 secondes que dure la mesure.

Les mesures sont répétées 3 fois pour chaque point afin de certifier que les fréquences trouvées sur une mesure soient confirmées sur les autres.

L'analyse modale est réalisée une fois avec le circuit rempli d'eau et une fois avec le circuit vide. De cette manière, on peut déterminer les fréquences propres du banc de test dans l'air et dans l'eau.

6.2.2. Analyse numérique

L'analyse numérique a été réalisée sur ANSYS Workbench. Pour des raisons de temps, celle-ci a été réalisée uniquement pour le cas où la veine est vide.

La version disponible ANSYS Workbench ne permet l'utilisation maximale que de 200'000 nœuds. C'est pourquoi l'analyse numérique n'a pas pu être approfondie. Cependant, elle permet de compléter l'analyse modale expérimentale.

Conditions limites et hypothèses

Dans le cas de cette étude, les extrémités de l'ensemble qui compose la veine ont été caractérisées comme des supports fixes. De plus les zones de contact entre les éléments ont été définies comme « liées totalement ».

Pour ce qui est du maillage, les éléments sont tétraédriques, et le maillage est défini comme moyen. L'idéal aurait été d'ajuster le maillage à la main pour les différents composants de la veine, mais en raison d'un manque de temps évident, cela n'a pas pu être fait.

Les matériaux ont été définis comme suit :

- Corps de la veine : alliage de cuivre G-CuAl10Fe5Ni5-C avec une densité de 7600 kg/m³ et un module de Young de 124'000 MPa
- Paroi transparente : Plexiglas avec une densité de 1186 kg/m³ et un module de Young de 2600 MPa
- Bloc du capteur d'angle : alliage d'aluminium avec une densité de 2770 kg/m³ et un module de Young de 71'000 MPa
- Le reste des pièces sont considérées en acier standard avec une densité de 7850 kg/m³ et un module de Young de 200'000 MPa

Une fois toutes ces caractéristiques définies, on peut comparer les solutions trouvées sur ANSYS et les fréquences trouvées de manière expérimentale.

6.2.3. Comparaison des résultats

L'analyse expérimentale a permis de déterminer les fréquences propres du banc de test complet, tandis que l'analyse numérique a été réalisée uniquement sur l'ensemble veine, support et profil NACA, ce qui rend celle-ci moins fiable par rapport à la réalité mais donne quand même une idée sur les fréquences propres de cet ensemble.

Pour obtenir les fréquences de la structure, il faut traiter le signal obtenu en faisant une transformée de Fourier du signal. En effet la fonction Matlab utilisée pour traiter le signal est la fonction `fft()`. La formule mathématique qui régit cette fonction est la suivante :

$$Y(k) = \sum_{j=1}^n X(j) * W_n^{(j-1)(k-1)}$$

Avec X le signal d'entrée, donc ici le coup de marteau, n la longueur du signal et W_n qui est :

$$W_n = e^{(-2\pi i)/n}$$

La transformée de Fourier permet de faire une analyse fréquentielle des signaux non périodiques.²³ Chaque pic que la transformée donne, correspond à une fréquence de la structure.

Pour que les résultats soient cohérents, les FFT ont été analysé pour chaque point de mesures et pour les 3 tests. Les fréquences qui ont été retenues sont celles que l'on retrouve sur les 3 tests et pour chaque endroit où le coup de marteau a été donné.

L'amplitude de la FFT importe peu, car elle est dépendante de l'intensité du coup de marteau. Ce qui est important de remarquer c'est que pour les 3 tests les signaux se superposent, cela

²³ Francis Cottet, *Traitement du signal Aide-mémoire*, Chap. 2 Transformation de Fourier, 2000

crédibilise l'expérience. La totalité des résultats pour chaque point de mesure peuvent être consulté en annexe de ce rapport (Cf. annexe 6).

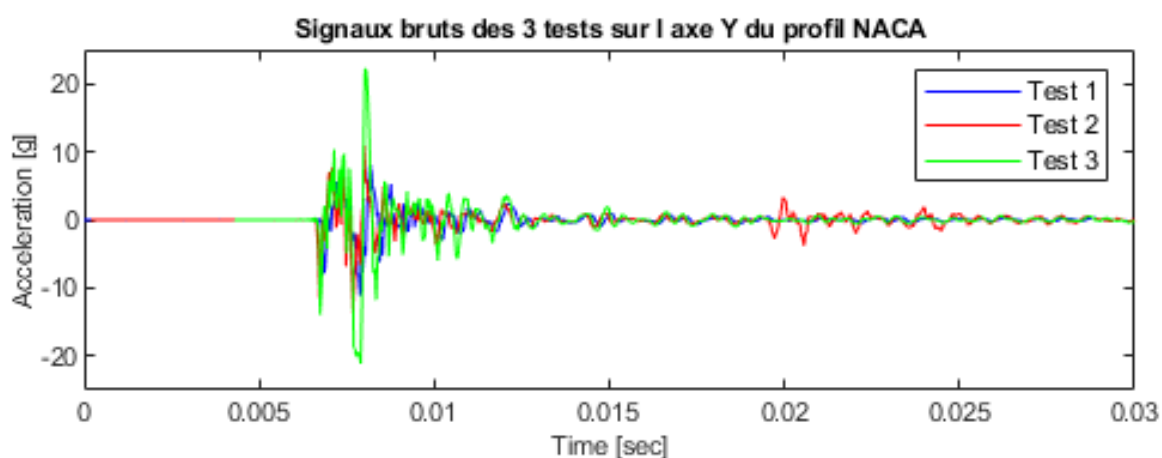


Figure 26: Réponse de l'accéléromètre pour les 3 coups de marteaux donnés sur l'axe du profil NACA dans l'air

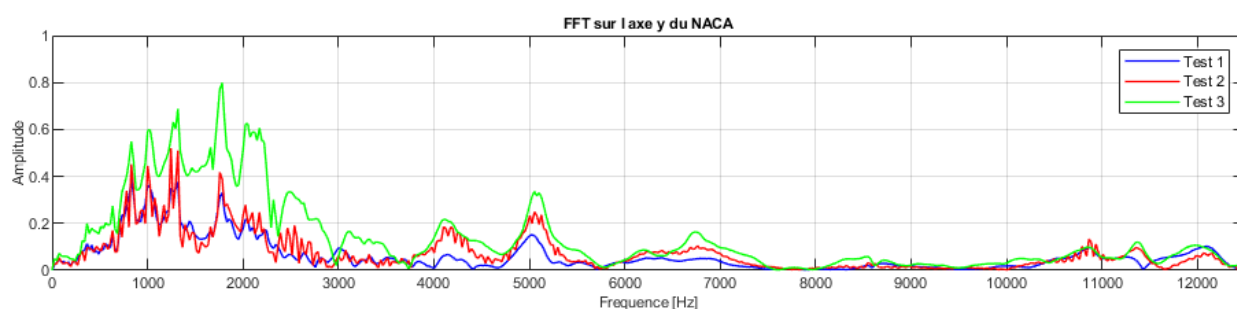


Figure 27: FFT du coup de marteau donné sur l'axe du profil NACA dans l'air dans la direction Y du référentiel du profil

Le tableau suivant récapitule les fréquences trouvées. Chaque fréquence présente dans ce tableau a été trouvée sur chacun des tests. Celles qui sont colorées, sont celles qui se retrouvent sur 4 des 5 points de mesure.

	Emplacement de l'impact				
	Axe du profil	Corps de la veine	Tuyau amont court	Tuyau amont long	Tuyau aval
Fréquences de réponse		600			
		650			
	700	720		715	710
	830	830			
	1000	930	1000		1050
	1250	1300	1250		1280
		1450			1430
	1750	1870			
	2220	2220	2050		2100
			2700	2600	2300
					3100
		4000			4320
	5054				

Figure 28: Tableau récapitulatif des fréquences propres trouvées pour l'analyse expérimentale dans l'air

Ainsi l'analyse modale expérimentale dans l'air montre que les fréquences propres de la structure restent basses, avec une fréquence maximale à 2200 Hz. Cela peut déjà permettre de conclure qu'il faudra être prudent sur l'interprétation des signaux au niveau des basses fréquences allant jusqu'à 3000 Hz.

L'analyse modale sur ANSYS est à interpréter prudemment. Comme il a été expliqué plus haut, elle n'a pas été travaillée dans le détail. Le but était d'avoir une comparaison entre la réalité et l'analyse numérique.

La veine d'essai est composée de nombreux d'éléments, certains beaucoup plus gros que d'autres et comme le maillage n'a pas été longuement travaillé, cela peut être source d'erreurs. De plus, la liaison entre ces éléments a été choisie comme « liée totalement », ce qui en réalité n'est pas forcément le cas.

Au final, celle-ci donne 30 modes de fréquences allant de 200 Hz à 2300 Hz.

L'analyse numérique permet de retrouver les mêmes fréquences que celles trouvées par l'analyse expérimental. Cependant, l'on peut remarquer qu'elle trouve énormément d'autres fréquences. Cela est dû au fait qu'elle va trouver les fréquences propres de chaque élément qui composant l'ensemble veine, support et profil NACA. Dans la réalité, pas tous les éléments auront une influence sur la fréquence propre de la structure. Cela dépend essentiellement de la masse de l'élément. Si elle est très faible par rapport au reste de la structure, alors son influence le sera également.

Cette analyse est surtout utile pour voir les modes de fréquences qui sont les suivants :

- Mode 6 : Flexion du NACA pour une fréquence de 754.9 Hz

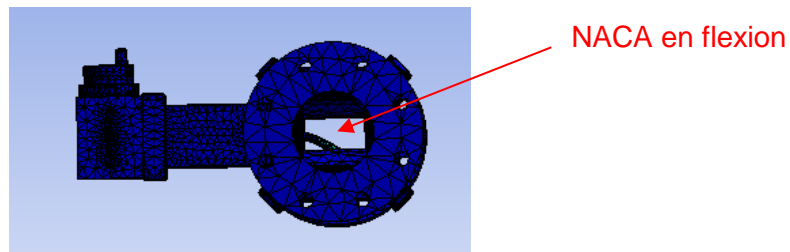


Figure 29: Mode 6 à 754.9 Hz avec le profil NACA en flexion

- Mode 12 : Combinaison de flexion / torsion de la veine avec 3 nœuds à une fréquence de 981.16 Hz

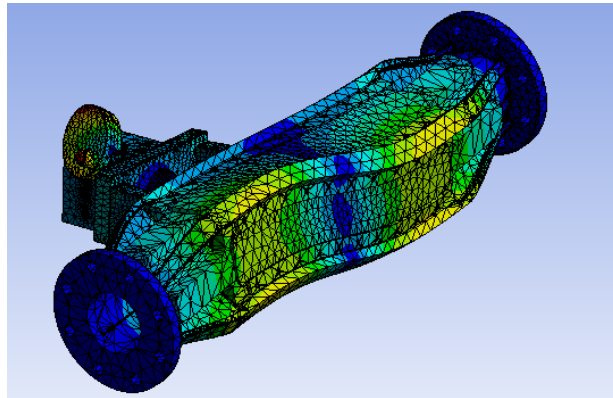


Figure 30: Mode 12 à 981.16 Hz

- Mode 15 : Combinaison de flexion / torsion de la veine avec 2 nœuds à une fréquence de 1310.8 Hz

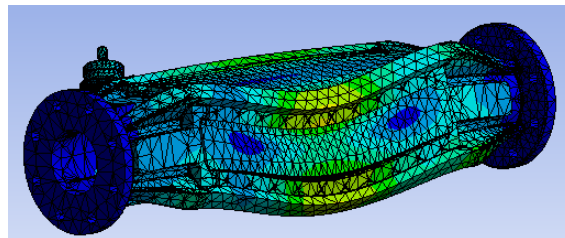


Figure 31: Mode 15 à 1310.8 Hz

- Mode 28 : Torsion de la veine à une fréquence de 2222 Hz

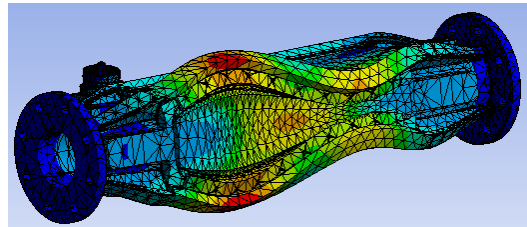


Figure 32: Mode 28 à 2222 Hz

Tous les modes cités correspondent aux fréquences trouvées dans l'analyse expérimentale.

Pour l'analyse expérimentale dans l'eau, l'on ne peut pas la comparer avec l'analyse numérique car le milieu est différent. Cependant, il est intéressant de voir comment les fréquences propres évoluent entre l'air et l'eau.

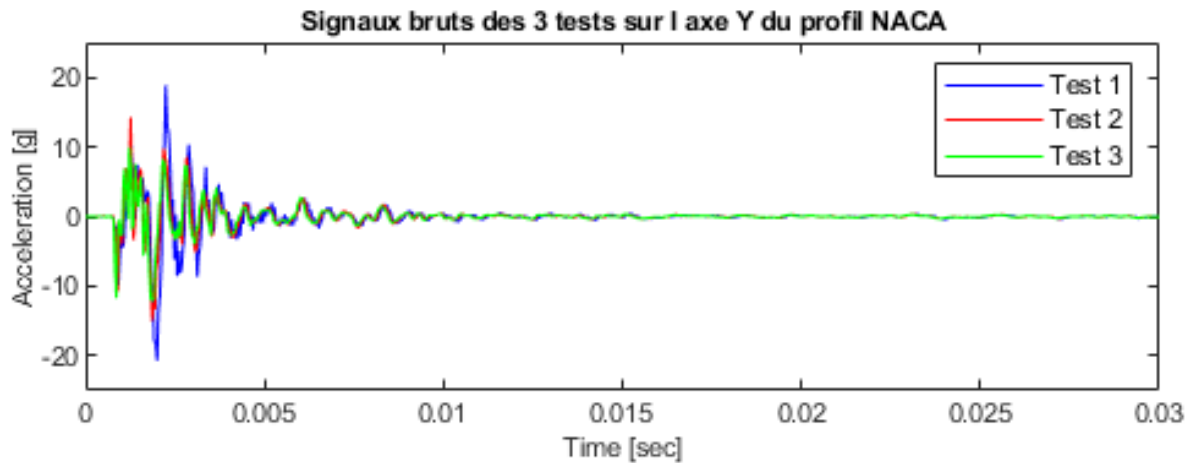


Figure 33: Réponse de l'accéléromètre pour les 3 coups de marteau donné sur l'axe du profil NACA dans l'eau

Comme pour l'air, les fréquences retenues sont celles qui se répètent sur les 3 tests.

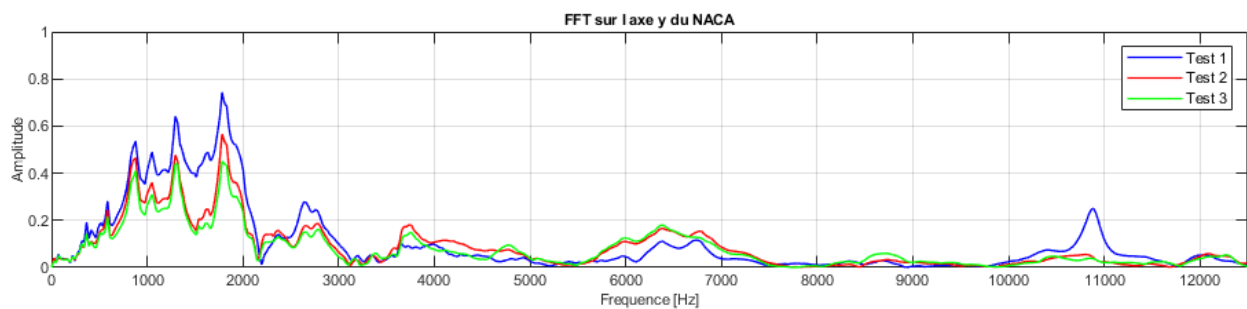


Figure 34: FFT du coup de marteau donné sur l'axe du profil NACA dans l'eau dans la direction Y du référentiel du profil

Les 3 mesures se superposent parfaitement, il n'y a que pour le premier test ou un pic apparaît aux alentours des 11 kHz tandis que pour les autres ce n'est pas le cas.

De même que pour l'analyse modale dans l'air, vous trouverez tous les résultats pour chaque point de mesures en annexe de ce rapport (Cf. annexe 7).

Le tableau suivant récapitule les fréquences trouvées pour chaque test et chaque point de mesure.

	Emplacement de l'impact				
	Axe du profil	Corps de la veine	Tuyau amont court	Tuyau amont long	Tuyau aval
Fréquences de réponse		256			
	586	600		530	525
	850	750	850		
	1000		950	970	970
	1300	1300			
			1650		
	1800	1800	1800	1900	1900
	2200		2000		
		3000			
	3700				

Figure 35: Tableau récapitulatif des résultats trouvés pour l'analyse modale expérimentale dans l'eau

On remarque que les fréquences trouvées sont plus faibles que celles mesurées dans l'air. Cette différence est due au fait que l'eau vient rajouter de la masse à la structure.

La fréquence de 2200 Hz trouvée dans l'air peut correspondre à la fréquence de 1800 Hz trouvée dans l'eau, soit une baisse d'environ 20% de la fréquence.

La fréquence de 1300 Hz mesurées dans l'air peut correspondre à la fréquence de 1000 Hz trouvée dans l'eau ce qui donnerait une baisse de 30% de la fréquence propre.

Tous ces résultats permettent de conclure sur le fait que les fréquences propres du banc de test ne dépassent pas les 3000 Hz. C'est pourquoi, il faudra être attentif lors du post-traitement des mesures, à bien différencier les réponses en fréquence de la structure avec celles de la cavitation.

6.3. Carte de cavitation

Une fois l'analyse modale terminée et les fréquences propres de la structure connues, on peut débiter les mesures de la cavitation à proprement parler.

Il s'agit tout d'abord d'observer le phénomène sous toutes ces formes et de le caractériser au niveau du banc de test à disposition. C'est pourquoi cette étude commence par la détection visuelle.

A l'aide de la caméra Phantom V411, la veine d'essai va être caractérisée par rapport aux différentes formes de cavitation que l'on peut trouver. Le but est de savoir pour tel paramètre de cavitation donné et pour tel angle d'incidence choisi, quelle forme de cavitation l'on obtient (poches, bulles séparées etc..).

Pour quantifier tout ça, on a réalisé une carte de cavitation c'est-à-dire un graphique qui représente le paramètre de cavitation sigma en fonction de l'angle d'incidence. De cette manière on peut connaître pour chaque sigma donné et pour chaque angle d'incidence voulu quelle forme de cavitation sera présente. Bien sûr cette carte n'est valable que pour le profil NACA0015, elle fait office de carte d'identité.

Ce graphique délimite donc les zones où l'on trouvera telle ou telle forme de cavitation.

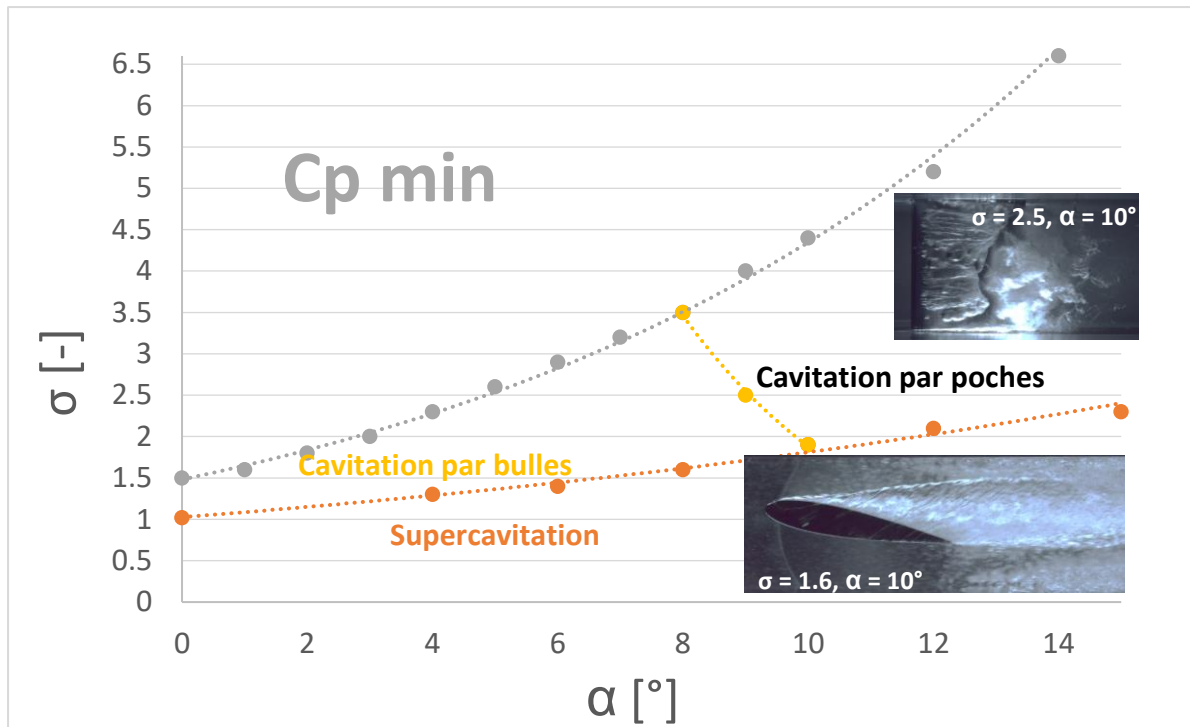


Figure 36: Carte de cavitation de la veine d'essai de la HES-SO Valais/Wallis équipée du profil NACA0015

Cette carte donne de manière qualitative les zones où se développent les différents régimes de cavitation. Il est important de noter que celle-ci a été réalisée à partir de constatation visuelle et qu'elle n'est pas basée sur des résultats chiffrés. Elle sert simplement à indiquer de manière plus ou moins précise comment obtenir une certaine forme de cavitation en fonction de σ et de l'angle d'incidence.

6.4. Post-traitement des signaux

La détection visuelle a permis de savoir où on se situe en fonction du paramètre de cavitation et de l'angle d'incidence. À partir de là on peut définir les points de mesures intéressants à regarder.

La réflexion de départ dans le choix des points de mesures était de coller le plus possible par rapport à la réalité des centrales hydroélectriques. Dans des conditions optimales d'exploitation, l'angle d'incidence des aubes de la turbine sera relativement faible. Le problème est que l'on ne peut pas atteindre les vitesses et les pressions comme dans une centrale hydraulique et donc il est difficile de travailler avec un angle d'incidence faible dans ce cas d'étude. De plus, ce n'est généralement pas le cas de la supercavitation qui intervient dans les machines hydrauliques donc il n'est pas intéressant de travailler dans ce régime de cavitation.

La deuxième réflexion qui en a suivi était d'effectuer des points de mesures sans cavitation avec un σ donné. De la sorte on mesure les vibrations dues à l'écoulement de l'eau et du fonctionnement des pompes. Ensuite pour ce même σ , en changeant l'angle d'incidence

pour obtenir de la cavitation, on refait les mêmes mesures. De cette manière il est plus facile de savoir le véritable effet de la cavitation.

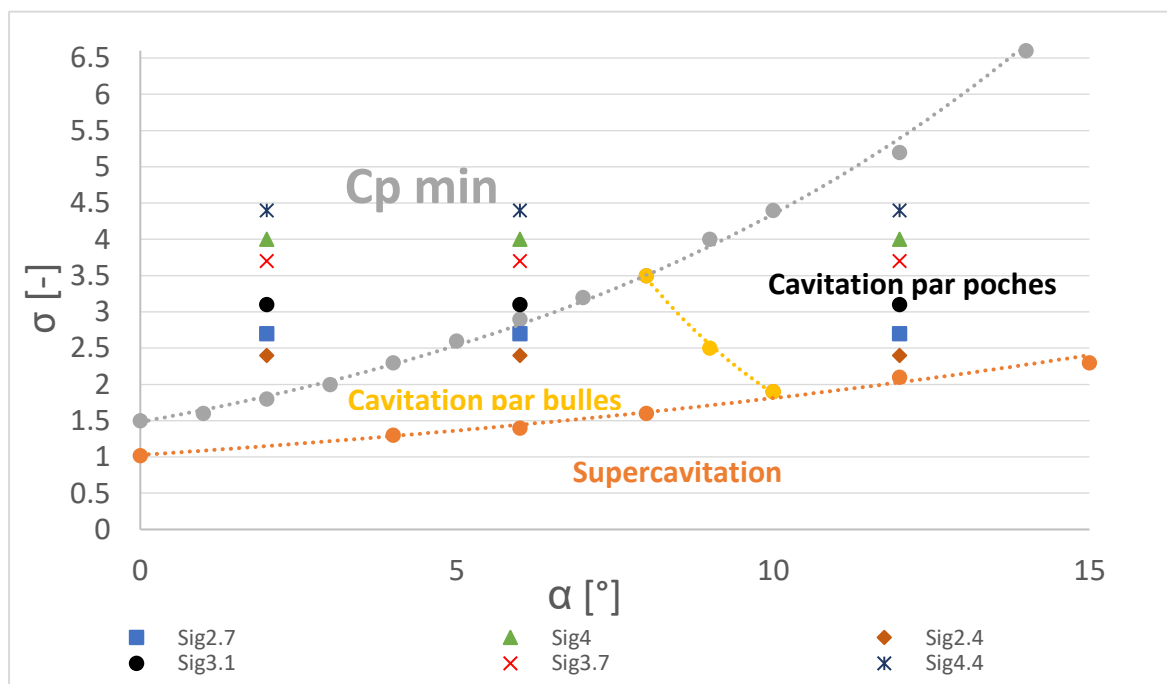
Ainsi il a été décidé de faire des mesures pour trois incidences et 6 sigmas différents :

		Angle d'incidence		
		2°	6°	12°
Paramètre de cavitation σ	2.4			
	2.7			
	3.1			
	3.7			
	4			
	4.4			

→ Directions d'analyse

Figure 37: Tableau récapitulatif des points de mesures. En vert les points étudiés

Pour chaque sigma, on a une référence de mesures pour l'angle de 2° où il n'y a pas de cavitation. Si l'on répertorie tous les points sur la carte de cavitation, cela donne le résultat suivant :



Avec les points de mesures choisis, on balaie toutes les zones sauf celle de la supercavitation.

Figure 38: Carte de cavitation de la veine d'essai de la HES-SO Valais/Wallis pour le profil NACA0015 avec les points de mesures réalisés

Tous ces points de mesures vont permettre la comparaison des signaux des différents paramètres de cavitation et de voir si ceux-ci ont la même signature fréquentielle.

6.4.1. Accéléromètre

Toutes ces mesures seront analysées par capteur afin de bien étudier les résultats de chacun avant de pouvoir les comparer.

Comme les mesures ont été réalisées sur 120 secondes, il y a une quantité d'information conséquente. Le but n'est pas d'analyser le signal sur 2 minutes car on ne verrait pas la véritable influence de la cavitation sur le signal brut.

Pour déterminer le temps de mesure à prendre, il faut regarder la durée de vie d'une poche qui se forme sur le profil. Comme la cavitation est un phénomène pulsé mais régulier, les poches de vapeur apparaissent et disparaissent de manière constante. Pour déterminer cette durée de vie, il faut analyser les vidéos faites avec la caméra Phantom V411.

Sur tous les sigmas mesurés, il apparaît seulement sur le plus petit que la poche de vapeur disparaît totalement. On se réfère donc sur la vidéo du sigma 2,4 pour un angle d'incidence de 12° .

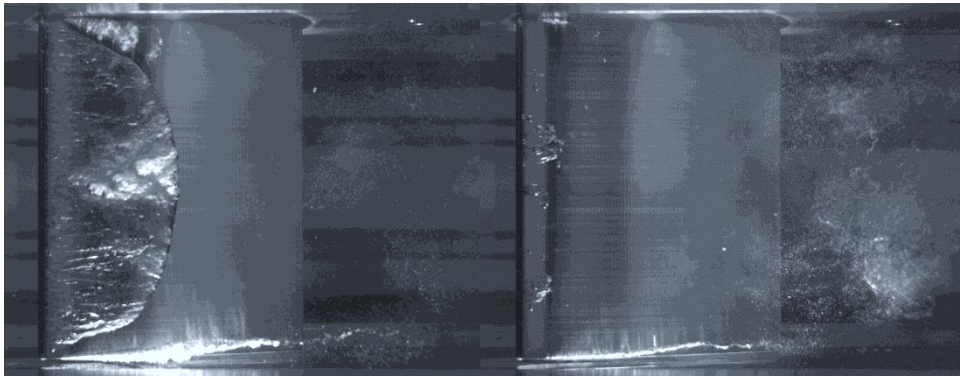


Figure 39: Apparition et disparition de la poche de vapeur pour un sigma de 2.4 et un angle d'incidence de 12°

Pour déterminer la durée de vie, il suffit d'ouvrir la vidéo sur le programme Phantom qui gère la caméra. Dans le lecteur de la vidéo, on peut trouver la durée de celle-ci en μs .

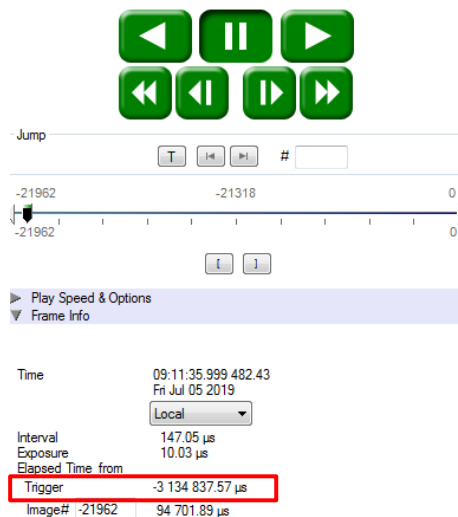


Figure 40: Lecteur de vidéo du programme Phantom avec le temps de la vidéo encadré en rouge

Pour connaître le temps que vit une poche de vapeur, il faut mesurer le temps qu'elle met pour partir de son état initial et y revenir. C'est-à-dire, le temps qu'elle fait depuis le moment où elle n'existe plus jusqu'au moment où elle disparaît à nouveau. Le trigger mis en évidence sur la figure 40, indique le temps restant de la vidéo. En faisant la différence entre le temps donné par le trigger ou point de départ et le temps à l'arrivée, on obtient la durée de vie d'une poche.

En mesurant le temps sur plusieurs poches, on trouve une durée d'environ 50ms. Ainsi pour avoir une mesure sur plusieurs périodes, on décide de prendre une durée d'échantillon de 0.5 secondes. De la sorte, on sait que l'on mesure l'apparition et la disparition d'une dizaine de poches cavitantes.

Cela a pour résultat sur les signaux de l'accéléromètre, de sortir un pic à chaque fois qu'une poche apparaît. On peut remarquer que la cavitation est plus ou moins périodique avec un temps entre chaque pic relativement égal.

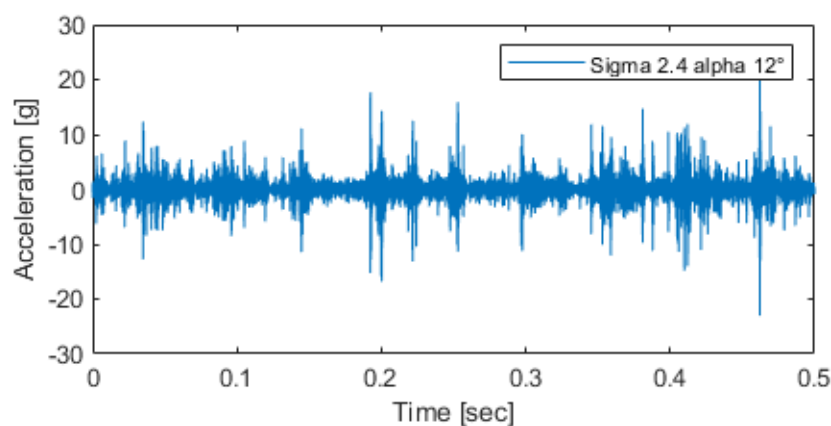


Figure 41: Signal de sortie de l'accéléromètre pour un sigma de 2.4 et un angle de 12°

Le graphe ci-dessus montre clairement la différence lorsque la poche apparaît ou disparaît. Chaque pic obtenu est le résultat de la cavitation. Il est important de noter que l'accéléromètre sature pour des accélérations supérieures à 23 g. Cela n'est pas normal car selon ces caractéristiques techniques, il accepte des accélérations de ± 100 g. Malheureusement des

tests n'ont pas pu être effectués pour trouver le problème. Cependant, dans le cas qui est présenté ici, cette saturation est négligeable, car sur tous les pics que comporte le signal seulement un est coupé. De plus, un signal coupé a simplement pour conséquence de créer une harmonique dans la réponse en fréquence et comme une infime partie de signal est coupée l'influence est donc négligeable.

Le signal brut peut déjà apporter beaucoup d'informations sans forcément faire une analyse fréquentielle. Comme il a été dit précédemment, les mesures ont été réalisées pour 6 sigmas différents, 3 à vitesse constante et pression variable et 3 à pression constante et vitesse variable. Par la suite il s'est avéré plus judicieux de varier seulement la pression pour faire varier le paramètre de cavitation car la vitesse de l'écoulement influence beaucoup le comportement de la structure et des vibrations du profil. C'est pourquoi il vous sera présenté ici les résultats pour les 3 sigmas à vitesse constante, c'est-à-dire les sigmas 2.4, 3.7 et 4.4.

La première constatation qui peut être faite au niveau de l'amplitude du signal brut, c'est que celle-ci diminue au fur et à mesure que le paramètre de cavitation augmente.

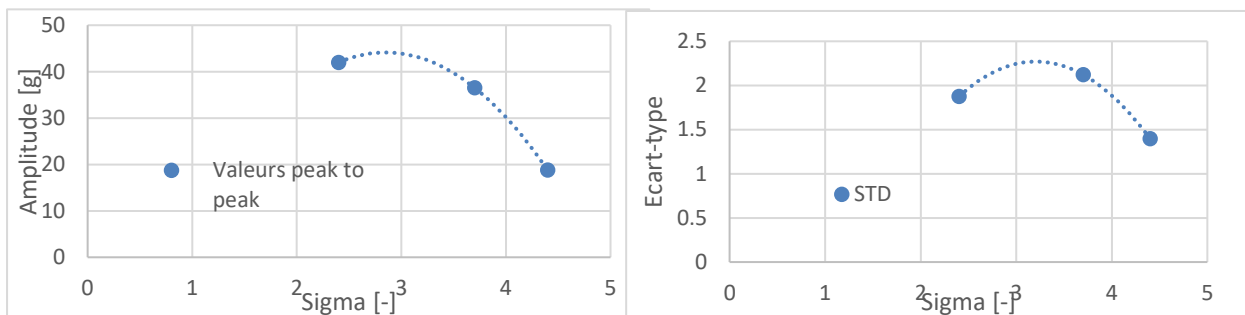


Figure 42: Courbe montrant l'évolution de la valeur peak to peak en fonction de sigma pour un alpha de 12° et l'autre montrant l'évolution de l'écart-type

Cela montre que l'intensité des implosions des poches de vapeur diminue si la valeur du paramètre de cavitation augmente. La valeur de l'écart-type n'évolue pas comme attendue. En effet, plus l'intensité des implosions est faible plus la dispersion des valeurs du signal doit être faible aussi. Il est intéressant de le constater mais celle-ci n'influencera pas le post-traitement.

Autre valeur importante, c'est la moyenne du signal brut. En effet si celle-ci n'est pas égale à zéro c'est que l'accéléromètre est mal calibré. Après vérification, la moyenne est des signaux est effectivement à zéro.

Une fois que les valeurs données par l'accéléromètre sont vérifiées et étudiées dans leur état brut, on peut commencer à traiter le signal obtenu.

Pour étudier le signal, les deux outils suivant ont été utilisé :

- La fonction periodogram
- La fonction spectrogram

Ces deux outils sont deux fonctions du programme Matlab. Le périodogramme est une fonction mathématique qui permet de calculer la densité spectrale d'un signal, c'est-à-dire la transformée de Fourier de sa fonction de covariance (autocorrélation).²⁴ La fonction d'autocorrélation permet de comparer le signal avec lui-même : « *Les fonctions de corrélation traduisent la similitude d'un signal ou de deux signaux au niveau de la forme et de la position en fonction du paramètre de translation t.* »²⁵

Mathématiquement parlant la fonction d'autocorrélation d'un signal $x(t)$ est définie par :

$$C_x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(\theta) * \bar{x}(\theta - t) * d\theta$$

Celle-ci permet de comparer le signal avec lui-même au cours du temps.²⁶

Si la transformée de Fourier du signal $x(t)$ est $X(f)$ alors la densité spectrale se définit par :

$$S_x(f) = X(f) * \bar{X}(f) = |X(f)|^2$$

Avec $\bar{X}(f)$ qui est le conjugué de $X(f)$.

Le périodogramme est une estimation non paramétrique de la densité spectrale.²⁷ Matlab définit la fonction periodogram pour un signal x_n de la manière suivante :

$$\hat{P}(f) = \frac{\Delta t}{N} \left| \sum_{n=0}^N x(t) * e^{-i2\pi f n} \right|^2, \quad -\frac{1}{2\Delta t} < f \leq \frac{1}{2\Delta t}$$

L'élévation de la somme au carré, va engendrer l'atténuation des petites valeurs (< 1) et l'amplification des plus grandes (> 1).

Pour compléter l'analyse réalisée avec le périodogramme, la deuxième fonction qui sera utilisée est le spectrogramme.

²⁴ Michel Prenat, *Séries temporelles*, Chap. 4 Covariance et densité spectrale, 2012

²⁵ Francis Cottet, *Traitement du signal Aide-mémoire*, Chap. 3 Système de transmission, 2000

²⁶ Ibidem

²⁷ Michel Prenat, *Séries temporelles*, Chap. 4 Covariance et densité spectrale, 2012

Le spectrogramme va permettre de représenter l'intensité des fréquences mesurées au cours du temps. Il consiste en un graphique dont l'axe des abscisses représente le temps et celui des ordonnées la fréquence. L'intensité du signal est marquée par une couleur plus ou moins foncée.

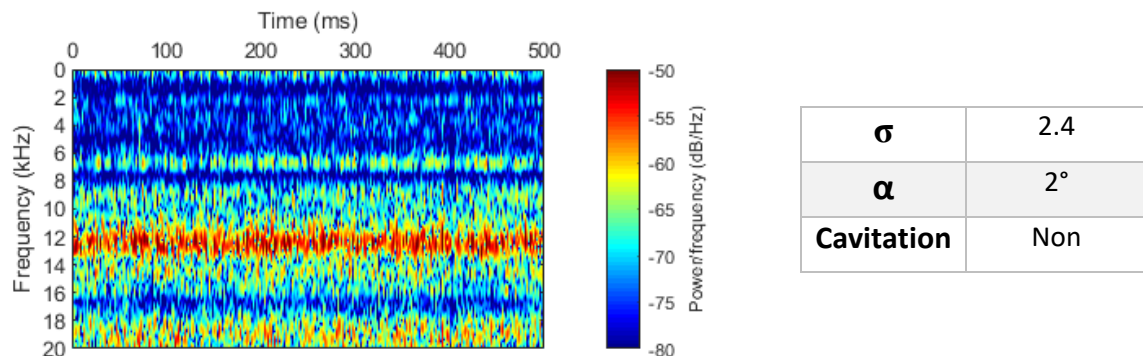


Figure 43: Spectrogramme pour un sigma de 2.4 et un angle d'incidence de 2°

Les premières analyses montrent que sans cavitation l'accéléromètre donne déjà des pics de fréquences.

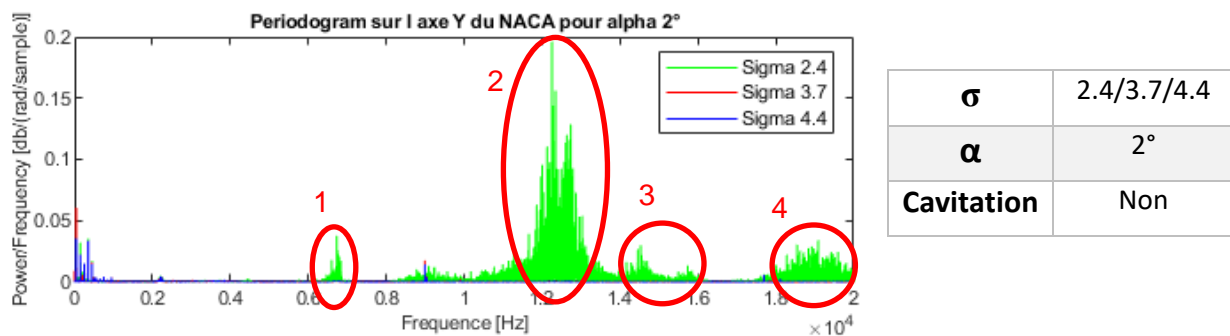


Figure 44: Périodogramme sur l'axe Y du profil NACA pour un angle d'incidence de 2° et pour sigma 2.4, 3.7, 4.4.

4 zones de fréquences apparaissent. La numéro 1 autour des 6 kHz, la 2 à environ 12 kHz, la 3 entre 14 et 16 kHz et enfin la 4 à plus de 18 kHz. Les zones 1 et 2 étaient apparues sur l'analyse modale mais avec une amplitude très faible pour la première. Pour le pic à 12 kHz l'analyse modale ne l'avait fait ressortir que sur un test, ce qui est pourquoi il n'a pas été retenu comme fréquence propre de la structure. De plus ces pics ne ressortent clairement que pour le sigma 2.4, pour les autres valeurs de sigmas, ces fréquences ont des amplitudes très faibles.

La différence entre les 3 paramètres de cavitation, c'est que pour le sigma 2.4 le circuit hydraulique est à pression atmosphérique au niveau du réservoir pressurisable tandis que pour les deux autres celui-ci est mis en pression.

On ne connaît pas la provenance de ces pics mais une possibilité est que ce sont les pompes de recirculation qui cavitent. Cela peut faire du sens car une fois le circuit mis en pression celles-ci ne cavitent plus et les pics de fréquences disparaissent.

Si l'on compare les périodogrammes pour un même angle d'incidence, mais avec un point de mesure avec de la cavitation et un autre point sans cavitation, on observe que ces pics qui avaient une faible amplitude et donc qui existait sans cavitation, sont énormément amplifiés par les bulles de vapeur. L'on peut observer cela pour l'angle d'incidence de 6° . Pour un sigma de 2.4 il y a de la cavitation qui apparait tandis que pour les sigmas 3.7 et 4.4 la cavitation n'existe pas.

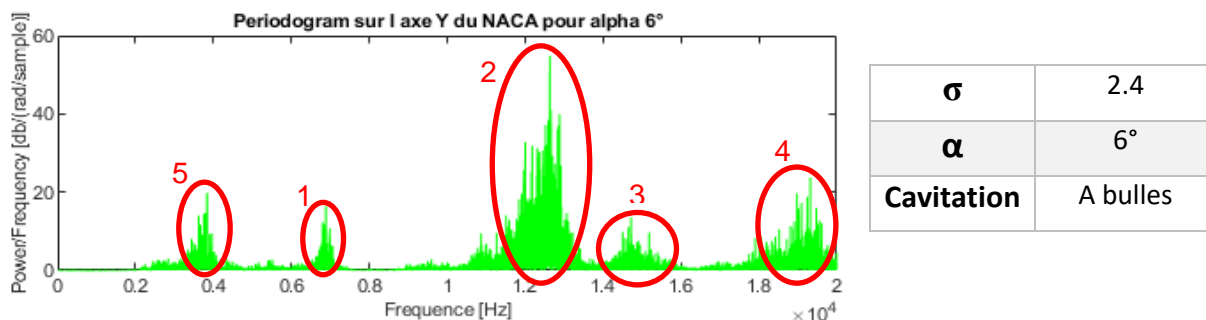


Figure 45: Periodogram sur l'axe Y du profil NACA pour un angle d'incidence de 6° et un sigma de 2.4

Comme le montre le graphe ci-dessus lorsqu'il y a de la cavitation pour un angle d'incidence de 6° , les pics que l'on voyait sans cavitation apparaissent à nouveau mais avec une amplitude plus grande. Cependant, l'on peut remarquer qu'un nouveau pic de fréquence est apparu entre 2 et 4 kHz.

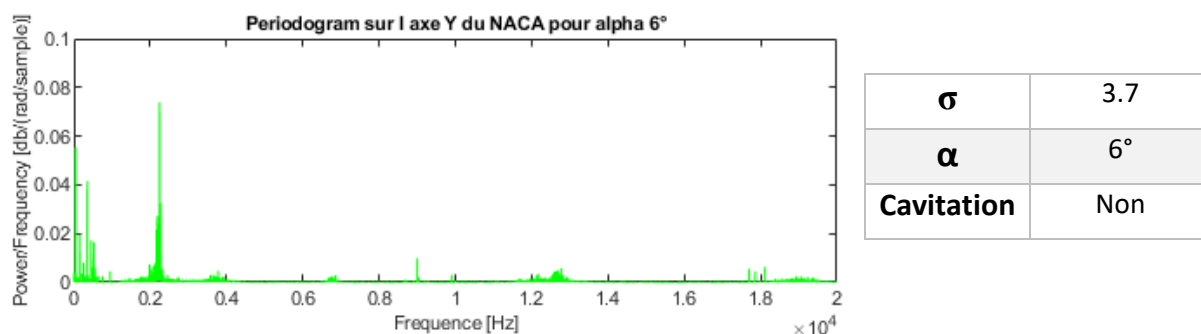


Figure 46: Periodogram sur l'axe Y du profil NACA pour l'angle d'incidence de 6° et un sigma de 3.7

Pour le sigma de 3.7, le circuit est mis en pression, ce qui fait que les pompes de recirculation ne cavitent plus. L'amplitude est beaucoup plus faible mais les pics sont présents. Cela montre bien qu'ils ne sont pas dus à la cavitation. Cette observation permet de dire qu'il ne sert à rien de regarder les fréquences jusqu'à 20 kHz, car toutes celles que l'on obtient au-dessus de 12 kHz ne proviennent pas de la cavitation qui se produit sur le profil.

De plus la zone entre 6 et 8 kHz montre aussi des pics de fréquences lorsqu'il n'y a pas de cavitation et ceux-ci sont aussi amplifiés lorsque le phénomène apparaît. On peut donc aussi éliminer cette zone et regarder les fréquences jusqu'à 6 kHz.

Si l'on analyse les signaux de l'accéléromètre à l'aide du spectrogramme, l'on arrive aux mêmes conclusions.

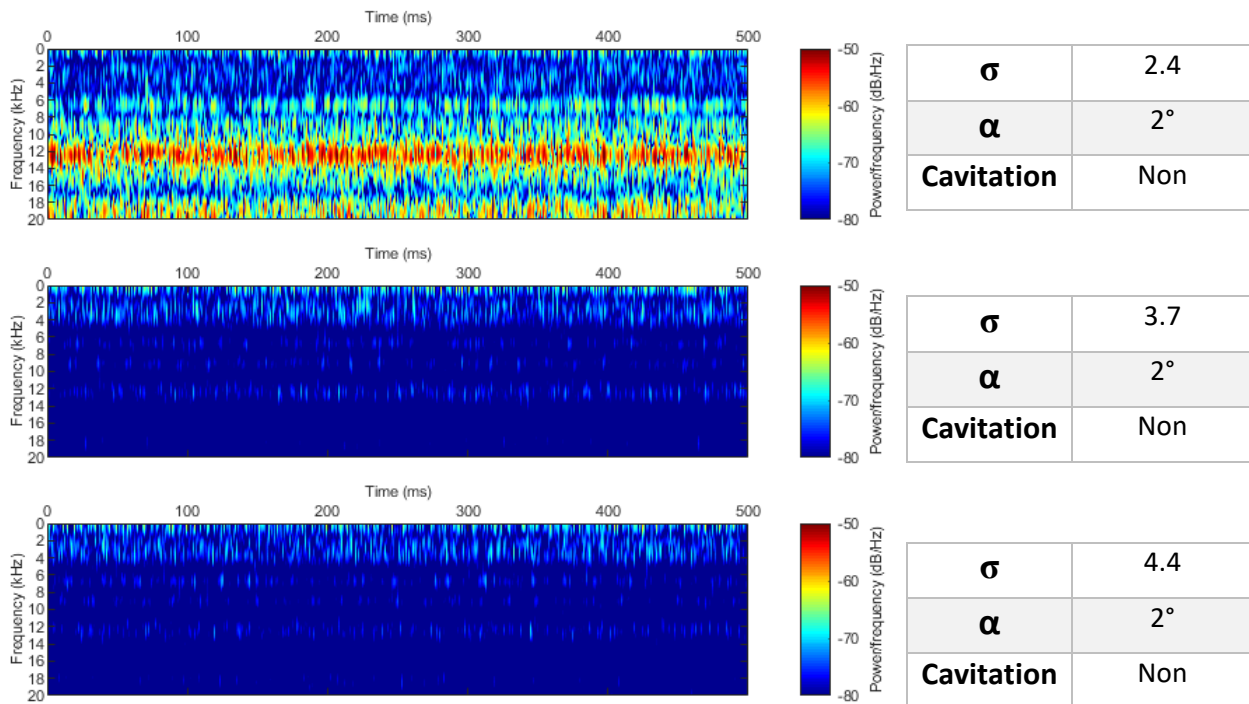


Figure 47: Spectrogramme pour $\alpha 2^\circ$ et σ (de haut en bas) de 2.4, 3.7, 4.4

L'image ci-dessus met bien en évidence les bandes de fréquences qui apparaissent sans cavitation et celles-ci correspondent aux pics que donnait le périodogramme. Dans le cas des 3 sigmas elles apparaissent avec plus ou moins d'intensité, mais cela permet de mettre de côté ces fréquences et d'étudier dorénavant les signaux seulement jusqu'à 6 kHz.

Si à partir de là on analyse les résultats obtenus pour l'angle d'incidence de 12° , l'on peut observer 2 choses.

La première c'est que deux pics ressortent très clairement entre 0 et 6 kHz. Le premier autour de 2200 Hz et le second à environ 3800 Hz. Le premier correspond à une des fréquences propres trouvées lors de l'analyse modale.

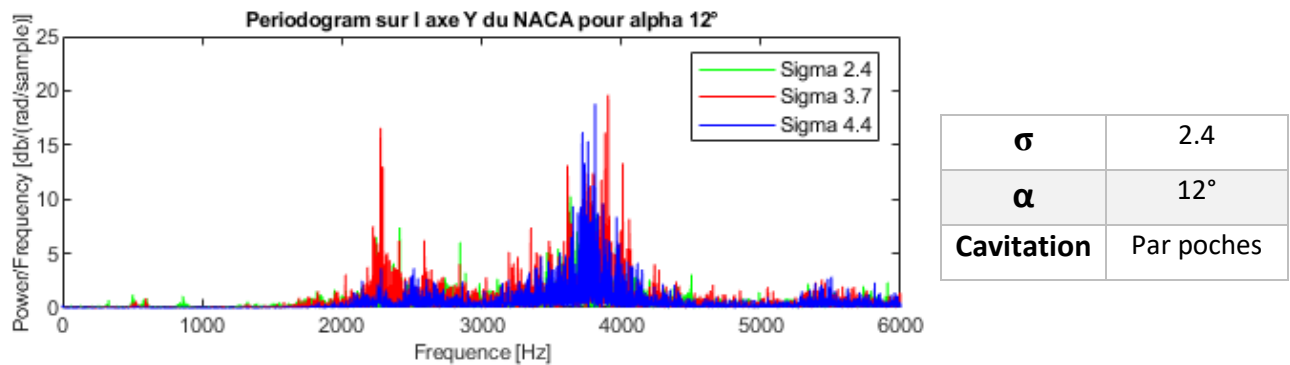


Figure 48: Periodogram sur l'axe Y du profil NACA pour un angle d'incidence de 12° et pour les 3 valeurs de sigmas de 2.4, 3.7, 4.4

Lors de l'analyse modale, le second pic que l'on trouve ici n'était pas ressorti pour tous les points de mesures c'est pourquoi il n'a pas été mis en avant. Mais il s'avère que la fréquence de 3700 Hz est apparue sur la mesure effectuée sur l'axe du profil NACA et cela peut signifier que cette fréquence correspond à la fréquence propre de l'axe du profil mais pas de la structure complète.

Cependant il ne faut pas négliger totalement ces résultats dû au fait que les fréquences trouvées correspondent à des fréquences propres. Le spectrogramme permet de voir plus clairement ce que l'accéléromètre voit au cours du temps.

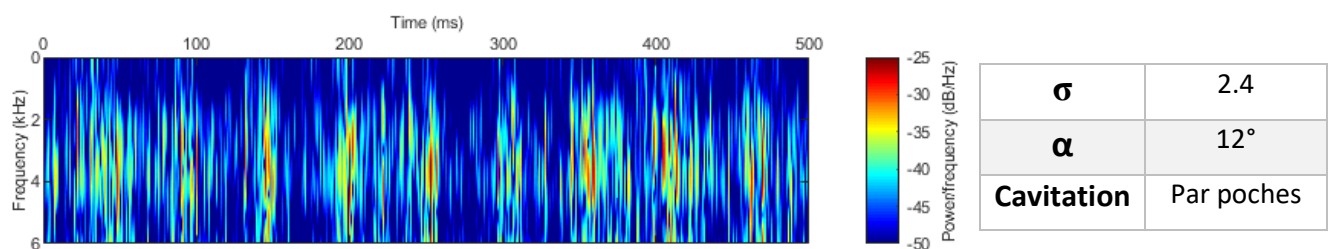


Figure 49: Spectrogramme pour le sigma de 2.4 et l'angle d'incidence de 12°

Le spectrogramme met clairement en avant le fait que la cavitation est pulsée pour le sigma de 2.4. On peut voir facilement que pour la zone de fréquence entre 3 et 5 kHz l'intensité du signal n'est pas constante. Si l'on regarde l'espacement entre les zones marquées en rouge, l'on voit que celui-ci est régulier et d'une durée d'environ 50 ms, ce qui est la durée de vie d'une poche de vapeur.

De ce fait, on peut sans risque lié les fréquences trouvées par l'accéléromètre à la cavitation. Le périodogramme ne permet pas de montrer le fait que la cavitation pulse, ce qui peut laisser des doutes sur les pics de fréquences trouvées. Cependant le spectrogramme le montre bien, ces fréquences sont liées à la cavitation et pas seulement au fait qu'elles correspondent aux fréquences propres de la structure.

Ne voulant pas mettre tous les graphes réalisés dans ce rapport, vous trouverez en annexe chaque périodogramme et spectrogramme pour toutes les incidences choisies et les sigmas voulus (Cf. annexe 8).

6.4.2. Microphone

Comme pour l'accéléromètre les mesures pour le microphone ont été faites sur 120 secondes. En réalité les mesures sont synchronisées entre les deux capteurs ce qui permet de pouvoir mesurer exactement la même chose. De ce fait, seulement les 50 premières millisecondes seront observées et analysées comme pour l'accéléromètre.

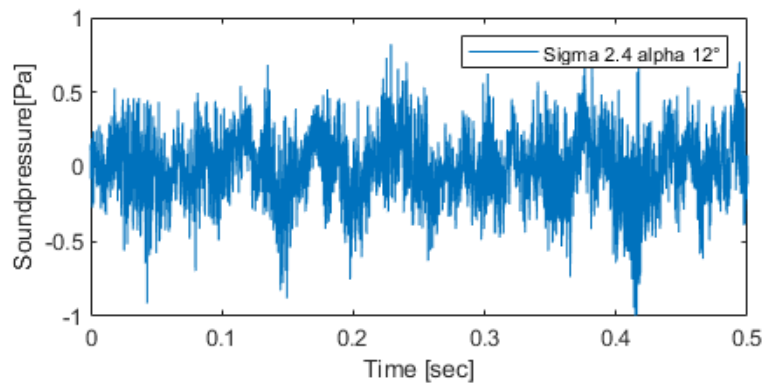


Figure 50: Signal brut du microphone pour un sigma de 2.4 et un angle d'incidence de 12°

Le signal brut du microphone n'est pas de la même forme que celui de l'accéléromètre. Les implosions dues à la cavitation ne se voient pas aussi clairement. Cependant l'on peut remarquer que le signal ondule et n'est pas périodique.

L'amplitude du signal diminue lorsque la valeur du paramètre de cavitation augmente, ce qui montre à nouveau que l'intensité des implosions dépend du sigma de l'écoulement.

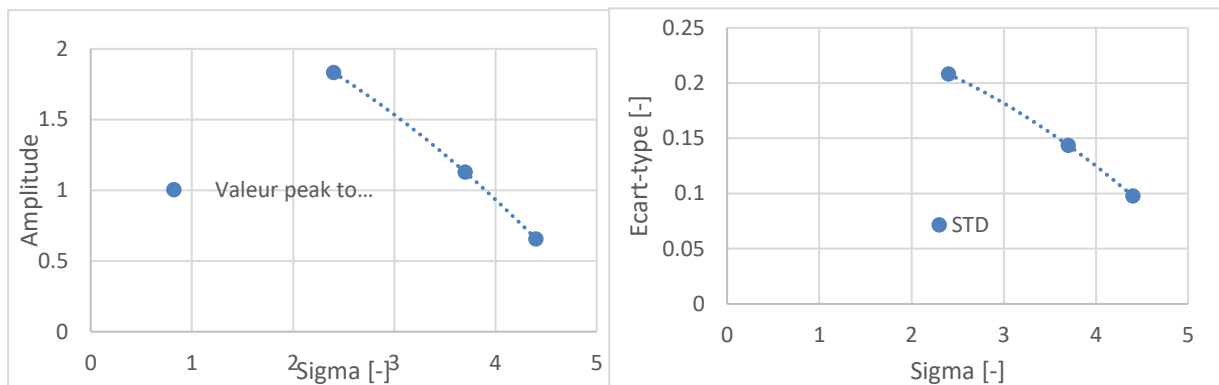


Figure 51: Courbe représentant l'évolution de la valeur peak to peak en fonction de sigma (gauche) et l'écart-type (droite)

L'on remarque aussi que l'écart-type diminue avec l'augmentation du sigma, cela est logique, car si l'amplitude diminue alors la dispersion doit diminuer aussi.

Pour ce qui est de la valeur moyenne du signal, celle-ci est comme attendue égale à zéro pour tous les sigmas choisis.

Pour étudier le signal du microphone, c'est essentiellement la fonction spectrogramme qui est utilisée. Comme il a été expliqué pour l'accéléromètre, celle-ci permet de voir au cours du temps quelles fréquences apparaissent ou non.

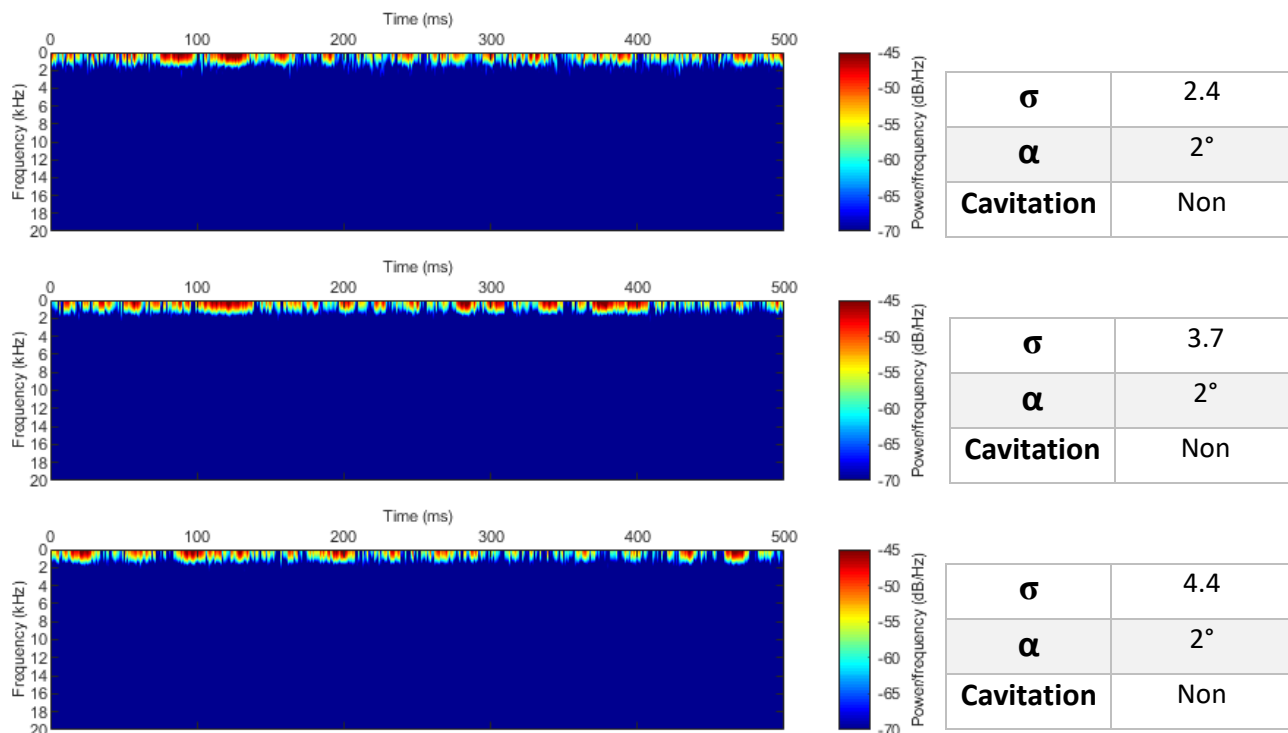


Figure 52: Spectrogramme pour un angle d'incidence de 2° sans cavitation et des sigma (de haut en bas) de 2.4, 3.7, 4.4

Afin de pouvoir comparer les résultats du microphone avec ceux de l'accéléromètre, ce seront les trois mêmes sigmas qui seront étudiés, c'est-à-dire ceux avec la même vitesse dans l'écoulement.

En mesurant le bruit de fond que fait l'installation lorsque les pompes tournent, on se rend compte que le microphone détecte des basses fréquences avec une grande intensité.

Sachant cela, on peut exclure de la zone entre 0 et 2 kHz car il sera quasi impossible de distinguer la cavitation du bruit ambiant que mesure le microphone. De plus la cavitation n'émet pas de bruit strident, on peut donc enlever la zone supérieure à 10 kHz de la zone de recherche. Au final, on peut s'intéresser à la même zone de fréquence que pour l'accéléromètre, c'est-à-dire jusqu'à 6 kHz.

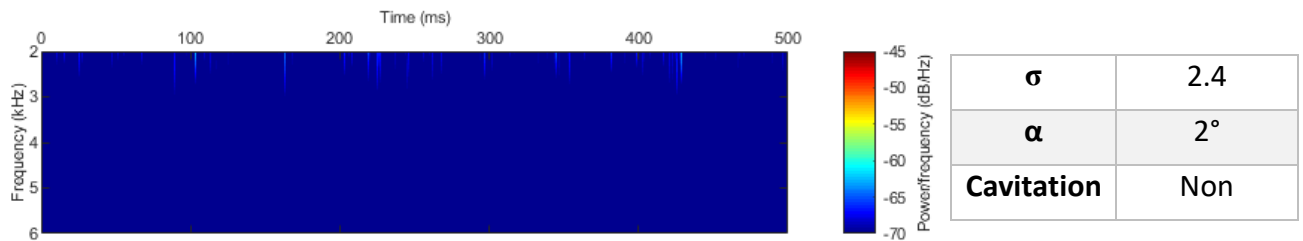


Figure 53: Spectrogramme de 2 à 6 kHz pour un angle d'incidence de 2° et un sigma de 2.4

Une fois que la zone est délimitée, on voit que sans cavitation on obtient un spectrogramme sans bande de fréquence qui ressort de manière intense (Figure 49).

Si l'on compare maintenant les trois spectrogrammes pour un même sigma et pour les 3 incidences différentes l'on peut voir une différence très nette si il y a de la cavitation ou non.

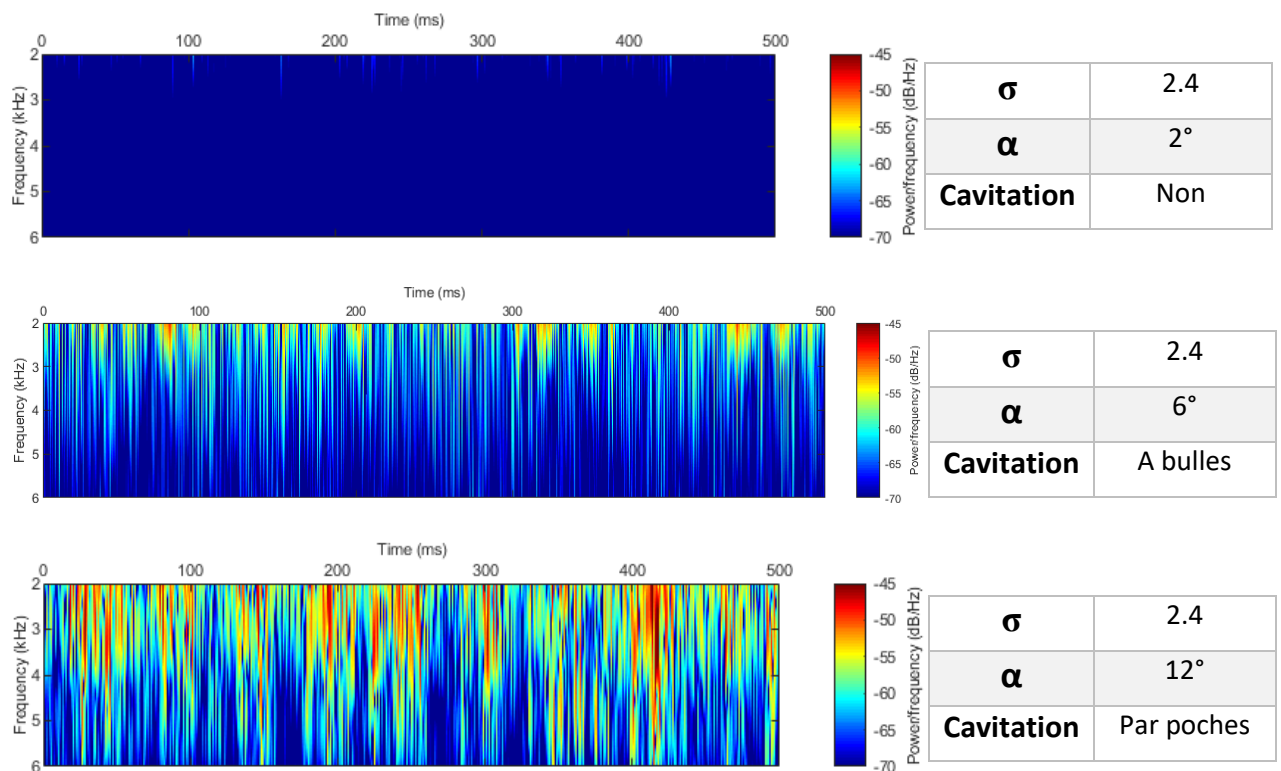


Figure 54: (de haut en bas) Spectrogramme pour sigma 2.4 et des angles d'incidence de 2°, 6° et 12°

Non seulement la différence est très nette mais comme pour l'accéléromètre on peut voir que la cavitation est pulsée pour un sigma de 2.4 et une incidence de 12°. Les pulsations sont plus marquées entre 5 et 6 kHz qu'entre 2 et 3 kHz.

Pour l'incidence de 6° , le phénomène est moins visible si ce n'est entre 2 et 3 kHz. Cela s'explique par le fait que la cavitation est sous la forme de bulles séparées.

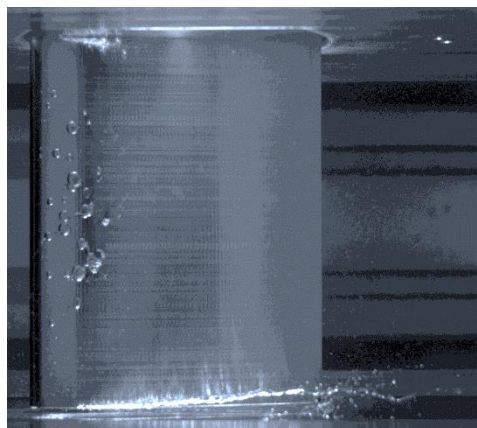


Figure 55: Cavitation en bulles séparées pour un σ de 2.4 et une incidence de 6°

Le fait que l'intensité des fréquences varie au cours du temps, montre bien qu'elles proviennent de la cavitation, le microphone capte clairement la différence lorsque les poches de vapeur apparaissent et disparaissent. Cette fluctuation est mise en évidence autour des 4 5 kHz ce qui correspond à la bande de fréquence que l'on trouve pour l'accéléromètre.

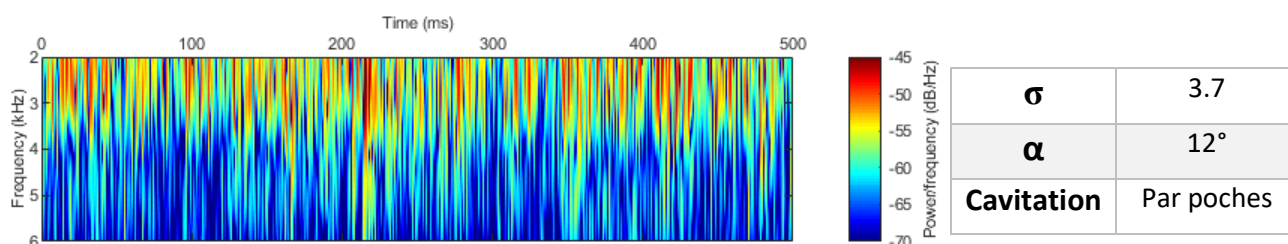


Figure 56: Spectrogramme entre 2 et 6 kHz pour σ 3.7 et une incidence de 12°

Si l'on compare avec le spectrogramme pour le σ de 3.7, on peut remarquer la fluctuation est moins marquée. Cela est dû au fait que la poche ne disparaît jamais totalement comme pour le σ 2.4. Dans le cas présent, la poche change de taille tout le temps, mais elle est beaucoup plus stable qu'auparavant.

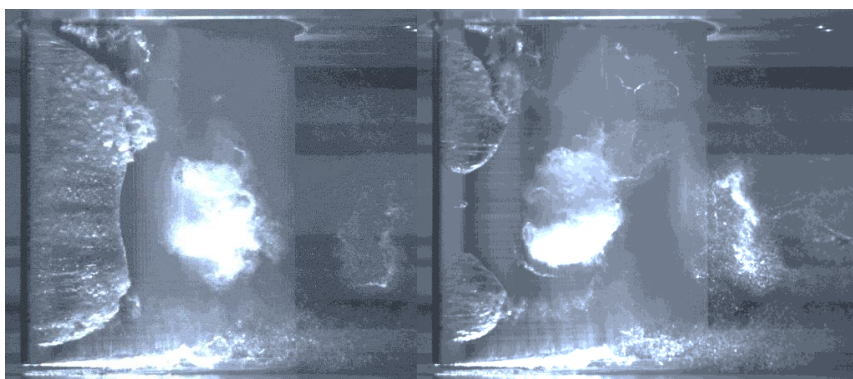


Figure 57: Fluctuation de la poche de vapeur pour un σ de 3.7 et une incidence de 12°

Sur le spectrogramme du microphone la pulsation est donc moins visible mais l'on voit toujours une différence notable autour de 3 kHz. En effet en comparaison avec le spectrogramme sans cavitation, le résultat est clairement différent. Le microphone détecte bien du bruit supplémentaire entre 3 et 5 kHz et il détecte aussi la fluctuation de ce bruit.

Comme pour l'accéléromètre, vous trouverez l'ensemble des spectrogrammes pour toutes les mesures en annexe de ce rapport (Cf. annexe 9).

Le microphone est capable de voir le bruit supplémentaire que fait la cavitation, de plus l'on peut voir que les résultats de deux capteurs montrent qu'ils observent des différences dans les mêmes zones de fréquences.

7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

7.1. Conclusion

La cavitation est un phénomène qui consiste en la formation de poche de vapeur dans un fluide. L'implosion de ces poches de vapeur a pour conséquence de faire vibrer la machine dans laquelle elle se produit. De plus, si l'implosion de ces poches se réalise au contact d'une paroi celle-ci aura pour effet d'arracher de la matière et donc de créer de l'usure prématurée.

Ce phénomène est dû au changement de vitesse et de pression dans l'écoulement, c'est pourquoi l'on définit le paramètre de cavitation en fonction de ces deux variables. Celui-ci permet de caractériser un écoulement en terme de cavitation. Si un écoulement a un paramètre de cavitation donné et que celui-ci correspond à l'apparition de la cavitation, alors on parle de paramètre de cavitation naissante.

Ce travail a permis de prendre en main le banc de test de la HES-SO Valais-Wallis et de caractériser la veine en termes de cavitation. En utilisant un profil NACA0015 dans la veine d'essai, nous avons pu établir une carte de cavitation qui permet de savoir en fonction du paramètre de cavitation et de l'angle d'incidence, le type de cavitation qui se présente. Celle-ci fut réalisée à l'aide d'une caméra haute vitesse qui a permis d'observer le phénomène et de voir sous quelle forme il se présentait.

A la suite de ça, afin de connaître les fréquences propres de la structure, une analyse modale expérimentale et numérique fut réalisée. Elle a permis de sortir les différentes fréquences propres, que ce soit dans l'eau ou dans l'air. De la sorte nous pouvions commencer les mesures avec toutes les informations nécessaires.

Les mesures furent réalisées pour 3 angles d'incidence différents, 2°, 6° et 12° et pour 6 paramètre de cavitation voulut. Pour chaque paramètre de cavitation il y a une mesure qui fut réalisée sans cavitation afin de savoir comment réagit la structure en terme de vibrations et de bruit.

Deux capteurs furent utilisés, un accéléromètre et un microphone. Ces deux capteurs ont montré leur capacité à détecter la cavitation.

L'accéléromètre a permis de mettre en évidence une bande de fréquence entre 3 et 5 kHz tout en montrant que lorsque la cavitation est pulsée, c'est-à-dire que la poche de vapeur apparaît et disparaît, il est capable de le mettre en évidence.

Le microphone a un gros point négatif qui est qu'il mesure n'importe quels bruits parasites. Cependant dans le cas des mesures, il a permis de sortir comme pour l'accéléromètre une bande de fréquence entre 3 et 5 kHz qui n'existe pas si la cavitation ne se forme pas sur le profil. Tout comme l'accéléromètre, il montre les pulsations du phénomène ce qui permet aussi de dire qu'il est capable de différencier la cavitation du bruit ambiant.

Ce travail a donc mis en évidence la capacité de ces deux capteurs à détecter la cavitation. Cela fut possible car pour chaque caractéristique d'écoulement, nous avons une mesure sans cavitation et une avec cavitation. Sans même changer la vitesse et la pression dans l'écoulement nous pouvions établir une mesure de référence qui a permis pour les mesures

suivantes d'éliminer les zones de fréquences inintéressantes. Cela n'est pas forcément possible dans un cas réel, du moins en gardant la même vitesse et la même pression dans l'écoulement, car il n'est pas toujours possible de changer l'incidence des aubes de turbines. Cependant, ces résultats donnent une zone de fréquence où regarder. Ils montrent qu'il est possible de mesurer l'apparition et la disparition des poches de vapeurs et cela est une avancée intéressante dans la recherche sur la cavitation.

7.2. Perspectives

Dans le futur, il serait intéressant de placer les capteurs à un endroit différent sur la veine, afin de voir si les résultats sont les mêmes. De plus il serait aussi intéressant de réaliser des mesures avec le microphone tout en changeant l'incidence du profil au cours de la mesure. Cela pourrait mettre en évidence une bande de fréquence qui varie au cours du temps et qui montrerait très distinctement quand la cavitation se produit.

En plus de ces deux capteurs, des mesures ont été faites avec un capteur d'émission acoustique. Celui-ci permet de mesurer les ondes de choc que forme les implosions des bulles de vapeurs. Le post-traitement de ses signaux n'a pas été réalisé car nous avons voulu nous concentrer tout spécialement sur l'accéléromètre et le microphone.

Cela serait donc un pas de plus dans la détection de la cavitation, de voir ce que ce capteur a mesuré et peut être détecté.

L'hydrophone, des jauges de contraintes, un capteur de pression, seraient des capteurs intéressants à tester. Le premier pour mesurer la propagation du son émis par la cavitation dans l'eau et le second pour détecter les déformations que subirait le profil et le troisième pour mesurer la fluctuation de pression due aux implosions des poches de vapeur.

Enfin, il faudrait effectuer des recherches et des mesures sur les pompes de recirculations, afin de voir lorsqu'elles cavitent ou non et de voir l'influence qu'elles ont sur le banc de test.

8. REMERCIEMENTS

Ce travail de bachelor fut un apprentissage extrêmement intéressant, car sortant quelque peu du domaine purement mécanique. Il m'a apporté énormément dans la connaissance du traitement du signal ainsi que dans l'utilisation de Matlab. De ce fait j'aimerais remercier les professeurs et ingénieurs qui m'ont encadré et conseillé.

- Prof. **Cécile Münch-Alligné** pour ces conseils et pour son aide dans l'apprentissage de la cavitation
- Dr. **Vlad Hasmatuchi Constantin** pour ces connaissances Matlab ainsi que pour tous ces conseils pour le post-traitement
- Dr. **Jean Decaix** pour ces connaissances poussées sur la cavitation et pour son aide sur ANSYS Workbench
- Ing. **Daniel Biner** pour tout le temps qu'il a pris pour m'apprendre l'utilisation du banc de test ainsi que les bases Matlab
- Ing. **Anthony Gaspoz** pour son aide afin de synchroniser la caméra Phantom avec les autres capteurs

9. BIBLIOGRAPHIE

Ugyen Dorji, Reza Ghomashchi, *Hydro turbine failure mechanisms : An overview*. 2014

Dr. Cécile Münch-Alligné. *Cours d'hydraulique* 2018

J.P. Franc – F. Avellan – B. Belahadji – J.Y. Billard – L. Briançon-Marjollet – D. Fréchou – D.H. Fruman A. Karimi – J.L. Kueny – J.M. Michel. *La cavitation, Mécanismes physiques et aspects industriels*. Collection Grenoble Sciences. 1995

Liang Dong, Yuqi Zhao, Cui Dai. *Detection of Inception Cavitation in Centrifugal Pump by Fluid-Borne Noise Diagnostic*. 2019

Pierpaolo Boffi, Giacomo Ferrarese, Maddalena Ferrario, Stefano Malavasi, Maria Vittoria Mastronardi, Marco Mattarei. *Coherent optical fiber interferometric sensor for incipient cavitation index detection*. 2018

ISA, ISA-RP75.23-1995, *Considerations for Evaluating Control Valve Cavitation*, Research Triangle Park, North Carolina 27709, 1995

Opsens inc. Jean-Talon Nord, *La technologie Interférométrie polarimétrique en lumière blanche*. 2014

Harish Ganesh. *Bubbly Shock Propagation as a Cause of Sheet to Cloud Transition of Partial Cavitation and Stationary Cavitation Bubbles Forming on a Delta Wing Vortex*, University of Michigan, 2015

Francis Cottet, *Traitement du signal Aide-mémoire*, 2000

Michel Prenat, *Séries temporelles*, 2012

National Advisory Committee for Aeronautics, Report No. 460, *The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable density wind tunnel*, Eastman N. Jacobs, Kenneth E. Ward and M. Pinkerton, p.4, 1935

Design and control of a new hydraulic test rig for small hydro turbines *Hasmatuchi V., Botero F., Gabathuler S., Münch C.*, 2015

<https://www.eda.admin.ch/aboutswitzerland/fr/home/wirtschaft/energie/energie---fakten-und-zahlen.html>

<https://heliciel.com/aerodynamique-hydrodynamique/cavitation-%20helices-hydrofoils.htm>.

10. ANNEXES

10.1. Annexe 1 : Protocole d'utilisation

10.2. Annexe 2 : Spécifications de la caméra Phantom V411

10.3. Annexe 3 : Calibration Chart accéléromètre Kistler 8766A100AB

10.4. Annexe 4 : Calibration Chart Microphone G.R.A.S 46AE

10.5. Annexe 5 : Configuration de l'installation

10.6. Annexe 6 : Analyse modale expérimentale dans l'air

10.7. Annexe 7 : Analyse modale expérimentale dans l'eau

10.8. Annexe 8 : Périodogrammes et spectrogrammes de l'accéléromètre

10.9. Annexe 9 : Spectrogrammes du microphone

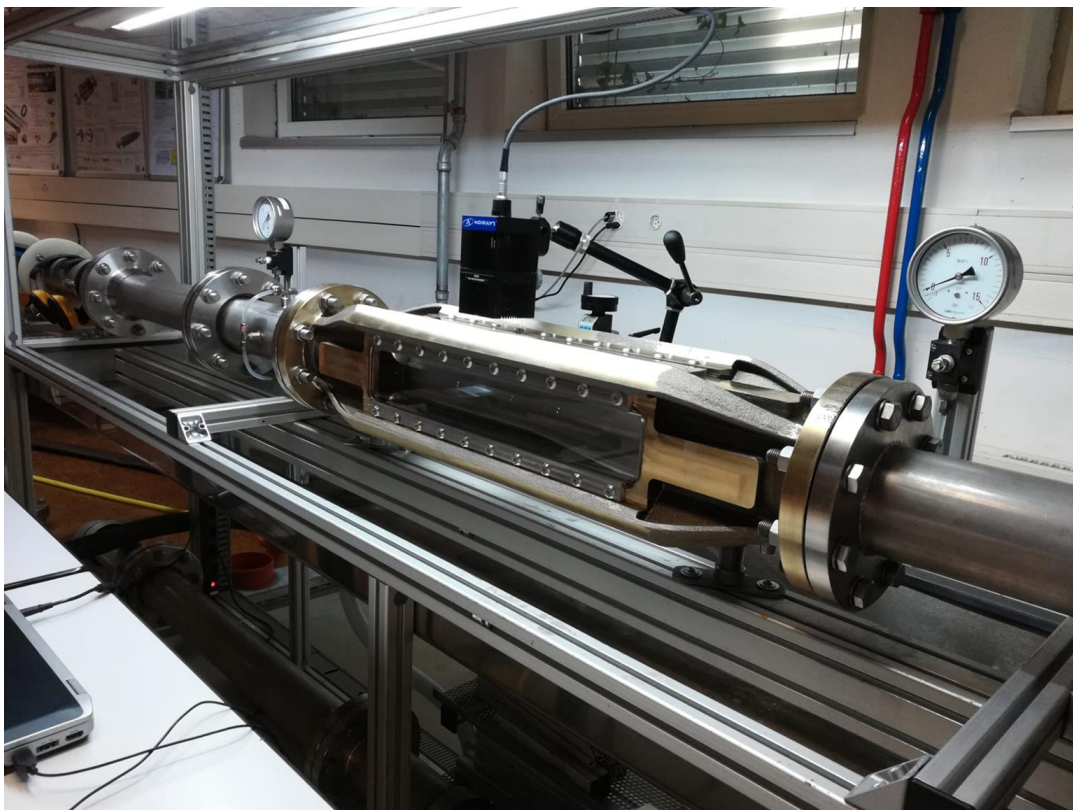
ANNEXES

ANNEXE 1

Protocole d'utilisation

Banc d'essais hydraulique

Protocole d'utilisation pour la veine d'essai



Sion, 22.05.2019

PeF, HaV

Important !!!

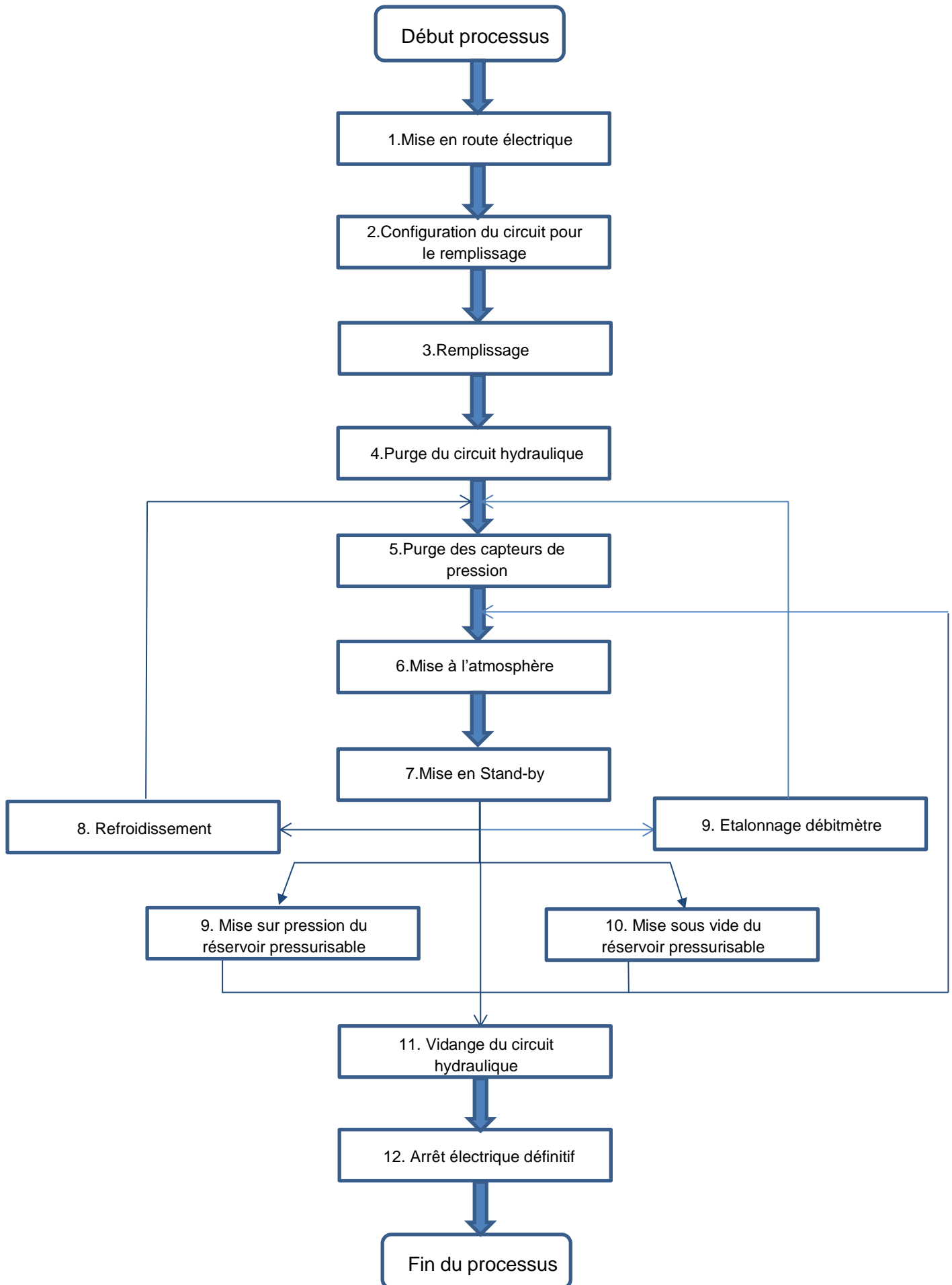
Il est strictement interdit de démarrer le banc d'essais hydraulique et/ou de faire des opérations sans avoir eu:

- 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.

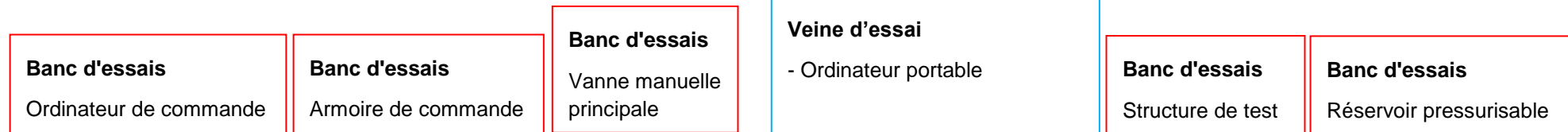
L'opérateur du banc d'essais est totalement responsable des éventuels dégâts matériels et humains provoqués par une utilisation non-conforme au protocole d'utilisation et/ou par le non-respect des règles de sécurité.

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.

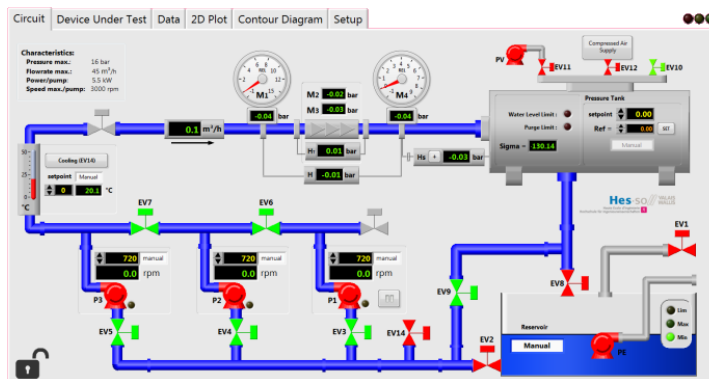


Description générale



Logiciel de contrôle μ Power

"Circuit"



« Device Under Test »

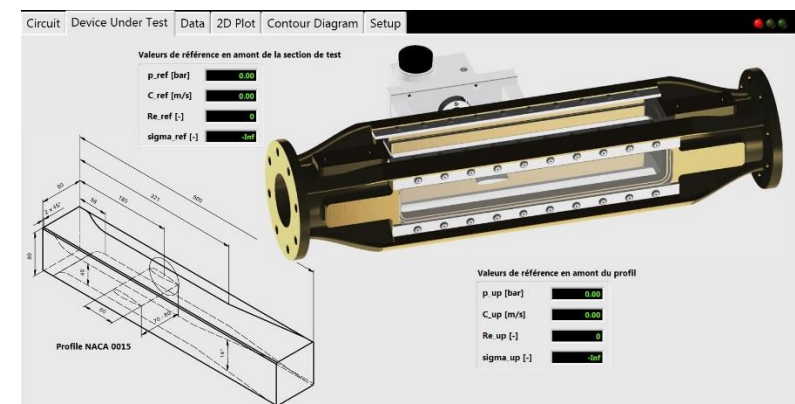
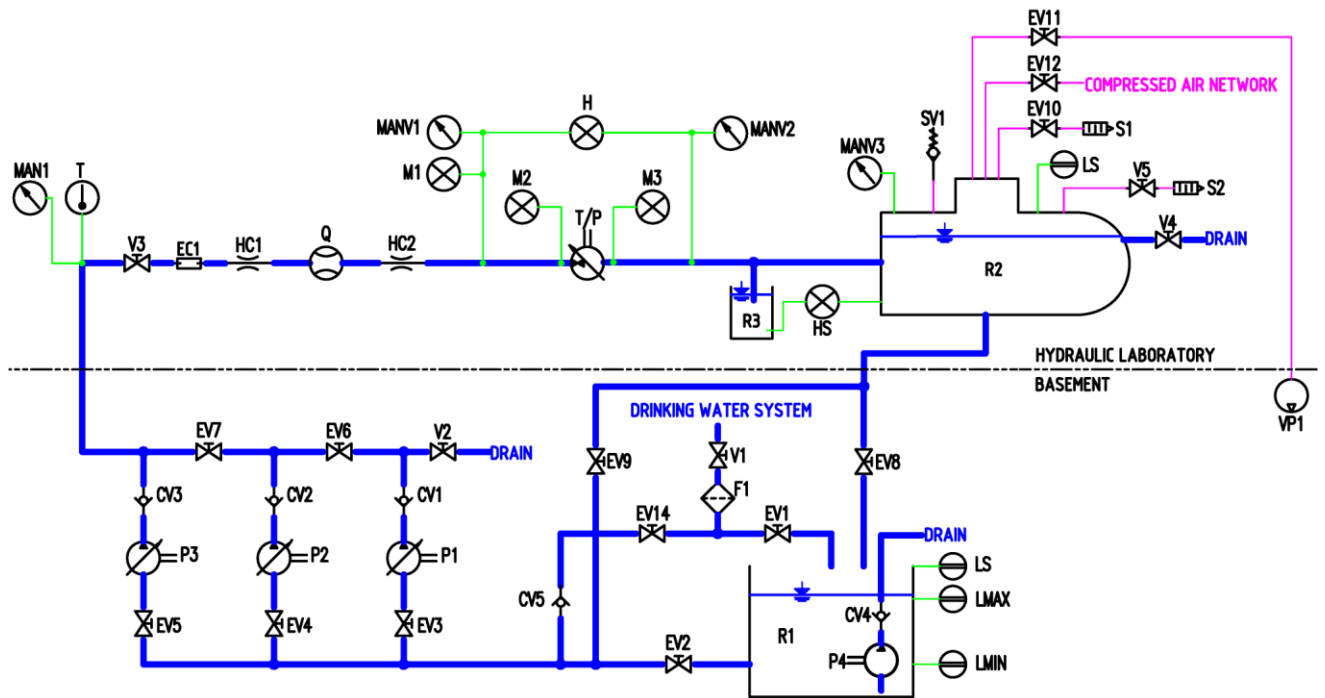



Schéma du circuit hydraulique



Acronym	Component	Functionality
R ₁	Main reservoir	Supply the test rig with water
F ₁	Filter	Water filter
EV ₁	Solenoid valve	Control the water supply from the drinking water system
P ₄	Centrifugal pump	Drain the main reservoir
CV ₄	Check valve	Ensures unidirectional flow toward drain
P _{1, 2, 3}	Centrifugal pumps	Supply the circuit with hydraulic power
CV _{1, 2, 3}	Check valves	Ensure unidirectional flow in turbine mode operation
T/P	Cavitation zone	Test rig for hydrofoils
EV _{2, 3...9}	Solenoid valves	Control the hydraulic circuit configuration
EV ₁₄	Solenoid valve	Control the fresh water supply for cooling
CV ₅	Check valve	Ensures unidirectional flow during cooling
EC ₁	Expansion compensator	Ensures axial direction flexibility for the testing model assembly
HC _{1, 2}	Honeycomb sections	Ensures uniform flow upstream the flowmeter and the testing model
R ₂	Pressurised reservoir	Allows simulating different positive or negative implantation levels
EV _{10, 11, 12}	Solenoid valves	Control the air pressure into the pressurised reservoir
VP ₁	Vacuum pump	Supply the pressurised reservoir with vacuum
SV ₁	Safety valve	Protect the pressurised reservoir from excessive pressure
S _{1, 2}	Silencers	Silencers for pressurised air drain
R ₃	Level reservoir	Water reservoir for the zero implantation level of the testing model
V _{1, 2, ...}	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	Armoire de commande	Interrupteur principal	-	Enclenchement
	Structure de test	Vanne manuelle Festo	-	Position ouvert
	Ordinateur de commande	Bouton principale	-	Enclenchement
		Microsoft Windows	Computer Only Logon User : uadmin	Login
		Carte réseau Wi-Fi	Réseau HydroCE07	Connexion
		Logiciel µPower 	-	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	-	Enclenchement
		Pompe de vidange	-	Position automatique
		Pompe à vide	-	Position automatique
		Débitmètre DN100	-	Position gauche
	Circuit hydraulique	Vanne manuelle principale	-	Ouvert

3. Remplissage et configuration en circuit fermé

Section		Élément	Condition obligatoire	Action
Logiciel µPower	Interface "Circuit"	Mode Remplissage Réservoir	-	"Automatique"
		P1	Sur l'interface: Réservoir :  MIN Vers le réservoir pressurisable: Aucun débordement dans le déversoir	Enclenchement

Remplissage Terminé		Vers le réservoir pressurisable: débordement dans le déversoir		
Banc d'essais	Interface	P1	-	Arrêt
	"Circuit"	Mode Remplissage Réservoir	-	"Manual"
		EV1	-	Position Fermé
	Armoire de Commande	EV2	-	Position Fermé
		EV9	EV2 = Fermé	Position Ouvert

4. Purge du circuit hydraulique

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	Vannes manuelles réservoir de purge (2x)	-	Position Fermé
Logiciel µPower	Interface	P1, P2, P3	-	1200 [rpm]
	"Circuit"	EV10	-	Position Fermé
		EV11	-	Position Ouvert
		Pompe à vide "PV"	-	Enclenchement
	Interface	Pompe à vide "PV"	M ₄ < -0.6 [bar]	Arrêt
	"Circuit"	EV11	-	Position Fermé

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

5. 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
Logiciel μ Power	Interface	P1, P2, P3	-	1200 [rpm]
	"Circuit"	EV10	-	Position Fermé
		EV12	$M_4 \leq 1$ [bar]	Position Ouvert
		EV12	$M_4 > 1$ [bar]	Position Fermé
Banc d'essais	Structure de test	Vanne manuelles capteur de pression M_1, M_2, M_3, H	-	Position Ouvert / Fermé Remarque: Enlever les bulles d'airs du circuit des capteurs



6. Mise à l'atmosphère du réservoir pressurisable

Section		Élément	Condition obligatoire	Action
Logiciel μ Power	Interface	EV10	-	Position Ouvert
	"Circuit"			
Banc d'essais	Réservoir pressurisable	Vanne du déversoir	Sur interface "Circuit" $M_4 = 0$ [bar]	Position Ouvert
		Vanne de mise à l'atmosphère	Sur interface "Circuit" $M_4 = 0$ [bar]	Position Ouvert
	Structure de test	Vannes manuelles réservoir de purge (2x)	-	Position Ouvert

7. Mise en stand-by

Section		Élément	Condition obligatoire	Action
Logiciel µPower	Interface	P1 mode	-	"Manual"
	"Circuit"	P1, P2, P3	-	720 [rpm]
	Interface	P1, P2, P3	-	Arrêt
	"Circuit"			

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

Section		Élément	Condition obligatoire	Action
Logiciel µPower	Interface	Mode Remplissage	-	"Manual"
	"Circuit"	Réservoir		
		EV1	-	Position Fermé
	PE	Réservoir :  MIN (ON)	Enclenchement	
Logiciel µPower	Interface	PE	Réservoir :  MIN (OFF)	Arrêt
	"Circuit"			
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
Logiciel µPower	Interface	P1, P2, P3	-	720 [rpm]
	"Circuit"	Cooling (EV14)	Le niveau du réservoir pressurisable doit être plus bas que le niveau du déversoir	Enclenchement
		Refroidissement terminé		
	Logiciel µPower	Interface	Cooling (EV14)	Débordement du réservoir pressurisable par le déversoir
"Circuit"				

9. Etalonnage débitmètre

Section		Élément	Condition obligatoire	Action
Logiciel μ Power	Interface	P1, P2, P3	-	Arrêt
	« Circuit »			
Banc d'essais	Armoire de commande	Interrupteur	-	Position 0 / DN100
		Interrupteur	-	Position 1 / DN100

10. 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
Logiciel μ Power	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"			


11. 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
Logiciel µPower	Interface	EV10	-	Position Fermé
	"Circuit"	EV11	-	Position Ouvert
		Pompe à vide	M4 >= ... [bar]	Enclenchement
	Mise en Sous vide fini			
	Interface	Pompe à vide	M4 > ... [bar]	Arrêt
	"Circuit"	EV11	-	Position Fermé

12. Vidange du circuit hydraulique

Section		Élément	Condition obligatoire	Action
Logiciel µPower	Interface	Mode Remplissage	-	"Manual"
	"Circuit"	Réservoir		
		EV1	.	Position Fermé
		PE	Réservoir : ● MIN (ON)	Enclenchement
	Vidange du Réservoir fini			
	Interface	PE	Réservoir : ● MIN (OFF)	Arrêt
	"Circuit"			
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

13. Arrêt électrique définitif

Section	Élément	Condition obligatoire	Action
Banc d'essai	Ordinateur de commande	Logiciel μ Power 	Shut down controller
	Bouton principal	-	Arrêt
	Armoire de commande	Interrupteur principal	-
	Structure de test	Ecran tactile	-
	Eclairage	-	Arrêt

ANNEXE 2

Spécifications Caméra Phantom V411



DATA SHEET

For the most current version visit www.phantomhighspeed.com
Subject to change Rev April 2016

Phantom® 1 Megapixel v-Series Cameras

Choose the model that best fits your performance requirements and budget

Advanced features are standard on these models

Each model is available with or without CineMag compatibility and On-Camera Controls

Key Features:

- Custom-designed 1280 x 800 CMOS sensor
- Extreme Dynamic Range (EDR): two exposures per frame
- Internal Mechanical Shutter mechanism for hands-free/remote CSRs
- Memory Segmentation: up to 63 segments
- Non-volatile, hot-swappable Phantom CineMag memory magazines
- CineMag interface is optional on all models
- Range Data Input: embed tracker data into recorded cine file
- 8GB, 16GB or 32GB of internal high-speed memory
- ISO (ISO-12232 SAT method):
Mono: 20,000 T and 6400 D
Color: 2500 T and 2000 D
- Pixel Bit-Depth: 8-, 12-bit
- Gb Ethernet
- The v711 and v611 support a FAST option that provides frame rates of 1,000,000 fps or more as well as sub-microsecond exposure times (export controlled)

Key Benefits:

WHEN IT'S TOO FAST TO SEE, AND TOO IMPORTANT NOT TO®

Our line of 1 megapixel cameras has several members. This data sheet covers the Phantom v411, v611, and v711. Be sure to check out our ultrahigh-speed line of 1 megapixel cameras also – including the new v2512.

All models feature a widescreen 1280 x 800 CMOS sensor – 25% wider than most competitive models – allowing you to **keep moving targets in-frame longer and see more of the event you are recording.** The wide sensor also allows you to get true 1280 x 720 HD images from a 1Mpx camera.

With a pixel size of 20 microns and improved quantum efficiency, **these cameras have the sensitivity you need** for even the most challenging lighting conditions.

Minimum exposure time of 1 microsecond (300 nanoseconds on the v711 with the FAST option) allows you to **eliminate blur** and **allow you to see the smallest of details.**

Phantom 1 Mpx Cameras



Phantom v411

Throughput:

v411 - 4Gpx/s

v611 - 6Gpx/s

v711 - 7Gpx/s

MAXIMUM SPEEDS AT
VARIOUS RESOLUTIONS

Resolution		
v411	v611	v711
1280 x 800		
4200	6240	7530
1280 x 720		
4670	6930	8360
512 x 512		
13,900	20,970	25,000
256 x 256		
44,100	66,990	79,000
128 x 8		
600,000	1,000,000*	1,400,000*

* With FAST option installed

With throughput specifications ranging from 4 gigapixels-per-sec (Gpx/s) to 7Gpx/s, **there is a model to meet your frame-rate requirements.**

At 4Gpx/s, the v411 can take over 4000 frames-per-second (fps) at full resolution. With 6Gpx/s the v611 tops out at over 6000 fps. A 7Gpx/s camera (the v711) can take over 7000 fps at full resolution (7530 fps, actually!) Top speeds at reduced resolution range from 300,000 fps to 1,400,000 fps depending on camera model.

These cameras support both 8- and 12-bit pixel depth. **Smaller bit-depth gives you more recording time** and smaller files. **Greater bit-depth gives you more gray levels** and finer detail. With the greater latitude of 12 bits, you can pull more detail out of the image, an essential requirement for most motion analysis applications.

Phantom's high-accuracy timing system means improved frame rate, frame synchronization and exposure accuracy. And a frame-synchronization (F-SYNC) signal is now available on a dedicated BNC connector on the camera connector panel for **easier cabling and increased signal integrity.**

The camera models offer the Extreme Dynamic Range feature – pioneered by Vision Research. This gives you the ability to **get two different exposures within a single frame** so areas that would otherwise be overexposed contain image detail. And, with Auto Exposure, **the camera adjusts to changing lighting conditions** automatically.

There is an internal mechanical shutter that can cut off all light to the sensor when doing a session-specific black reference (CSR). **You can now do remote CSRs through software control without the need to manually cover the lens!** With the optional Canon EOS lens mount installed you get remote control over lens aperture and focus, too. **This enables complete remote control in environments where you cannot easily access the camera.**

These models come with 8GB, 16GB or 32GB internal high-speed memory. Segmenting memory allows you to divide this into up to 63 segments so you can **take multiple shots back-to-back** without the need to download data from the camera.

Or, record directly to our Phantom CineMag non-volatile, hot-swappable memory magazines. They mount on the CineMag interface of compatible cameras. Continuously record full resolution cines into a CineMag at up to 780 fps. That's just over 2 minutes into the 128GB CineMag, 4.25 minutes into the 256GB, or 8.5 minutes into the 512GB version. Or, record at even higher speeds into camera RAM, then manually or automatically move your recording to the CineMag. With CineMag storage you **get maximum data protection and an ideal storage medium for secure environments.** The CineMag interface is an option on all models.

	Phantom v411	Phantom v611	Phantom v711
Throughput / Speed	> 4 Gpx/second Max speed at full resolution of 1280 x 800 is 4200 fps Max speed at reduced resolution of 128 x 8 is 600,000 fps Record direct to CineMag at up to 800 Mpx/second Minimum frame rate of 24 fps	> 6 Gpx/sec Max speed at full resolution of 1280 x 800 is 6242 fps Max speed at reduced resolution of 128 x 8 is 680,000 fps (standard), 1,000,000 fps (optional) Record direct to CineMag at up to 800 Mpx/second Minimum frame rate of 24 fps Some features are export controlled	> 7 Gpx/sec Max speed at full resolution of 1280 x 800 is 7530 fps Max speed at reduced resolution of 128 x 8 is 680,000 fps (standard), 1,400,000 fps (optional) Record direct to CineMag at up to 800 Mpx/second Minimum frame rate of 24 fps Some features are export controlled
Exposure	1 μ s minimum exposure Global electronic shutter Extreme Dynamic Range (EDR) Auto Exposure Shutter Off mode for PIV	1 μ s minimum exposure (standard), 300 ns (optional) Global electronic shutter Extreme Dynamic Range (EDR) Auto Exposure Shutter Off mode for PIV Some features are export controlled	1 μ s minimum exposure (standard), 300 ns (optional) Global electronic shutter Extreme Dynamic Range (EDR) Auto Exposure Shutter Off mode for PIV Some features are export controlled
Record Times	5.2 seconds at maximum frame rate, maximum bit depth, largest resolution and into maximum internal memory. Longer record times are available when recording directly to a CineMag.	3.58 seconds at maximum frame rate, maximum bit depth, largest resolution and into maximum internal memory. Longer record times are available when recording directly to a CineMag	2.97 seconds at maximum frame rate, maximum bit depth, largest resolution and into maximum internal memory. Longer record times are available when recording directly to a CineMag
Image-Based Auto-Trigger	Standard		
Internal Mechanical Shutter	Standard		
Timing & Synchronization	20 ns timing resolution Frame synchronization to internal or external clock (FSYNC) IRIG in/out (modulated or unmodulated) SMPTE timecode at support frame rates Ready output Strobe output Genlock		
Signaling	Dedicated FSYNC, Trigger, Genlock, Timecode In and Timecode Out (SMPTE & IRIG) BNCs on camera body, Range Data input on camera body Capture cable with Ready, Strobe, IBAT-Trigger, Pre-Trigger, Analog Video, Additional signals available with use of optional Break-Out-Box (BoB)		
Ethernet Connection	Gb Ethernet for both control and data		
Camera Control	Optional On-Camera Controls (OCC), Phantom Camera Control (PCC) Remote Control Unit (RCU), connects to Remote port, LabView and Matlab drivers available		
Video Out	Analog video (NTSC or PAL) available on Capture Cable Component viewfinder port Versatile Dual HD-SDI can provide 4:4:4 video (except at 60 fps), or can be two single 4:2:2 HD-SDI ports, one for playback and one always live		
Lensing	Nikon F-mount standard, Canon EOS mount optional, PL-mount optional, C-mount optional, (lens not included)		



Phantom v711

ISO SAT			
Mono		Color	
ISO SAT T	ISO SAT D	ISO SAT T	ISO SAT D
20,000	6400	2500	2000

DATA SHEET

Phantom® 1 Megapixel v-Series Cameras

Additional Features:

Size (without lens, CineMag or handle):

11.5 x 5.5 x 5.0 inches (L x W x H);

29.2 x 14 x 12.7 cm

Weight (without lens or CineMag): 11.75 lb; 5.33 kg

Temperature and Humidity: 0°C - 40°C @ 8% to 80% RH

Shock: 30g, half sine wave, 11 ms, 10 times all axes
(without CineMag or lens)

Vibration: 25g, 5-500 Hz, all axes without CineMag

Move the CineMag to a CineStation connected to a PC and **view, edit, and save your recordings using the Phantom Camera Control software** included with the camera. Keep the recordings in their original raw cine format, or convert them to TIFF, QuickTime, AVI, or other popular formats. Move files from the CineStation to a disk or video recorder via 10Gb Ethernet; 4:4:4 HD-SDI, or Component Video outputs.

When using the camera on a tracking mount, **elevation and azimuth data can be transferred to the camera** and associated with image frames through our unique Range Data interface.

View your recordings immediately in a variety of formats either through the HD-SDI ports on the camera, or through the component video port. There are two HD-SDI ports on the camera which can be configured in a variety of ways including 4:4:4 dual-link and simultaneous play/record (on some models).

The cameras can be controlled with the feature-rich PCC software, the Phantom RCU, or the new (optional) on-camera controls.

Vision Research Global Support - for wherever you are

Our ultrahigh-speed camera line is supported by Vision Research's Global Service and Support network offering AMECare Performance Services from multiple sites around the globe. Maximize the value of your Phantom camera by learning more about our service and support options at www.phantomhighspeed.com/PhantomZone

AMETEK Vision Research's digital high-speed cameras are subject to the export licensing jurisdiction of the Export Administration Regulations. As a result, the export, transfer, or re-export of these cameras to a country embargoed by the United States is strictly prohibited. Likewise, it is prohibited under the Export Administration Regulations to export, transfer, or re-export AMETEK Vision Research's digital high-speed cameras to certain buyers and/or end users.

Customers are also advised that some models of AMETEK Vision Research's digital high-speed cameras may require a license from the U.S. Department of Commerce to be: (1) exported from the United States; (2) transferred to a foreign person in the United States; or (3) re-exported to a third country. Interested parties should contact the U.S. Department of Commerce to determine if an export or a re-export license is required for their specific transaction.

Focused

Since 1950, Vision Research has been designing, and manufacturing high-speed cameras. Our single focus is to invent, build, and support the most advanced cameras possible.

VISION
RESEARCH

AMETEK®
MATERIALS ANALYSIS DIVISION

100 Dey Road
Wayne, NJ 07470 USA
+1.973.696.4500

www.phantomhighspeed.com

ANNEXE 3

Calibration Chart accéléromètre Kistler 8766A100AB

ACCELERATION CALIBRATION CERTIFICATE - X Axis

Type	8766A100AB	Manufacturer	Kistler
Serial Number	2139607	Certificate ID #	41-2139607-150908T1133
Time Constant	sec. 0.8	Mounted Resonant Frequency	kHz 31.0
Transverse Sensitivity	% 1.4	Mounting Torque	lbf-in 6.5 ± 0.7
Bias Voltage	V _{DC} 9.0		Nm 0.7 ± 0.1

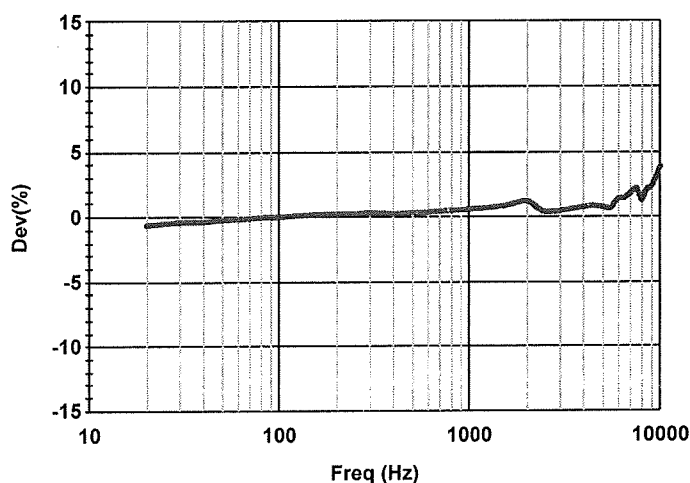
Reference Specifications

Range	g ± 100	Temp. Range, operating	°C -54 to 120
Max Range	g ± 200	Output Impedance	Ω ≤100

Measurements

Frequency	Sensitivity	Deviation
Hz	mV/g	% (ref=100 Hz)
20	47.56	-0.6
50	47.74	-0.2
100	47.86	0.0
159	47.95	0.2
200	47.96	0.2
500	48.00	0.3
1000	48.13	0.6
2000	48.43	1.2
5000	48.21	0.7
8000	48.48	1.3
10000	49.69	3.8

Frequency Response



Sensitivity at 100 Hz, 10.0 g rms	mV/g 47.86		
Sensitivity at 159 Hz, 10.0 g rms	mV/g 47.95		
Environmental Temperature	°C 22 ± 4	Condition	New
Relative Humidity	% 30 ± 30	NIST Test Report Number	683/284114-13
Calibration Date	9/8/2015	Calibration Technician:	Jason Griswold

This sensor was calibrated per Kistler test procedure 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCSL Z540-1 and is accredited to ISO/IEC 17025 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACLASS. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is ± 2.14% 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	809K112	2034906	Multimeter (Standard)	HP	34401A	US36022114
Charge Amplifier (Working Std.)	Kistler	5020	C31904	Multimeter (Test)	HP	34401A	US36021830
Accelerometer (Primary Std.)	Kistler	8002K	C139113	Function Generator	Wavetek	270	C6370764
Charge Amplifier (Primary Std.)	Kistler	5020	C92253	Charge Amplifier (Test)	Kistler	ETL1026	6

Kistler Instrument Corp.
75 John Glenn Drive
Amherst, NY 14228-2171

Tel 1-888-KISTLER
Fax 1-716-691-5226
info.us@kistler.com

ISO 9001 Certified Quality System
ISO 17025 Accredited Calibration Laboratory
026-5007-001 Rev B - Page 2 of 4

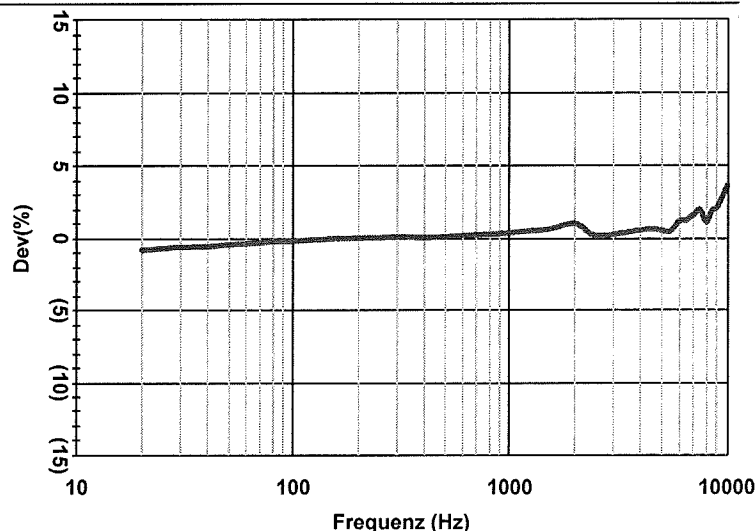
www.kistler.com

KALIBRIERSCHEIN - X Achse
BESCHLEUNIGUNGSSENSOR
CALIBRATION CERTIFICATE - X Axis
ACCELEROMETER

Typ / Type	8766A100AB	Hersteller / Manufacturer	Kistler
Serien-Nr / Serial Number	2139607	Cert ID # / Cert ID #	41-2139607-150908T1133
Bereich	Range	g	± 100
Max. Bereich	Max. Range	g	± 200
Betriebstemperaturbereich	Temp. Range, operating	°C	-54 bis 120
Ausgangsimpedanz	Output Impedance	Ω	≤100
Zeitkonstante	Time Constant	s	0,8
Seitenempfindlichkeit	Transverse Sensitivity	%	1,4
Ruhspannung	Bias Voltage	V _{DC}	9,0
Resonanzfrequenz montiert (fn)	Mounted Resonant Frequency (fn)	kHz	31,0
Anzugsmoment	Mounting Torque	Nm	0,7 ± 0,1

Messungen / Measurements
Frequenzgang / Frequency Response

Freq. / Freq.	Empfindlichkeit / Sens.	Abweichung / Dev.
Hz	mV/g	% (ref= 159 Hz)
20	47,56	-0,8
50	47,74	-0,4
100	47,86	-0,2
159	47,95	0,0
200	47,96	0,0
500	48,00	0,1
1000	48,13	0,4
2000	48,43	1,0
5000	48,21	0,6
8000	48,48	1,1
10000	49,69	3,6



Empfindlichkeit bei 159Hz, 10,0g rms	Sensitivity at 159Hz, 10.0 g rms	mV/g	47,95	$g = g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
Umgebungstemperatur	Environmental Temperature	°C	22 ± 4	
Relative Feuchte	Relative Humidity	%	30 ± 30	
Kalibriert von	Calibration Technician		Jason Griswold	
Datum	Calibration Date		08.09.2015	

Dieser Sensor ist gemäss Kistler Testprozedur 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCSL Z540-1 und entspricht ISO/IEC 17025, verifiziert durch das ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACLASS. Siehe Zertifizierung AC-1117. Die geschätzte Ungenauigkeit beträgt ± 2,14% 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 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCSL Z540-1 and is accredited to ISO/IEC 17025 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACLASS. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is ± 2.14% 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	809K112	2034906	Multimeter/Multimeter (UUT)	HP	34401A	US36022114
Ladungsverstärker/Charge Amp.(GN)	Kistler	5020	C31904	Multimeter/Multimeter (Std)	HP	34401A	US36021830
Beschleunigungs-Sensor/Accel.(BN)	Kistler	8002K	C139113	Funktionsgenerator/Function Gen.	Wavetek	270	C6370764
Ladungsverstärker/Charge Amp. (BN)	Kistler	5020	C92253				

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

ACCELERATION CALIBRATION CERTIFICATE - Y Axis

Type	8766A100AB	Manufacturer	Kistler
Serial Number	2139607	Certificate ID #	41-2139607-150908T1133
Time Constant	sec. 0.9	Mounted Resonant Frequency	kHz 31.0
Transverse Sensitivity	% 3.8	Mounting Torque	lbf-in 6.5 ± 0.7
Bias Voltage	V _{DC} 10.5		Nm 0.7 ± 0.1

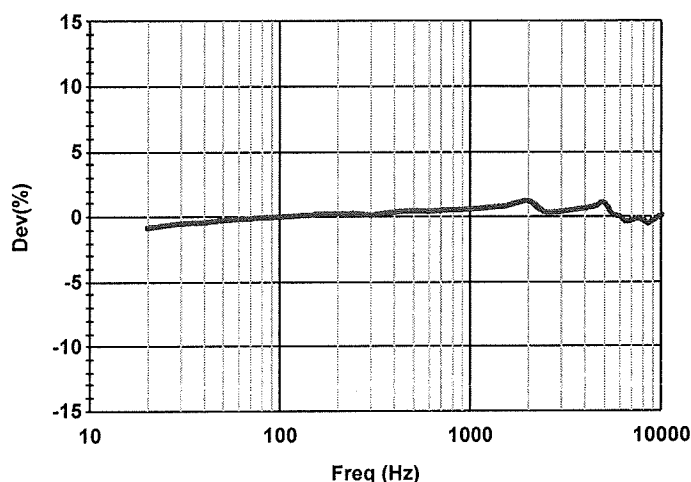
Reference Specifications

Range	g ± 100	Temp. Range, operating	°C -54 to 120
Max Range	g ± 200	Output Impedance	Ω ≤100

Measurements

Frequency Hz	Sensitivity mV/g	Deviation % (ref=100 Hz)
20	51.97	-0.9
50	52.28	-0.3
100	52.42	0.0
159	52.53	0.2
200	52.55	0.2
500	52.66	0.4
1000	52.73	0.6
2000	53.05	1.2
5000	52.99	1.1
8000	52.29	-0.3
10000	52.48	0.1

Frequency Response



Sensitivity at 100 Hz, 10.0 g rms	mV/g 52.42		
Sensitivity at 159 Hz, 10.0 g rms	mV/g 52.53	$g = 9.807 \text{ m/s}^2$	159.2 Hz = 1000 rads/sec
Environmental Temperature	°C 22 ± 4	Condition	New
Relative Humidity	% 30 ± 30	NIST Test Report Number	683/284114-13
Calibration Date	9/8/2015	Calibration Technician:	Jason Griswold

This sensor was calibrated per Kistler test procedure 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCSL Z540-1 and is accredited to ISO/IEC 17025 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACCLASS. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is ± 2.14% 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	809K112	2034906	Multimeter (Standard)	HP	34401A	US36022114
Charge Amplifier (Working Std.)	Kistler	5020	C31904	Multimeter (Test)	HP	34401A	US36021830
Accelerometer (Primary Std.)	Kistler	8002K	C139113	Function Generator	Wavetek	270	C6370764
Charge Amplifier (Primary Std.)	Kistler	5020	C92253	Charge Amplifier (Test)	Kistler	ETL1026	6

KALIBRIERSCHEIN - Y Achse BESCHLEUNIGUNGSSENSOR

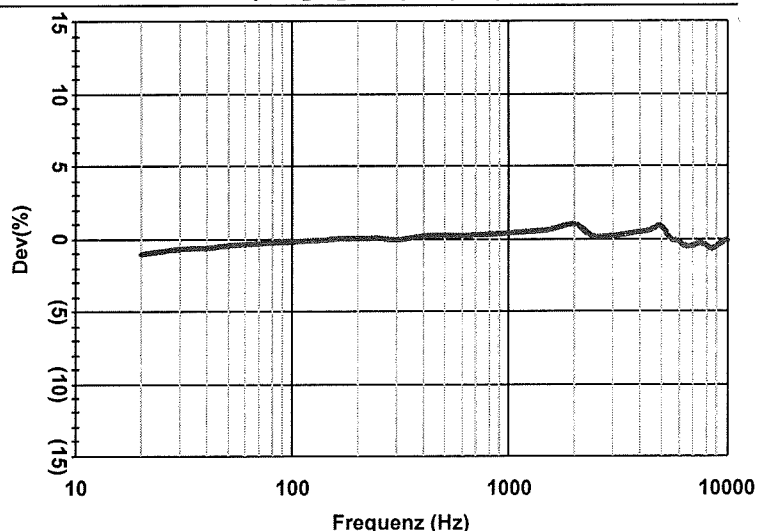
CALIBRATION CERTIFICATE - Y Axis ACCELEROMETER

Typ / Type	8766A100AB	Hersteller / Manufacturer	Kistler
Serien-Nr / Serial Number	2139607	Cert ID # / Cert ID #	41-2139607-150908T1133
Bereich	Range	g	± 100
Max. Bereich	Max. Range	g	± 200
Betriebstemperaturbereich	Temp. Range, operating	°C	-54 bis 120
Ausgangsimpedanz	Output Impedance	Ω	≤100
Zeitkonstante	Time Constant	s	0,9
Seitenempfindlichkeit	Transverse Sensitivity	%	3,8
Ruhspannung	Bias Voltage	V _{DC}	10,5
Resonanzfrequenz montiert (fn)	Mounted Resonant Frequency (fn)	kHz	31,0
Anzugsmoment	Mounting Torque	Nm	0,7 ± 0,1

Messungen / Measurements

Frequenzgang / Frequency Response

Freq. / Freq.	Empfindlichkeit / Sens.	Abweichung / Dev.
Hz	mV/g	% (ref=159 Hz)
20	51,97	-1,1
50	52,28	-0,5
100	52,42	-0,2
159	52,53	0,0
200	52,55	0,0
500	52,66	0,2
1000	52,73	0,4
2000	53,05	1,0
5000	52,99	0,9
8000	52,29	-0,5
10000	52,48	-0,1



Empfindlichkeit bei 159Hz, 10,0g rms	Sensitivity at 159Hz, 10.0g rms	mV/g	52,53	$g = g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
Umgebungstemperatur	Environmental Temperature	°C	22 ± 4	
Relative Feuchte	Relative Humidity	%	30 ± 30	
Kalibriert von	Calibration Technician		Jason Griswold	
Datum	Calibration Date		08.09.2015	

Dieser Sensor ist gemäss Kistler Testprozedur 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCSL Z540-1 und entspricht ISO/IEC 17025, verifiziert durch das ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACLASS. Siehe Zertifizierung AC-1117. Die geschätzte Ungenauigkeit beträgt ± 2,14% 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 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCSL Z540-1 and is accredited to ISO/IEC 17025 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACLASS. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is ± 2.14% 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	809K112	2034906	Multimeter/Multimeter (UUT)	HP	34401A	US36022114
Ladungsverstärker/Charge Amp.(GN)	Kistler	5020	C31904	Multimeter/Multimeter (Std)	HP	34401A	US36021830
Beschleunigungs-Sensor/Accel.(BN)	Kistler	8002K	C139113	Funktionsgenerator/Function Gen.	Wavetek	270	C6370764
Ladungsverstärker/Charge Amp. (BN)	Kistler	5020	C92253				

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

ACCELERATION CALIBRATION CERTIFICATE - Z Axis

Type	8766A100AB	Manufacturer	Kistler
Serial Number	2139607	Certificate ID #	41-2139607-150908T1133
Time Constant	sec. 0.9	Mounted Resonant Frequency	kHz 31.0
Transverse Sensitivity	% 2.1	Mounting Torque	lbf-in 6.5 ± 0.7
Bias Voltage	V _{DC} 10.6		Nm 0.7 ± 0.1

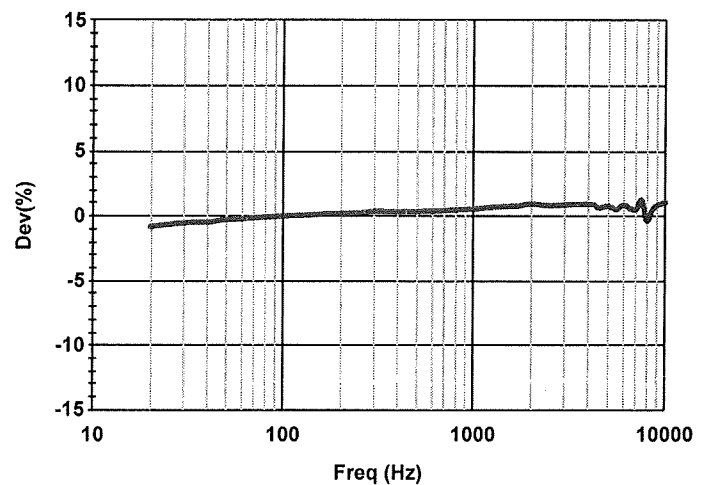
Reference Specifications

Range	g ± 100	Temp. Range, operating	°C -54 to 120
Max Range	g ± 200	Output Impedance	$\Omega \leq 100$

Measurements

Frequency Response

Frequency Hz	Sensitivity mV/g	Deviation % (ref=100 Hz)
20	51.71	-0.8
50	51.99	-0.3
100	52.14	0.0
159	52.21	0.1
200	52.24	0.2
500	52.33	0.4
1000	52.43	0.6
2000	52.63	0.9
5000	52.55	0.8
8000	51.95	-0.4
10000	52.69	1.1



Sensitivity at 100 Hz, 10.0 g rms	mV/g 52.14		
Sensitivity at 159 Hz, 10.0 g rms	mV/g 52.21		
Environmental Temperature	°C 22 ± 4	Condition	New
Relative Humidity	% 30 ± 30	NIST Test Report Number	683/284114-13
Calibration Date	9/8/2015	Calibration Technician:	Jason Griswold

$$g = 9.807 \text{ m/s}^2 \quad 159.2 \text{ Hz} = 1000 \text{ rads/sec}$$

This sensor was calibrated per Kistler test procedure 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCCL Z540-1 and is accredited to ISO/IEC 17025 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACLASS. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is $\pm 2.14\%$ 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	809K112	2034906	Multimeter (Standard)	HP	34401A	US36022114
Charge Amplifier (Working Std.)	Kistler	5020	C31904	Multimeter (Test)	HP	34401A	US36021830
Accelerometer (Primary Std.)	Kistler	8002K	C139113	Function Generator	Wavetek	270	C6370764
Charge Amplifier (Primary Std.)	Kistler	5020	C92253	Charge Amplifier (Test)	Kistler	ETL1026	6

Kistler Instrument Corp.
75 John Glenn Drive
Amherst, NY 14228-2171

Tel 1-888-KISTLER
Fax 1-716-691-5226
info.us@kistler.com

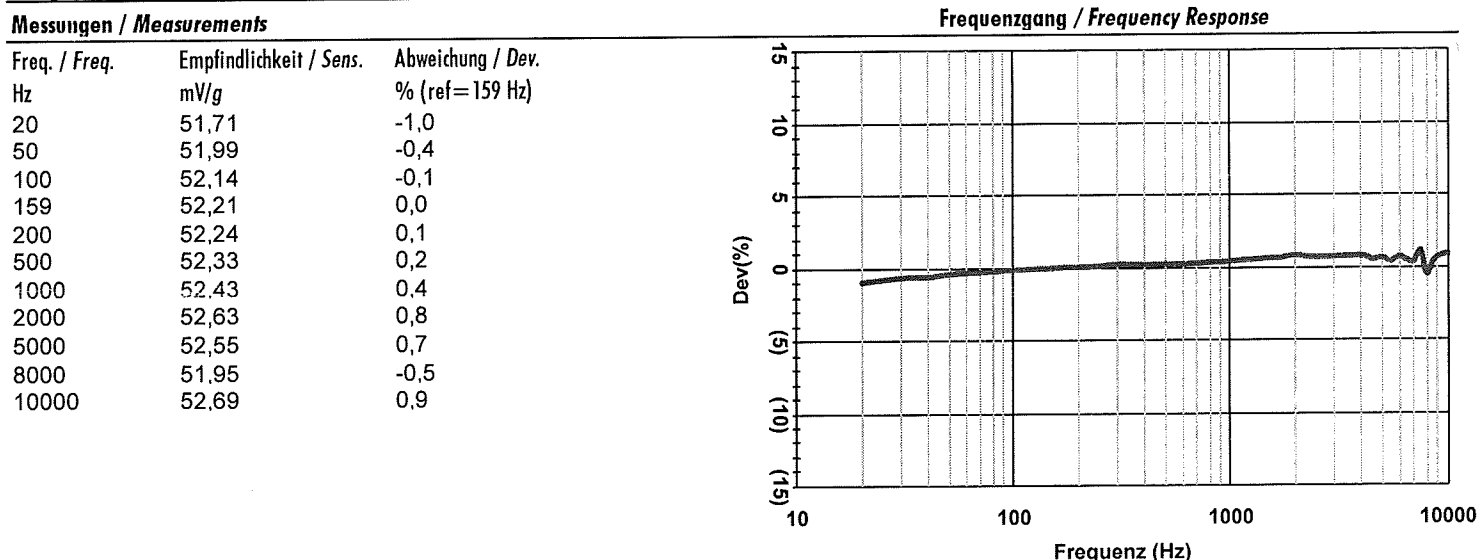
ISO 9001 Certified Quality System
ISO 17025 Accredited Calibration Laboratory
026-5007-001 Rev B - Page 4 of 4

www.kistler.com

KALIBRIERSCHEIN - Z Achse BESCHLEUNIGUNGSSENSOR

CALIBRATION CERTIFICATE - Z Axis ACCELEROMETER

Typ / Type	8766A100AB	Hersteller / Manufacturer	Kistler
Serien-Nr / Serial Number	2139607	Cert ID # / Cert ID #	41-2139607-150908T1133
Bereich	Range	g	± 100
Max. Bereich	Max. Range	g	± 200
Betriebstemperaturbereich	Temp. Range, operating	°C	-54 bis 120
Ausgangsimpedanz	Output Impedance	Ω	≤ 100
Zeitkonstante	Time Constant	s	0,9
Seitenempfindlichkeit	Transverse Sensitivity	%	2,1
Ruhspannung	Bias Voltage	V _{DC}	10,6
Resonanzfrequenz montiert (fn)	Mounted Resonant Frequency (fn)	kHz	31,0
Anzugsmoment	Mounting Torque	Nm	$0,7 \pm 0,1$



Empfindlichkeit bei 159Hz, 10,0g rms	Sensitivity at 159Hz, 10.0 g rms	mV/g	52,21	$g = g_n = 9,80665 \text{ m/s}^2$
Umgebungstemperatur	Environmental Temperature	°C	22 ± 4	
Relative Feuchte	Relative Humidity	%	30 ± 30	
Kalibriert von	Calibration Technician		Jason Griswold	
Datum	Calibration Date		08.09.2015	

Dieser Sensor ist gemäss Kistler Testprozedur 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCCL Z540-1 und entspricht ISO/IEC 17025, verifiziert durch das ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACLASS. Siehe Zertifizierung AC-1117. Die geschätzte Ungenauigkeit beträgt $\pm 2,14\%$ 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 978-5486-701 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 MIL-STD-45662A, ISO 9001, ANSI/NCCL Z540-1 and is accredited to ISO/IEC 17025 as verified by the ANSI-ASQ National Accreditation Board/ACLASS. Refer to certificate and scope of accreditation AC-1117. Estimated uncertainty is $\pm 2.14\%$ 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	809K112	2034906	Multimeter/Multimeter (UUT)	HP	34401A	US36022114
Ladungsverstärker/Charge Amp.(GN)	Kistler	5020	C31904	Multimeter/Multimeter (Std)	HP	34401A	US36021830
Beschleunigungs-Sensor/Accel.(BN)	Kistler	8002K	C139113	Funktionsgenerator/Function Gen.	Wavetek	270	C6370764
Ladungsverstärker/Charge Amp. (BN)	Kistler	5020	C92253				

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

ANNEXE 4

Calibration chart microphone G.R.A.S 46AE

Calibration Chart
Type 46AE
½" Preamplifier and Free Field Microphone

Serial No. 98656

Serial No. 100533

Sensitivity : 43.86 mV/Pa
-27.16 dB re. 1V/Pa

Cal. Date : 08-May-08
Operator : HM

Reference conditions:

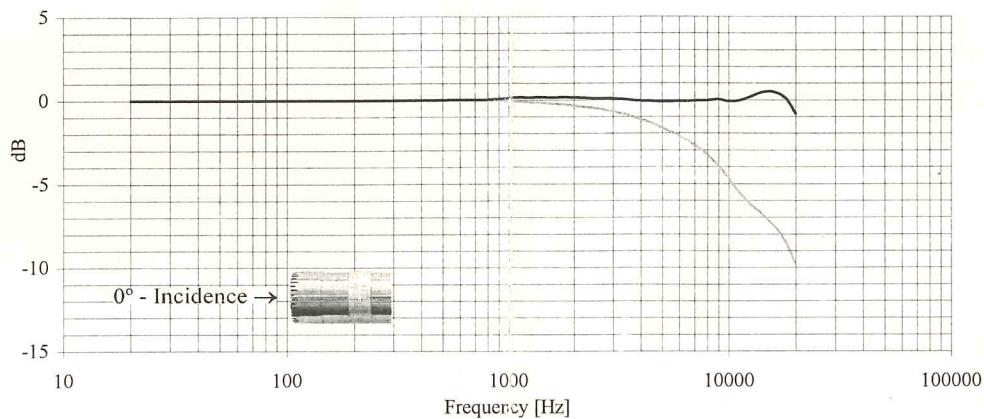
Temperature : 23° Celcius

Relative humidity : 50%

Barometric pressure : 101.3 kPa

The calibration is performed with a reference Pistonphone Type 42AA and is traceable to the National Physical Laboratory, UK. The stated sensitivity is the sensitivity for the complete unit of both preamplifier and microphone capsule. The frequency response is recorded by electrostatic actuator. The calibration data is programmed into the built-in TEDS chip according to IEEE 1451.4 using UTID I27-0-0-0. (TEDS = Transducer Electronic Data Sheet)

(See back for more information)



Calibration data for
Microphone Unit
Type 46AE

Serial No. 98656

G.R.A.S.
SOUND & VIBRATION

G.R.A.S. Sound & Vibration A/S
Skovlytoften 33
DK-2840 Holte, Denmark
Tel: +45 45 66 40 46
Fax: +45 45 66 40 47

46AE Microphone Unit with TEDS

The 46AE is based on a 40AE Prepolarized Free Field Microphone. The microphone complies with the requirements in IEC Standard 1094-4, and can be used for measurements according to IEC Standard 651 Type 0 and Type 1. This microphone is combined and calibrated with a 26CA preamplifier. The microphone unit is CCP driven which is ICP[®] compatible (CCP = Constant Current Power).

The free-field microphone is designed to essentially measure the sound pressure, as it existed before the microphone was introduced into the sound field. At higher frequencies the presence of the microphone itself in the sound field will change the sound pressure. In general the sound pressure around the microphone cartridge will increase due to reflections and diffraction. The free-field microphone is designed so that the frequency characteristics compensates for this pressure increase.

The resulting output of the free-field microphone is a signal proportional to the sound pressure, as it existed before the microphone was introduced into the sound field. The free-field microphone should always be pointed towards the sound source ('0° incidence'). In this situation the presence of the microphone diaphragm in the sound field will result in a pressure increase in front of the diaphragm. The microphone is then designed so that the sensitivity of the microphone decreases with the same amount as the acoustical pressure increases in front of the diaphragm. This is obtained by increasing the internal acoustical damping in the microphone cartridge. The result is an output from the microphone, which is proportional to the sound pressure as it existed before the microphone was introduced into the sound field.

(ICP is a trademark of PCB Piezotronics Inc.)

Specifications

Nominal Sensitivity :
at 250Hz 50 mV/Pa

Frequency Response:
±2 dB 3.15Hz-20kHz
±1 dB 5Hz-10kHz

Power Supply (CCP):
2 - 20mA (4mA typical)

Dynamic Range:
From: 14dBA re. P_0 20μPa
To: 135dB re. 20μPa

Output Impedance (Cs = 20 pF, f=1000Hz):
<50ohm

Maximum Output Voltage Swing (Peak):
±8 V

Temperature Range:
-30 to +60°C

Length:
84.0mm

Diameter:
With Protection Grid 13.2mm
Without Protection Grid 12.7mm

Weight:
33g

Microphone Capsule Specific Data:

Nominal Cartridge Capacitance:
Polarized 20pF

Resonance Frequency:
90° Phase shift 14kHz

Effective Front Volume:
Nominal at 250Hz 50mm³

Static Pressure Coefficient:
250Hz at 25°C -0.008 dB/kPa

Mean Temperature Coefficient:
-10 to +50°C 0.01dB/°C

IEC 1094-1 Type Designation:
LS2F

Thread:
Protection Grid 12.7mm 60 UNS
Preamplifier 11.7mm 60 UNS

ANNEXE 5

Configuration de l'installation

PP Mécanique – Mesures de la cavitation sur la veine d'essai de la HES-SO Valais – juin 2019

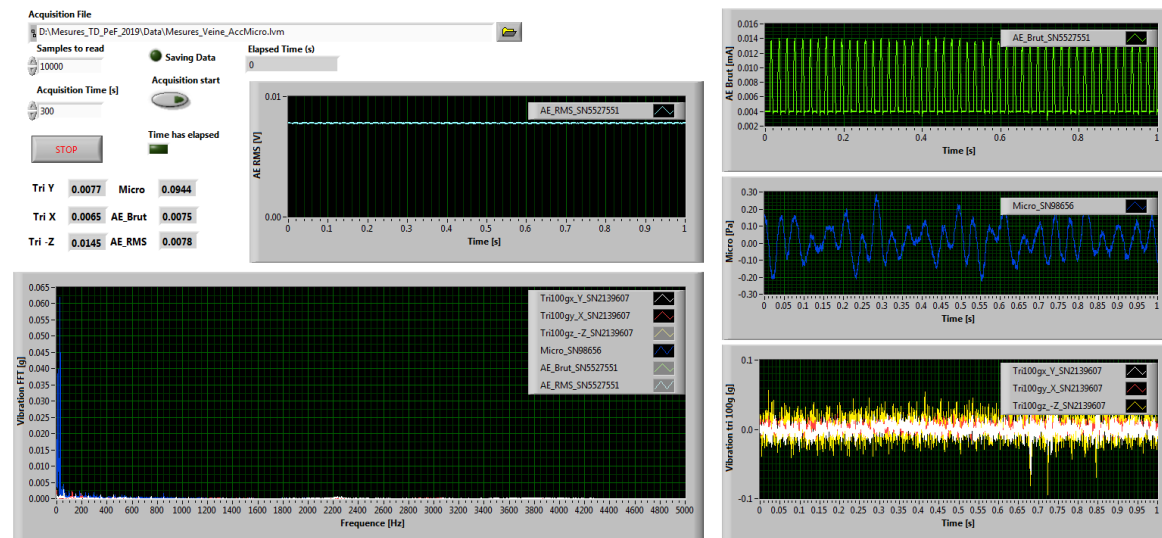
Setup de l'instrumentation employée

- Liste des variables enregistrées par le programme d'acquisition LabView

No.	Variable	Canal physique	Capteur	Sortie	Plage	Emplacement
1	Time	-	-	-	-	-
2	Tri100gx_Y_SN2139607	PXIe-4497-AI0	Kistler IEPE acc. 3-axis	±10 VDC	±100 g	Structure – Y profil NACA0015
3	Tri100gy_X_SN2139607	PXIe-4497-AI1	Kistler IEPE acc. 3-axis	±10 VDC	±100 g	Structure – X profil NACA0015
4	Tri100gz_-Z_SN2139607	PXIe-4497-AI2	Kistler IEPE acc. 3-axis	±10 VDC	±100 g	Structure – -Z profil NACA0015
5	Micro_SN98656	PXIe-4497-AI3	G.R.A.S IEPE Microphone 46AE	±8 VDC	15...120 dB	Amont côté droite du profil NACA0015
6	AE_Brut_SN5527551	PXI-6238-AI0	Kistler Acoustic Emission Sensor	4...20 mA	50...400 kHz	Structure – Profil NACA0015
7	AE_RMS_SN5527551	PXIe-4339-AI0	Kistler Acoustic Emission Sensor	±10 VDC	50...400 kHz	Structure – Profil NACA0015

- Fréquence d'acquisition : 40 kHz et 25 kHz
- Système d'acquisition : NI PXIe-1073 + NI PXIe 4497 + NI PXI 6238 + NI PXIe 4339
- Interface du programme d'acquisition LabView :

Mesures Veine - HES-SO VS Sion - 2019



ANNEXE 6

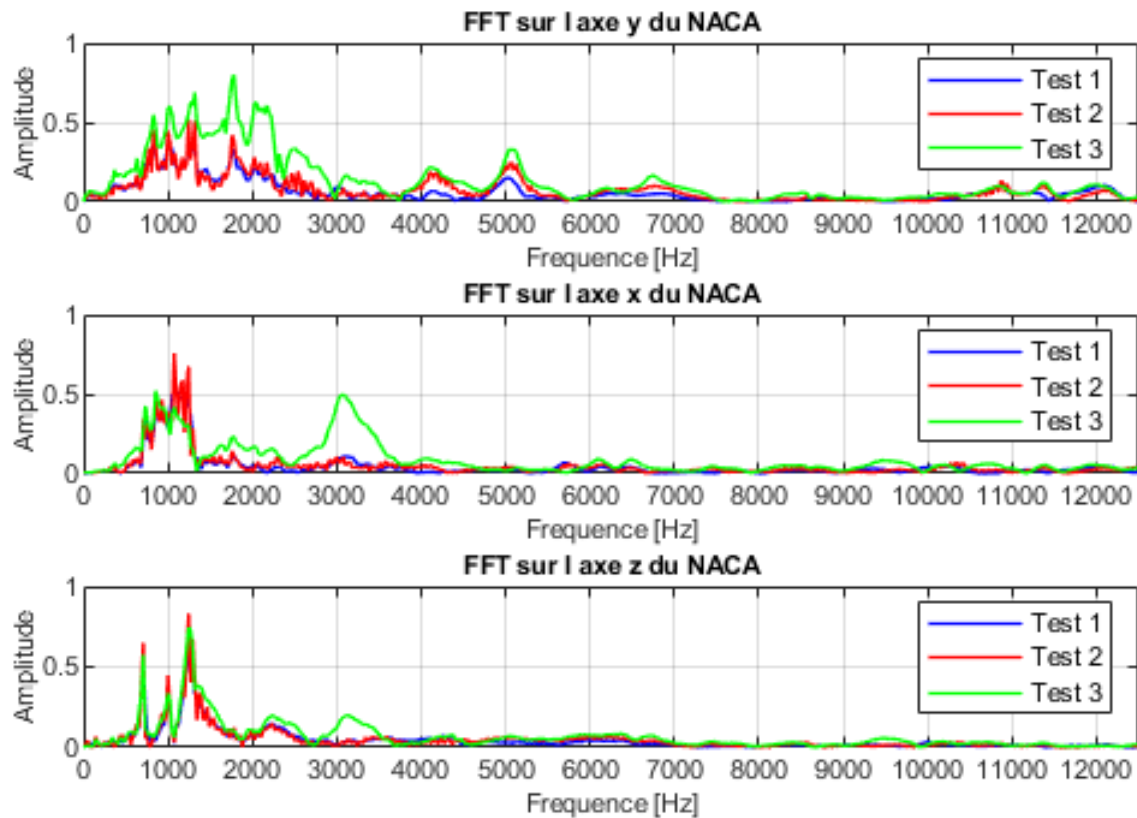
Analyse modale expérimentale dans l'air

1. Points d'impact

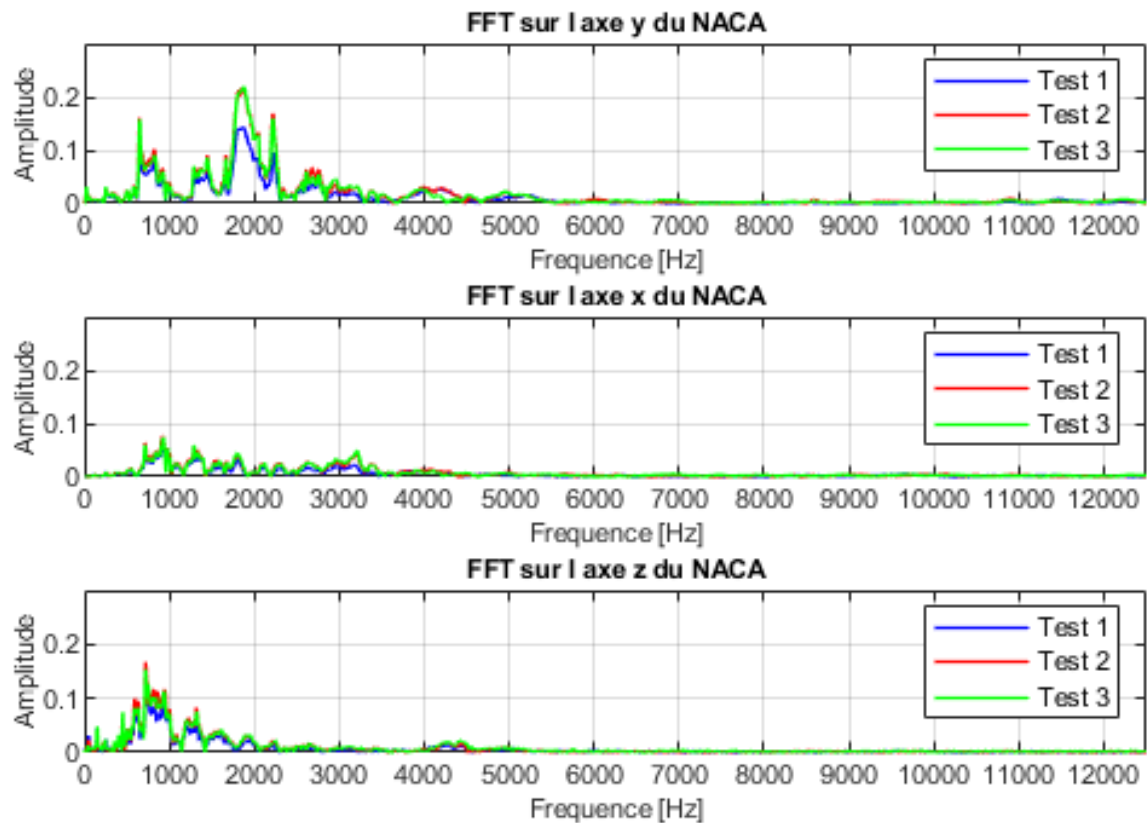
- a. Axe du profil NACA*
- b. Veine*
- c. Tuyau amont court*
- d. Tuyau amont long*
- e. Tuyau aval*

1. Point d'impact

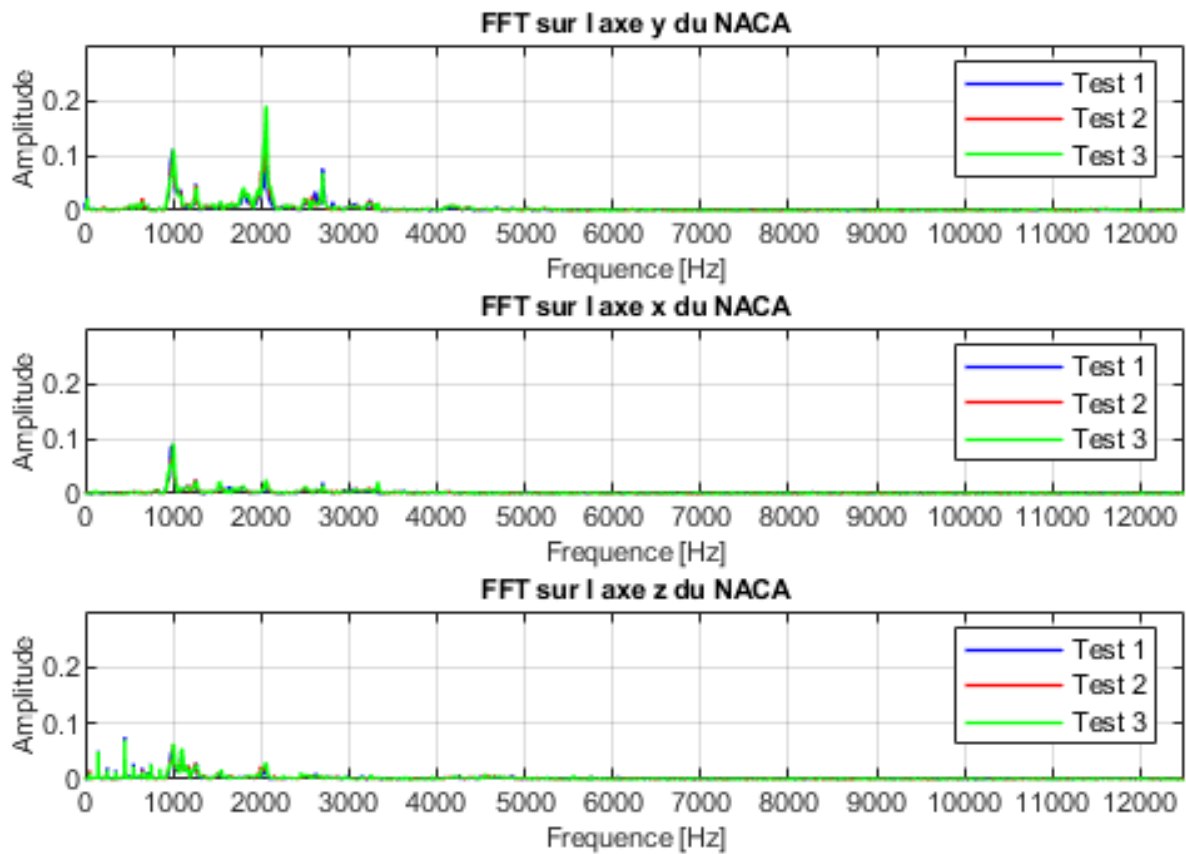
a. Point d'impact : Axe du profil NACA



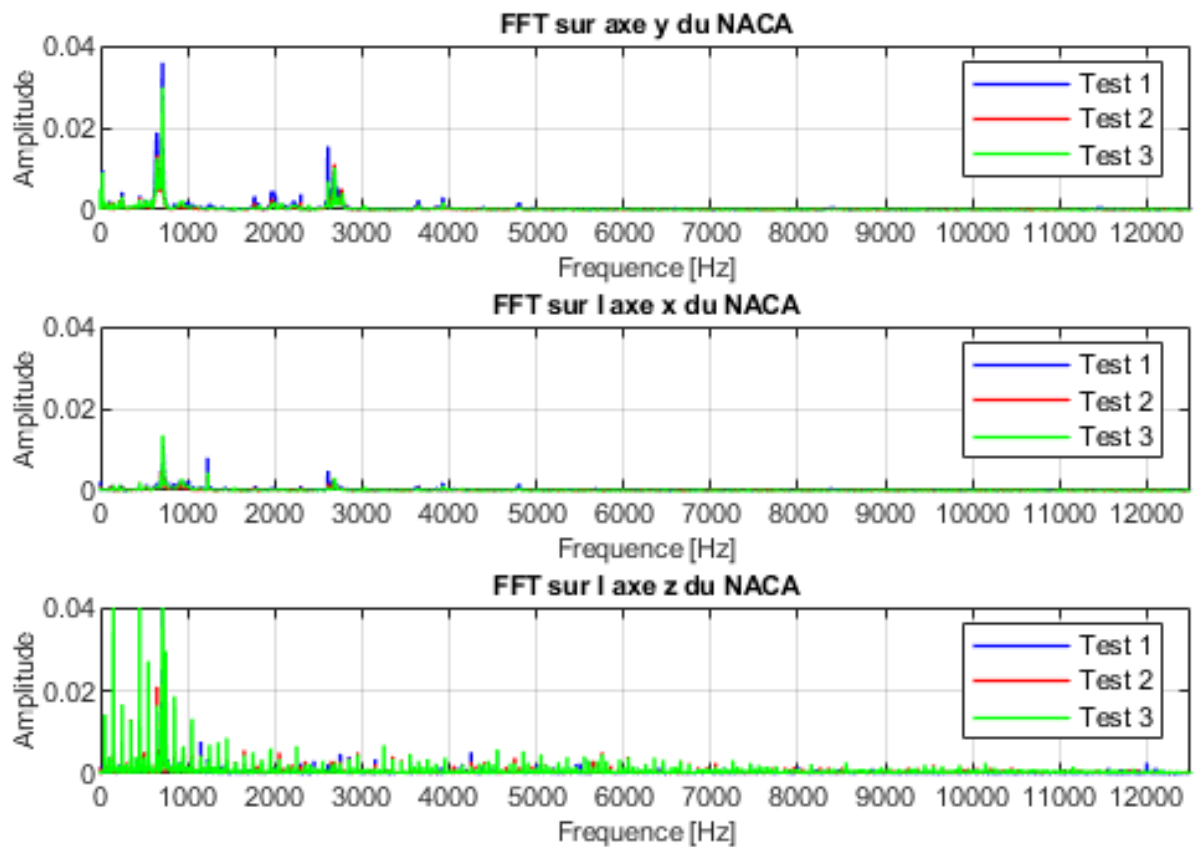
b. Point d'impact : Veine



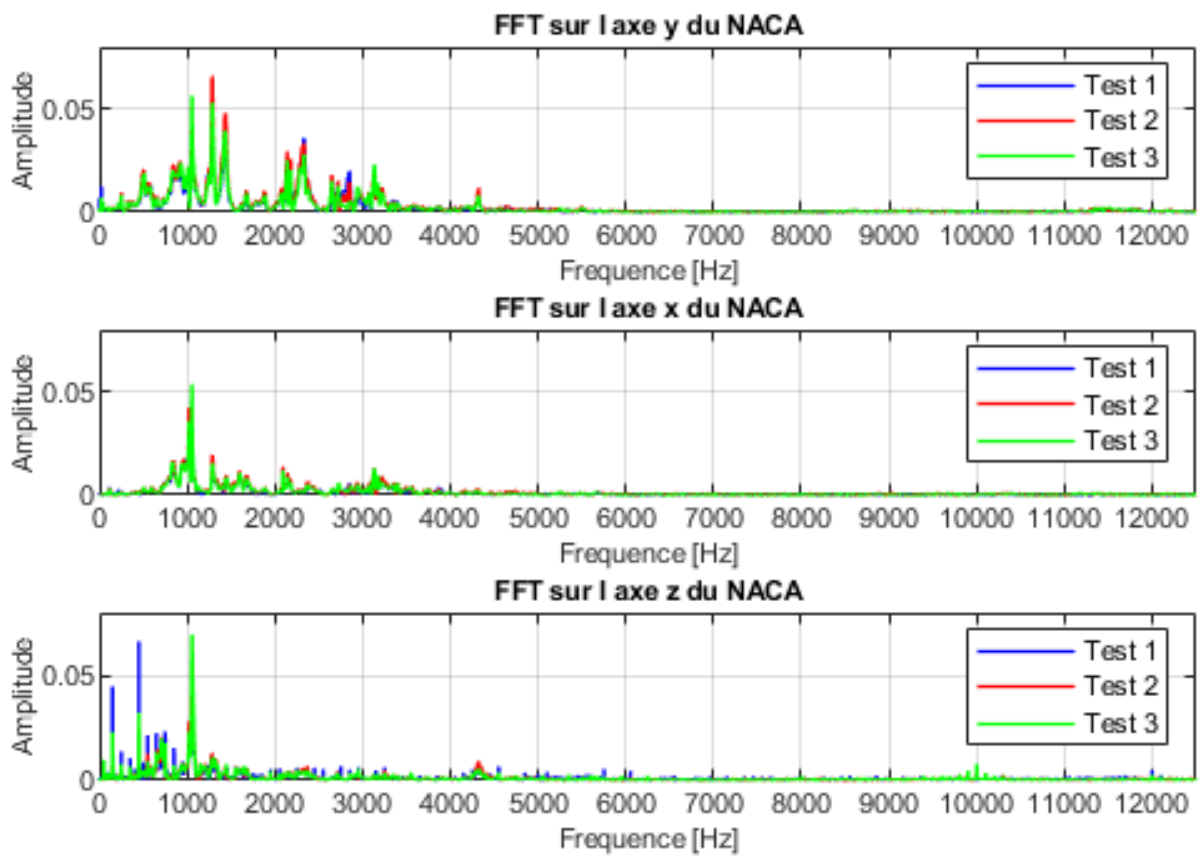
c. Point d'impact: *Tuyau amont court*



d. Point d'impact : *Tuyau amont long*



e. *Point d'impact : Tuyau aval*



ANNEXE 7

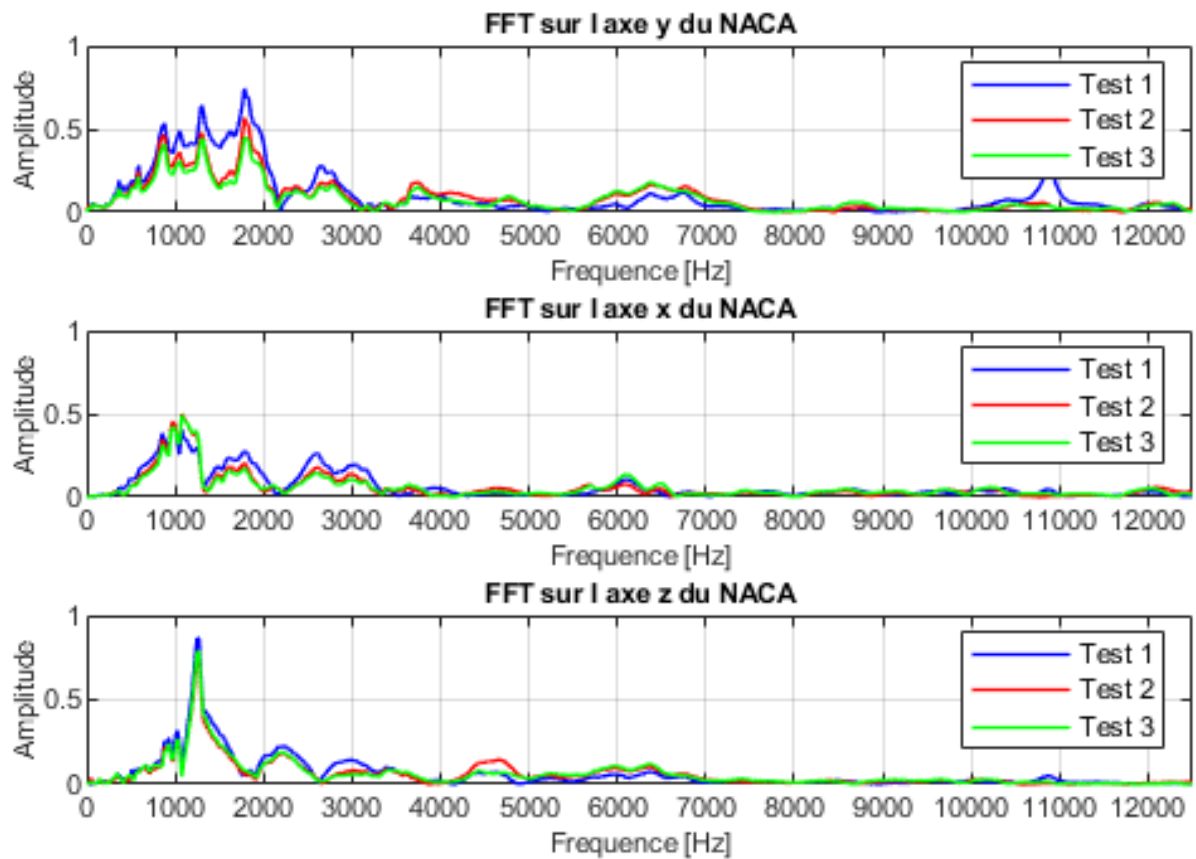
Analyse modale expérimentale dans l'eau

1. Points d'impact

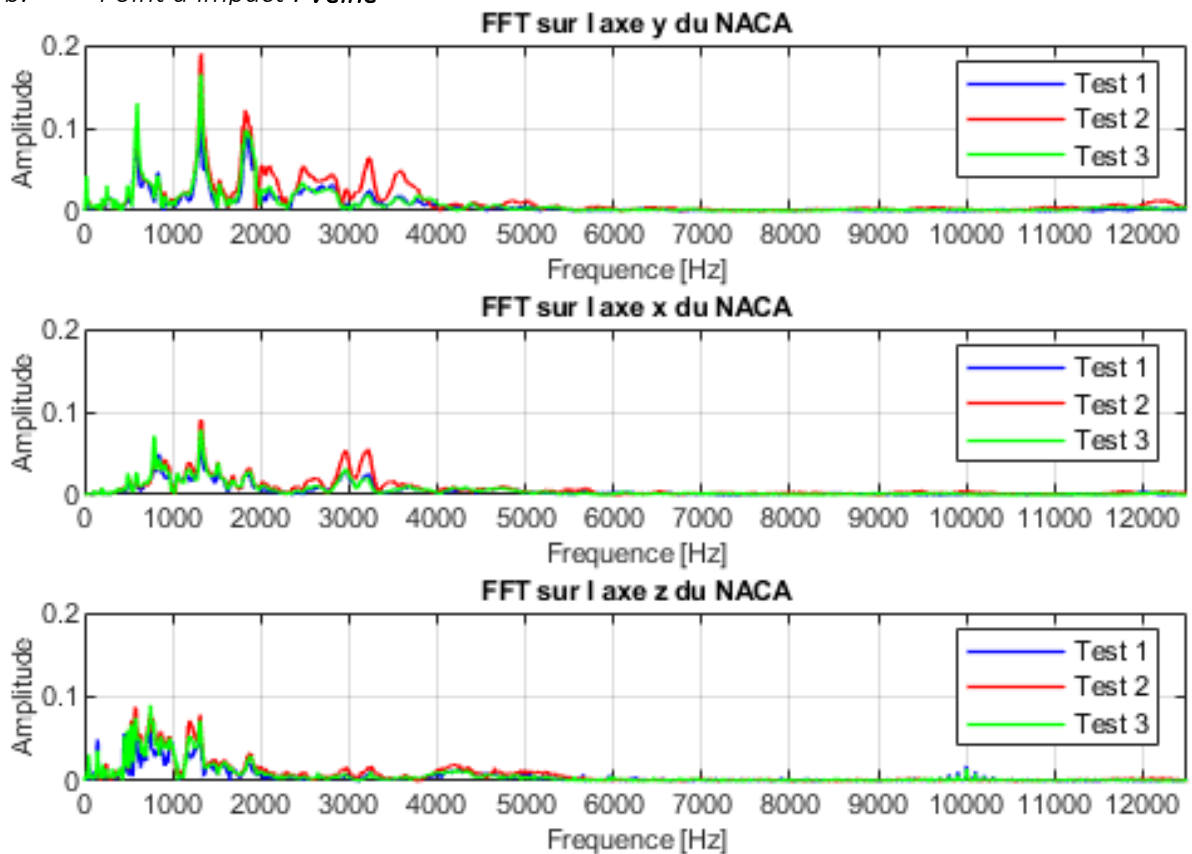
- a. Axe du profil NACA*
- b. Veine*
- c. Tuyau amont court*
- d. Tuyau amont long*
- e. Tuyau aval*

2. Points d'impact

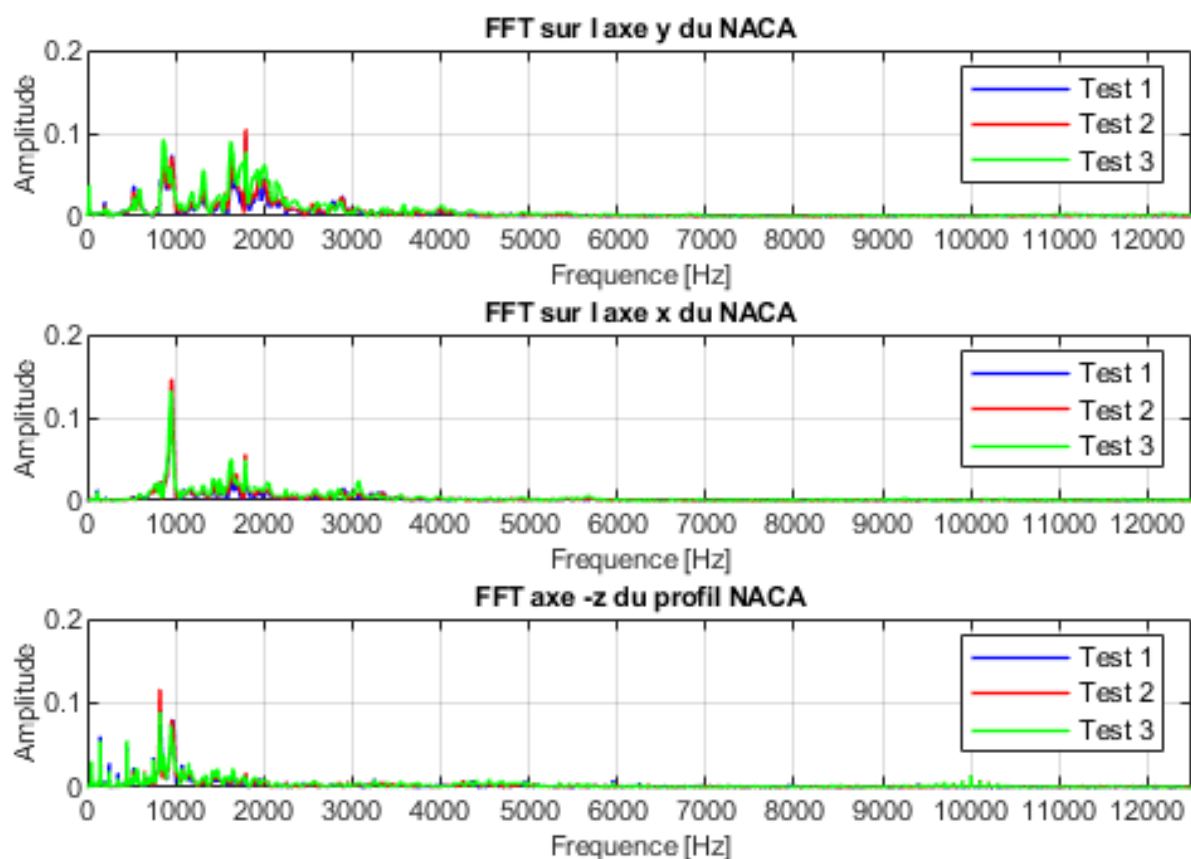
a. Point d'impact : Axe du profil NACA



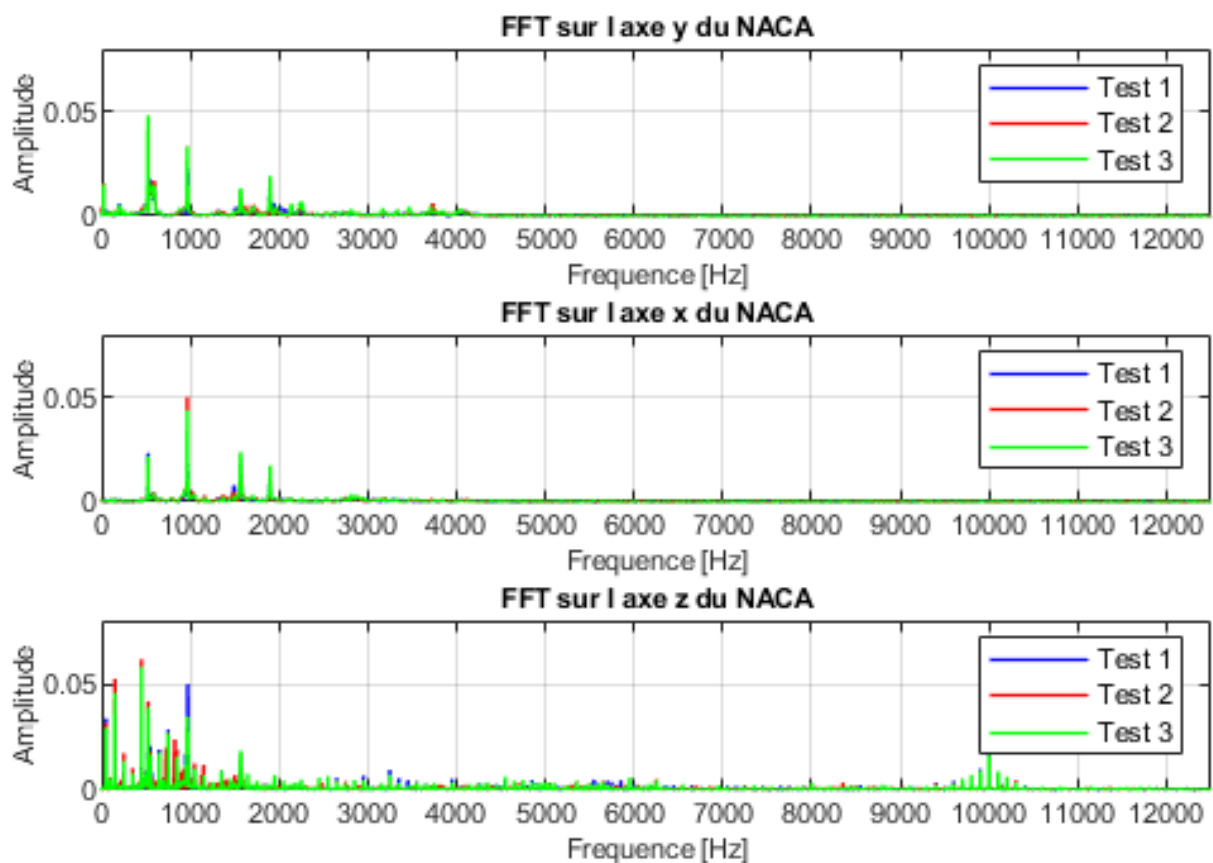
b. Point d'impact : Veine



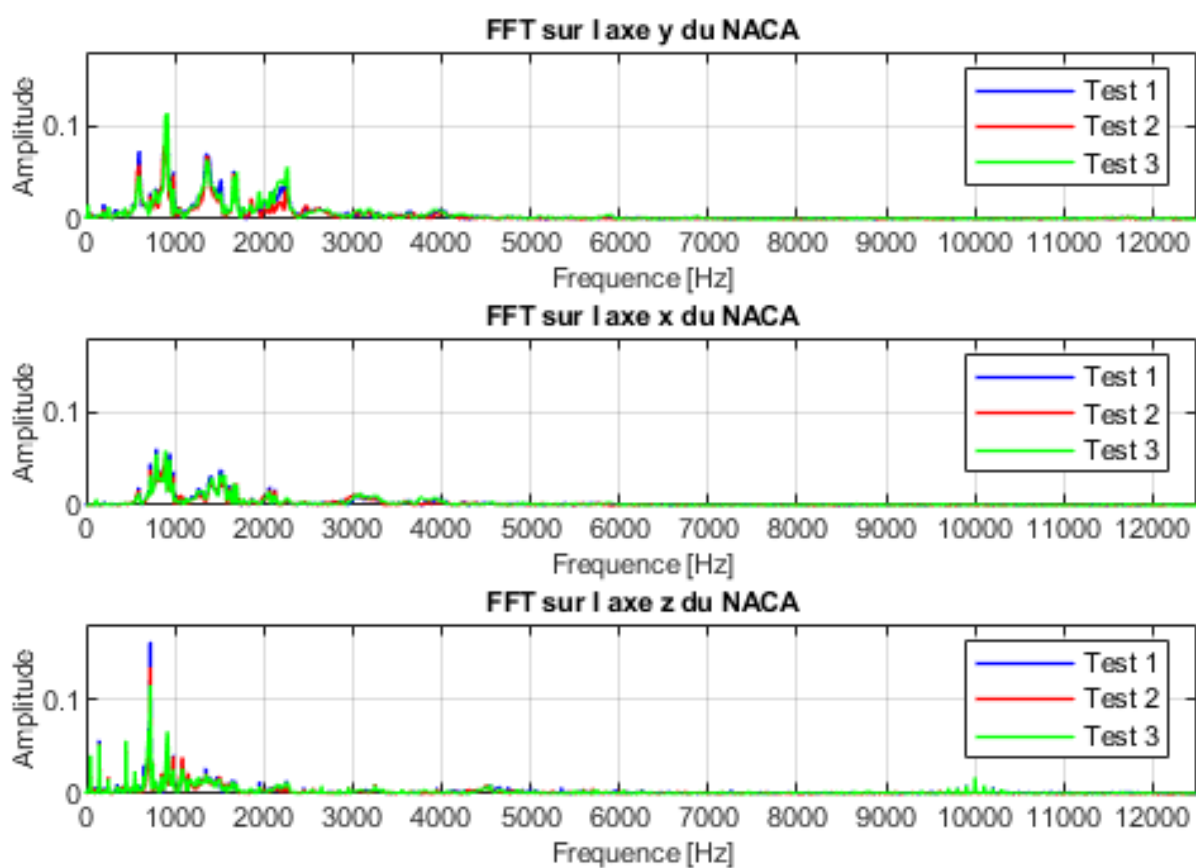
c. Point d'impact: *Tuyau amont court*



d. Point d'impact: *Tuyau amont long*



e. Point d'impact : Tuyau aval



ANNEXE 8

Périodogrammes et spectrogrammes accéléromètre

A. Périodogrammes

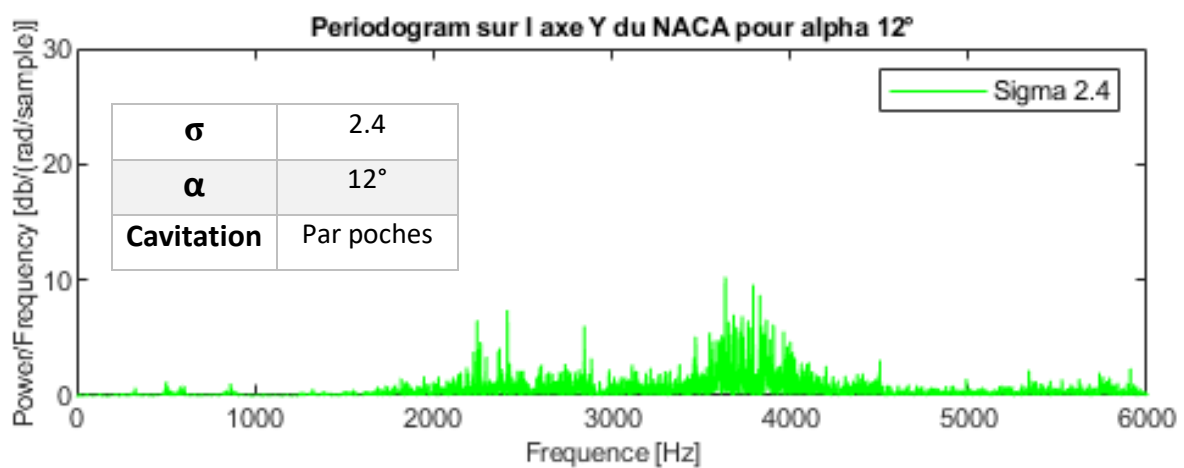
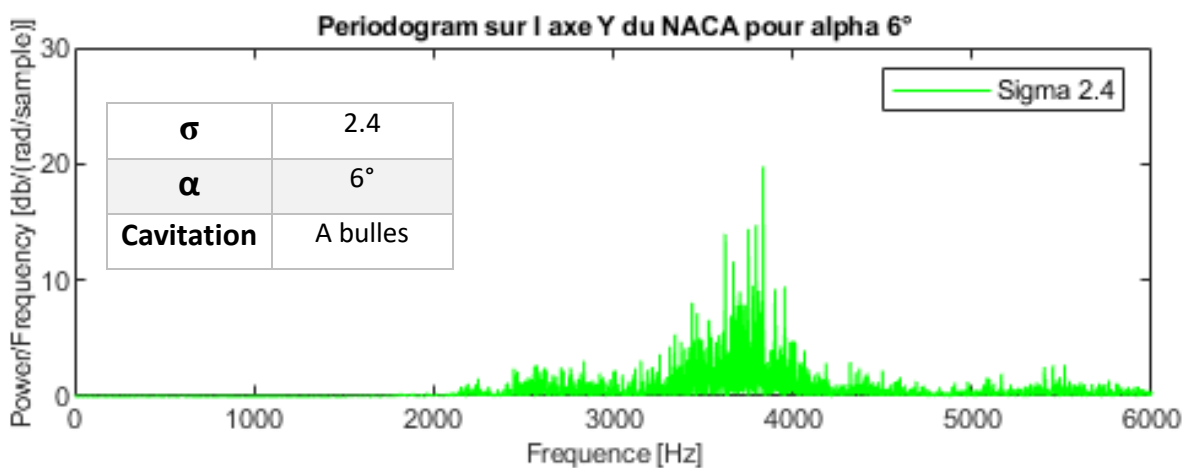
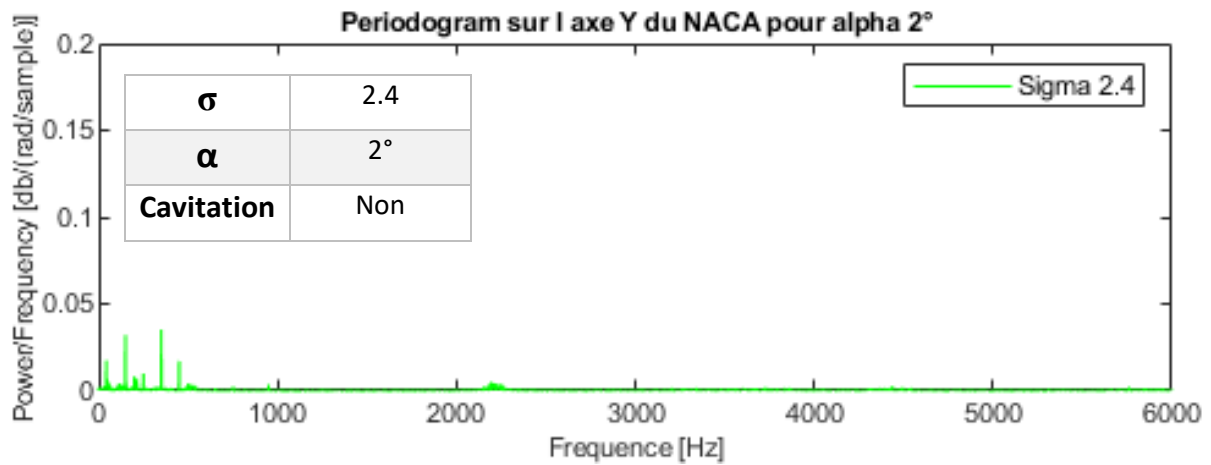
1. *Sigma 2.4*
2. *Sigma 2.7*
3. *Sigma 3.1*
4. *Sigma 3.7*
5. *Sigma 4*
6. *Sigma 4.4*

B. Spectrogrammes

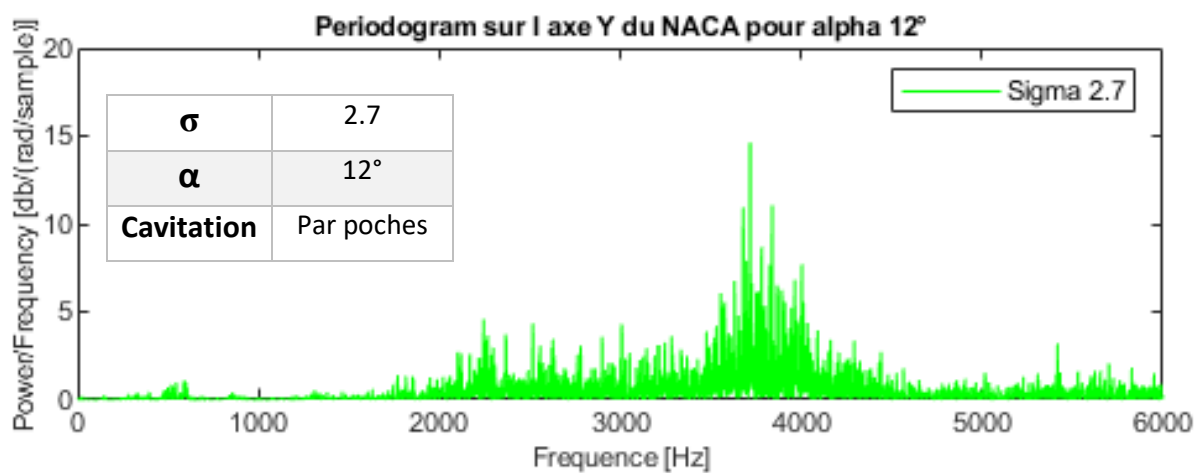
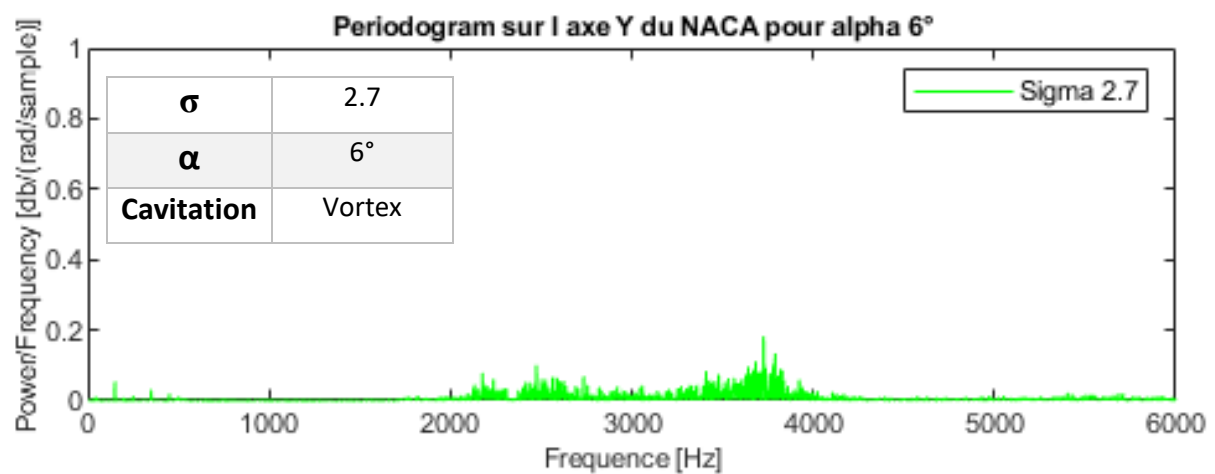
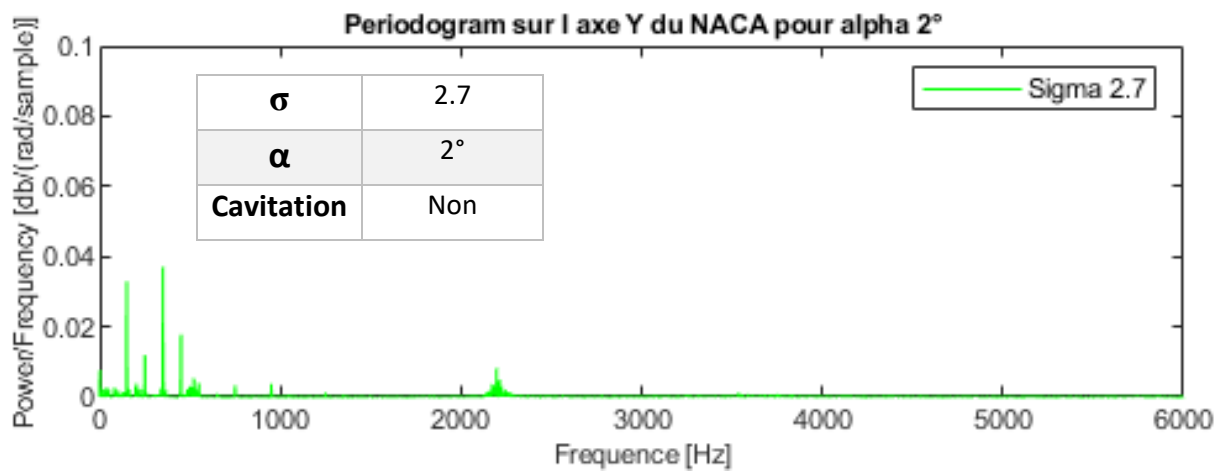
7. *Sigma 2.4*
8. *Sigma 2.7*
9. *Sigma 3.1*
10. *Sigma 3.7*
11. *Sigma 4*
12. *Sigma 4.4*

A. Périodogrammes des signaux de l'accéléromètre

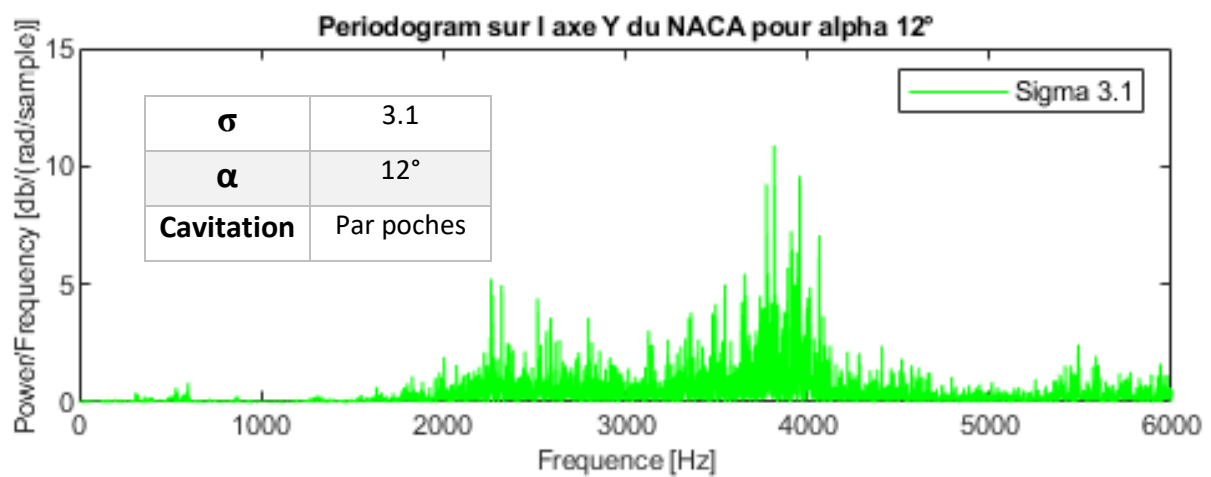
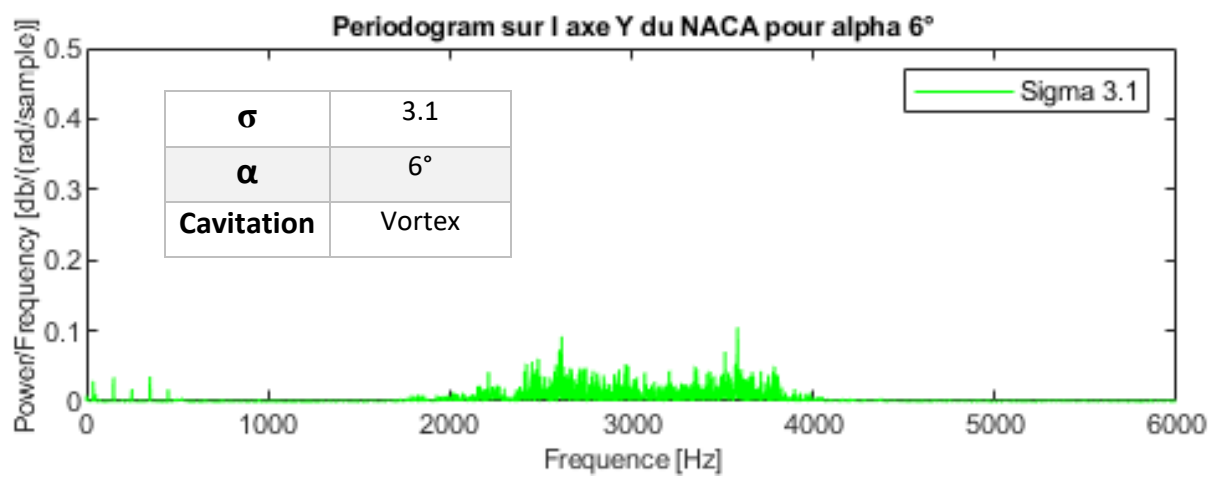
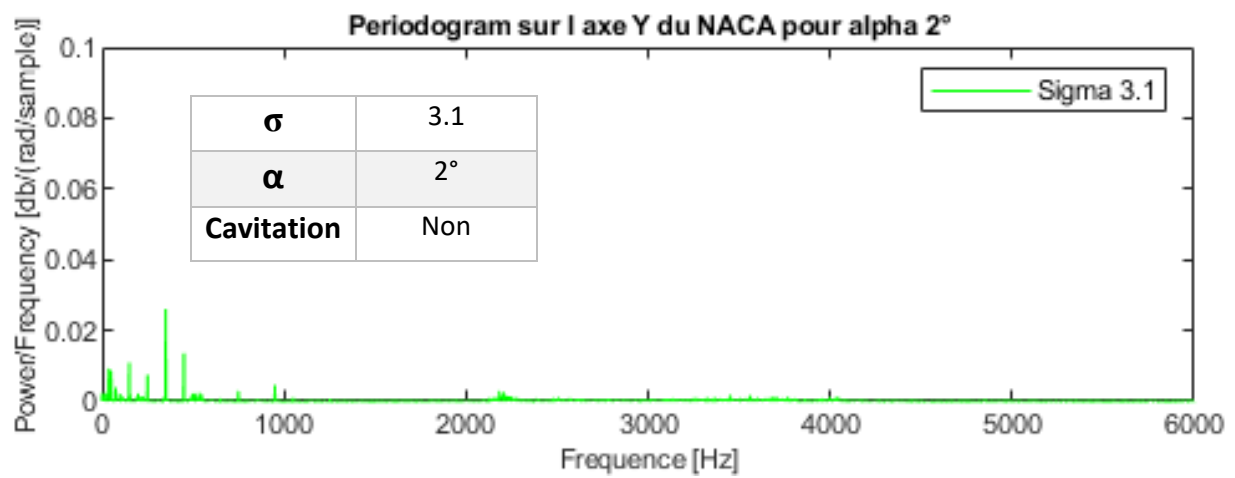
1. *Sigma 2.4*



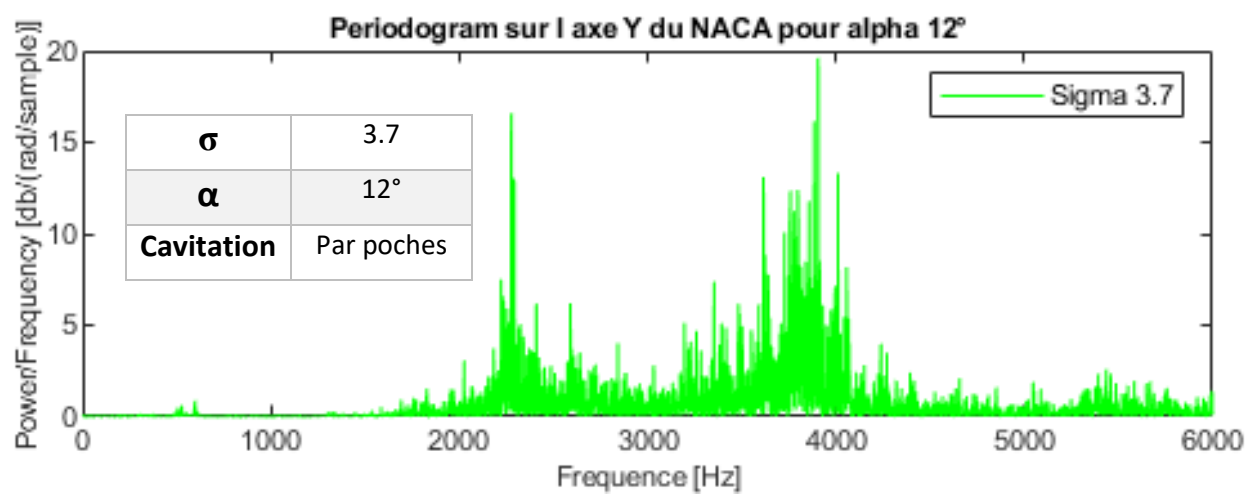
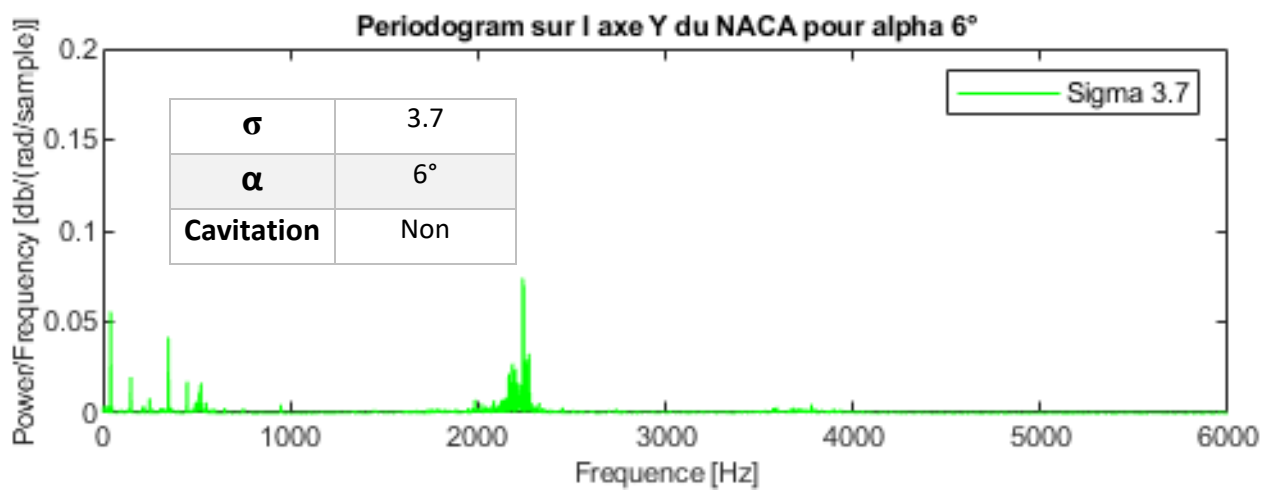
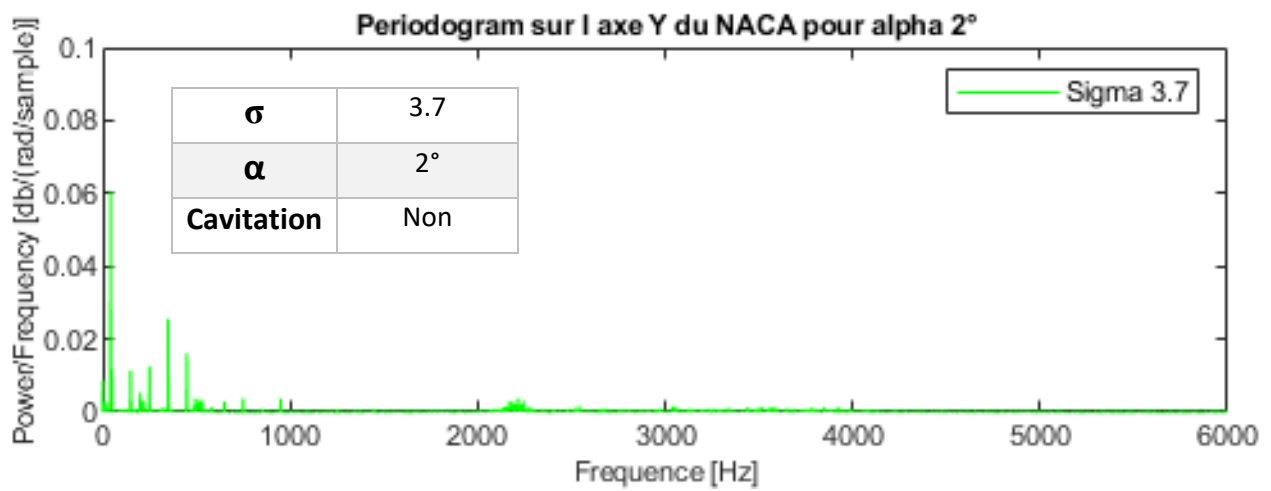
2. Sigma 2.7



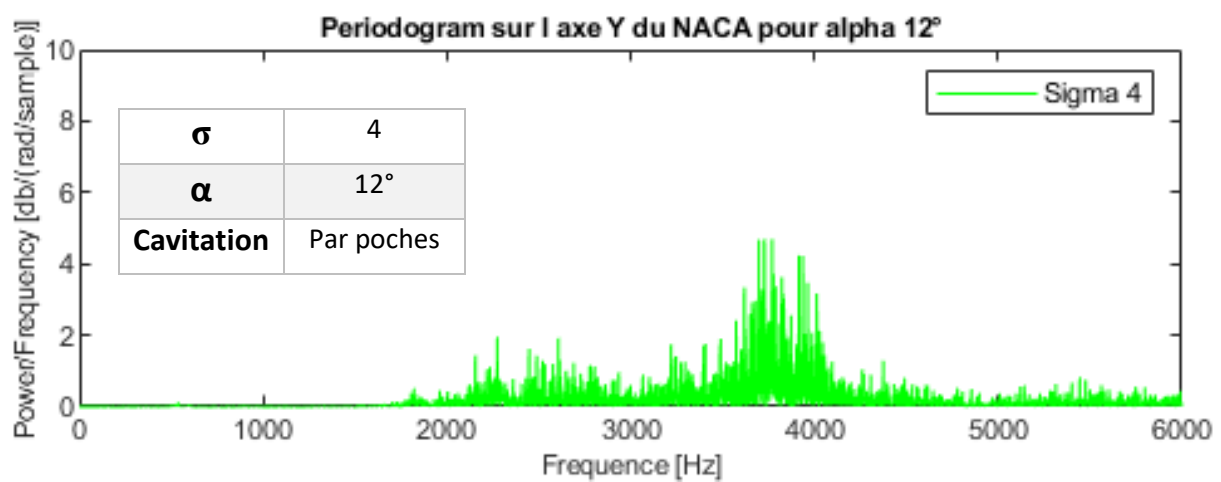
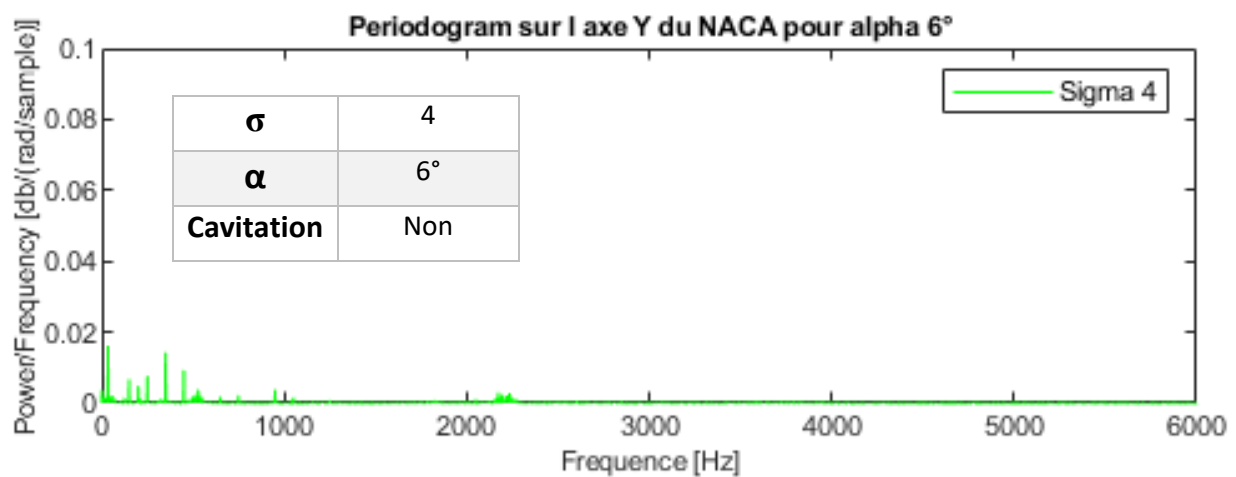
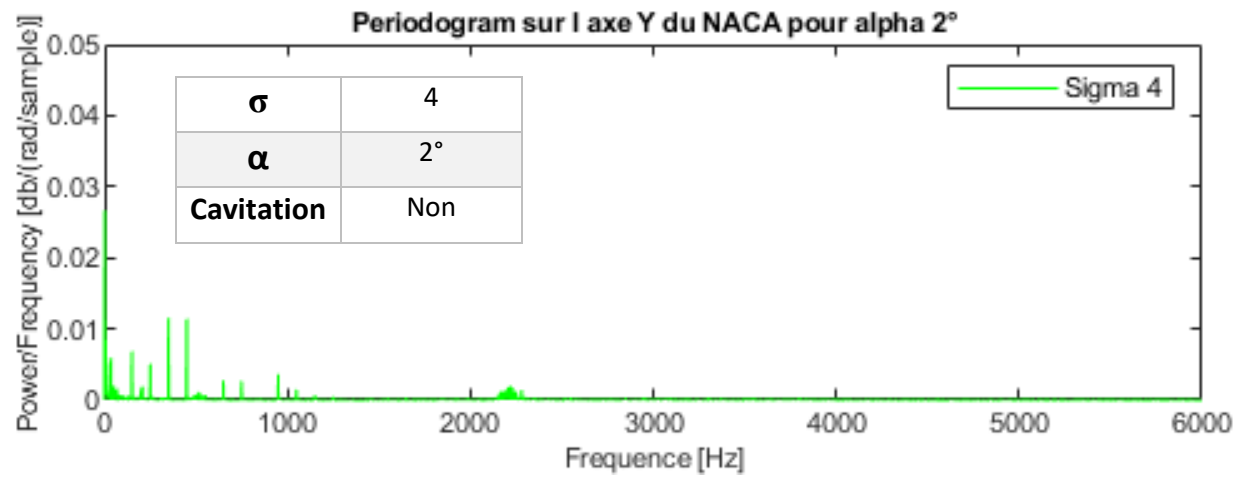
3. *Sigma 3.1*



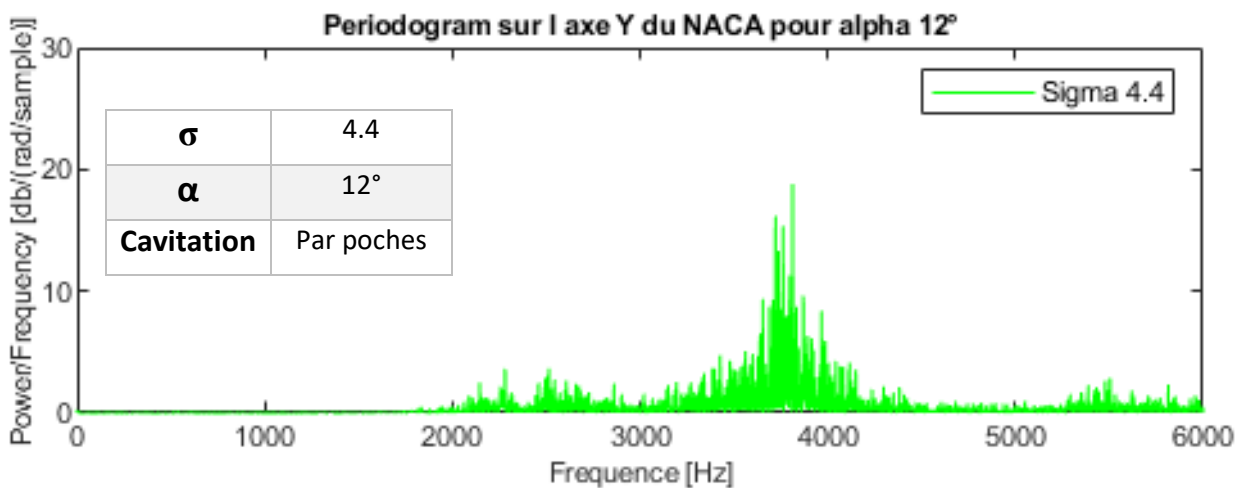
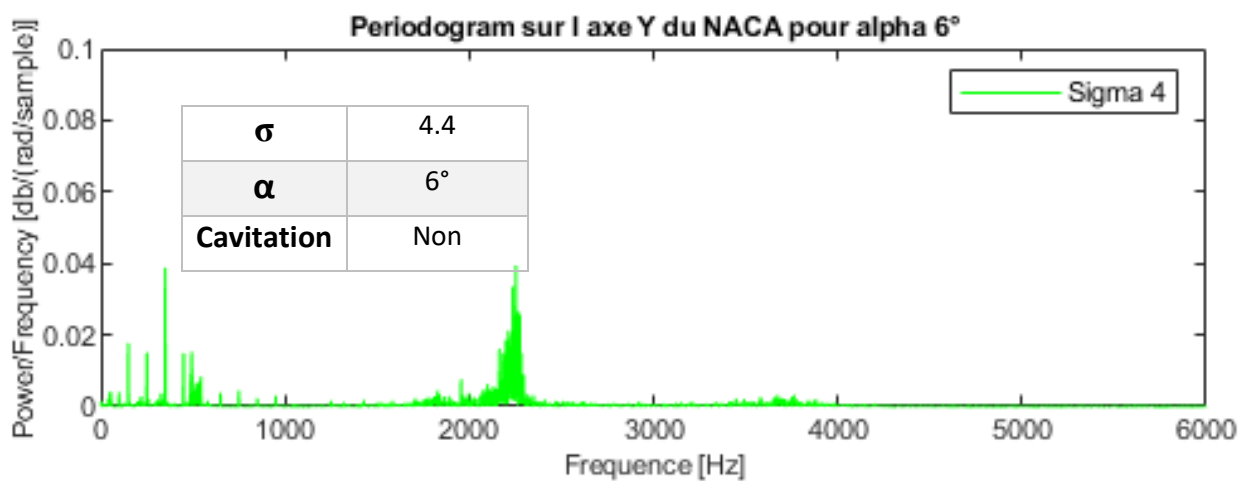
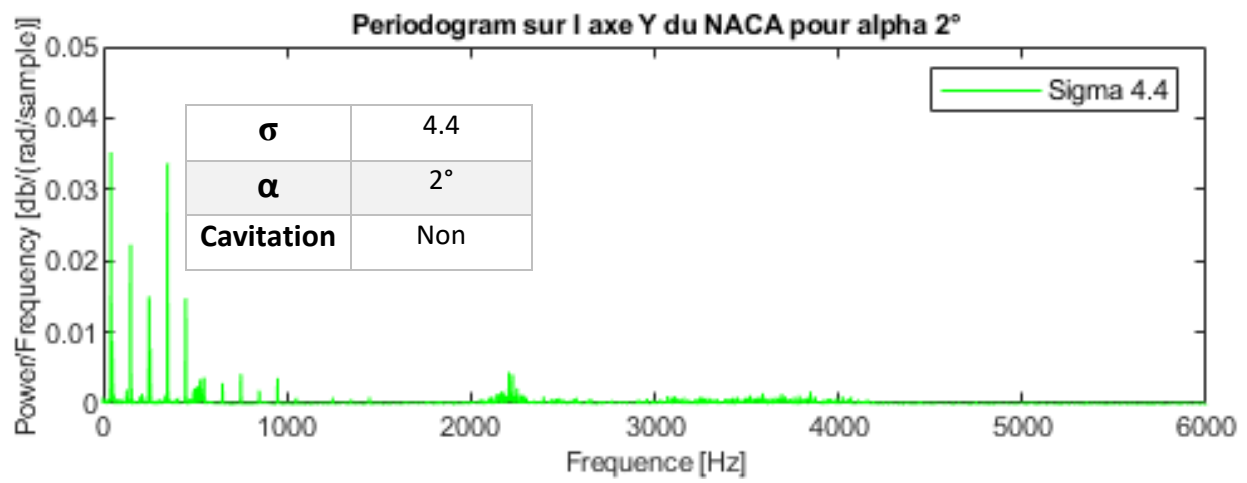
4. *Sigma 3.7*



5. Sigma 4

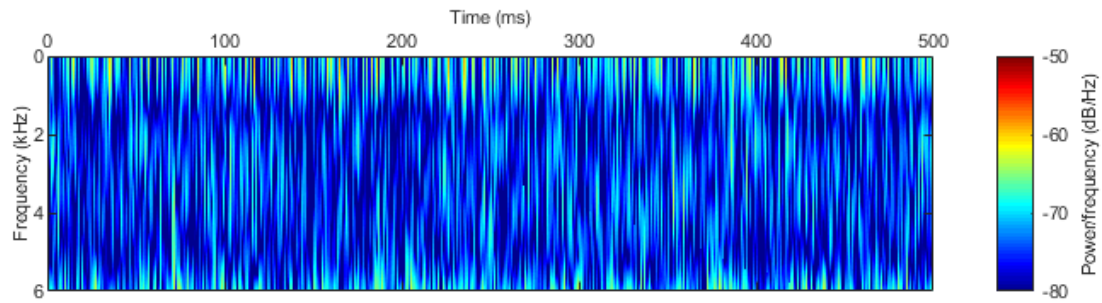


6. *Sigma 4.4*

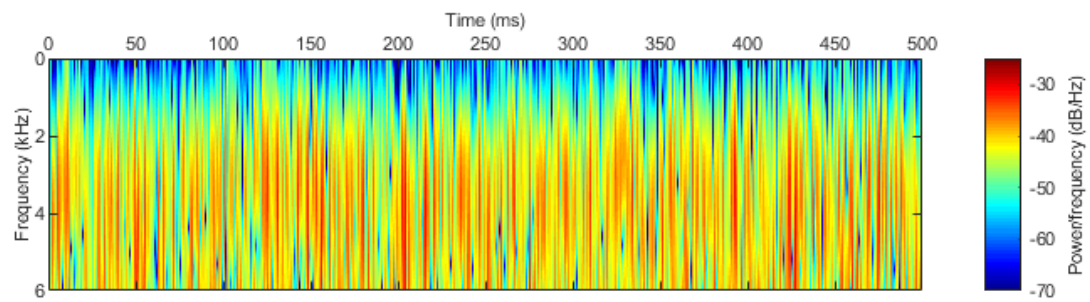


B. Spectrogrammes des signaux de l'accéléromètre

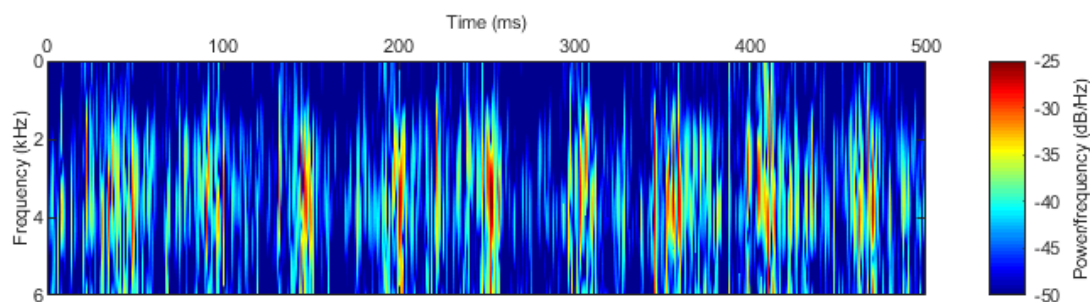
A. *Sigma 2.4*



σ	2.4
α	2°
Cavitation	Non

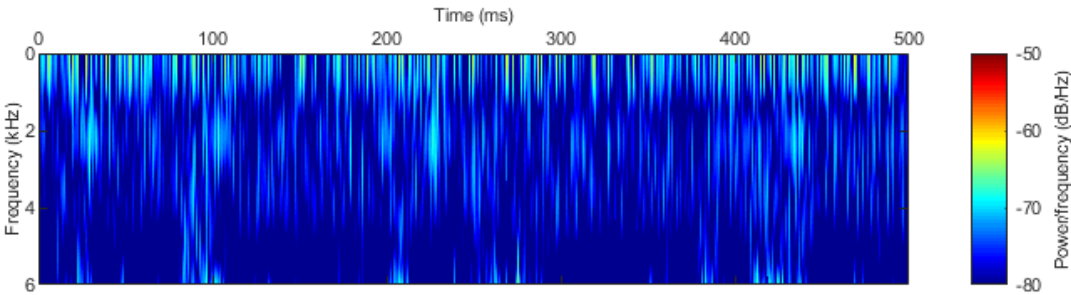


σ	2.4
α	6°
Cavitation	A bulles

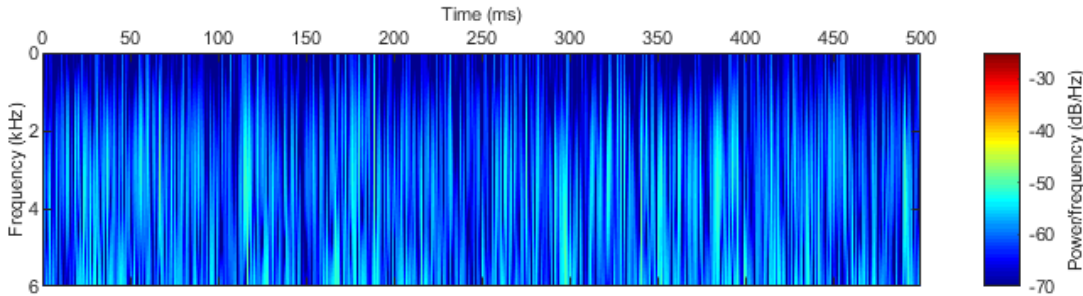


σ	2.4
α	12°
Cavitation	Par poches

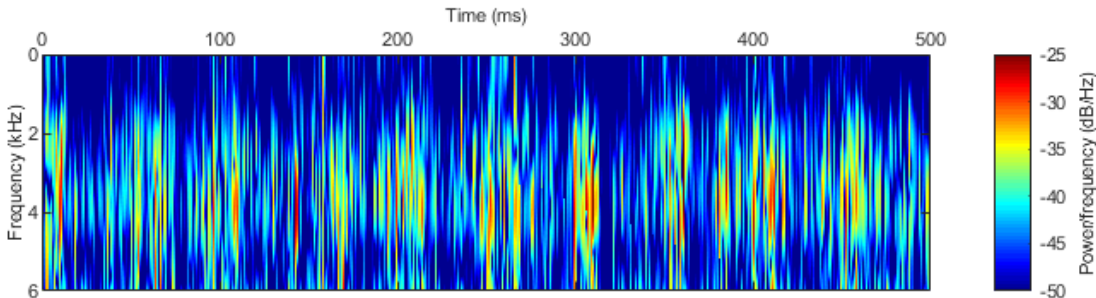
B. *Sigma 2.7*



σ	2.7
α	2°
Cavitation	Non

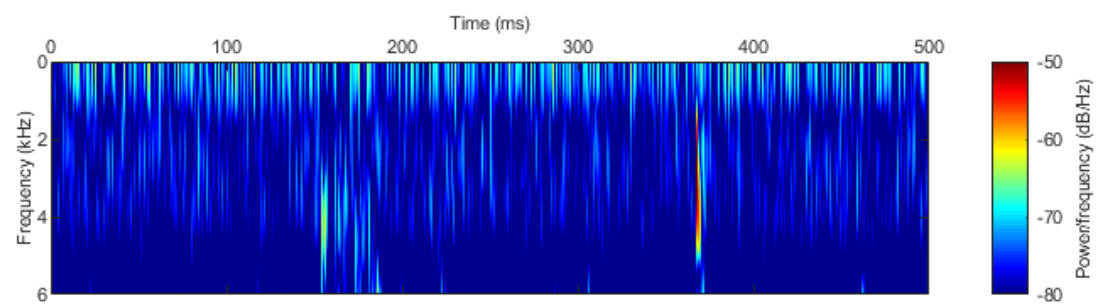


σ	2.7
α	6°
Cavitation	Vortex

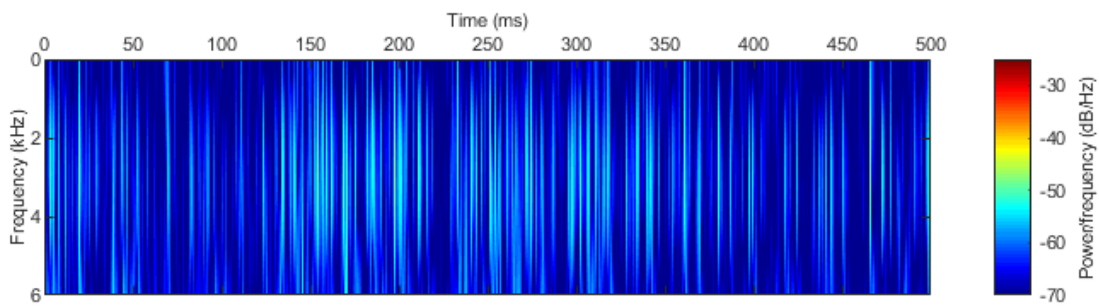


σ	2.7
α	12°
Cavitation	Par poches

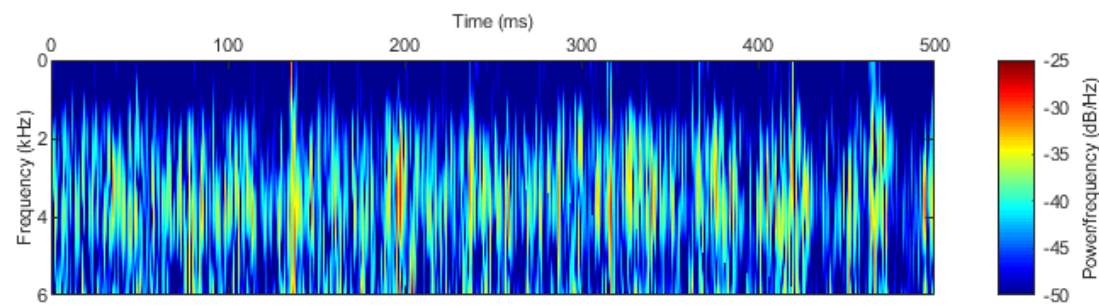
C. *Sigma 3.1*



σ	3.1
α	2°
Cavitation	Non

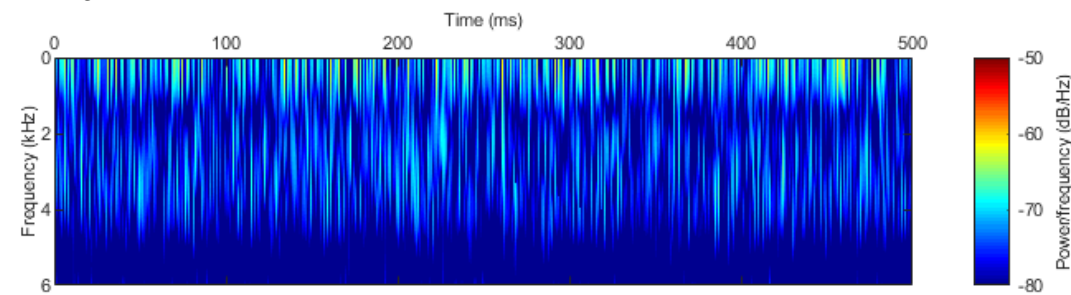


σ	3.1
α	6°
Cavitation	Vortex

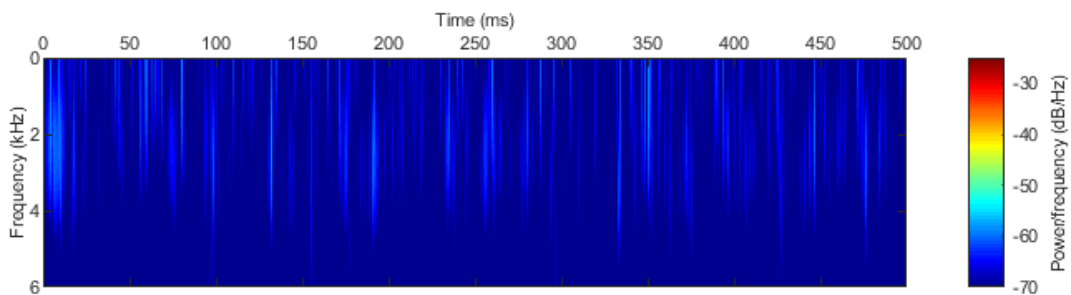


σ	3.1
α	12°
Cavitation	Par poches

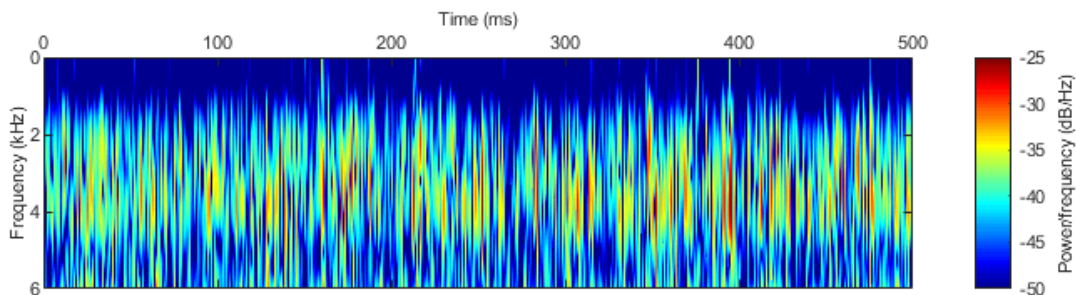
D. *Sigma 3.7*



σ	3.7
α	2°
Cavitation	Non

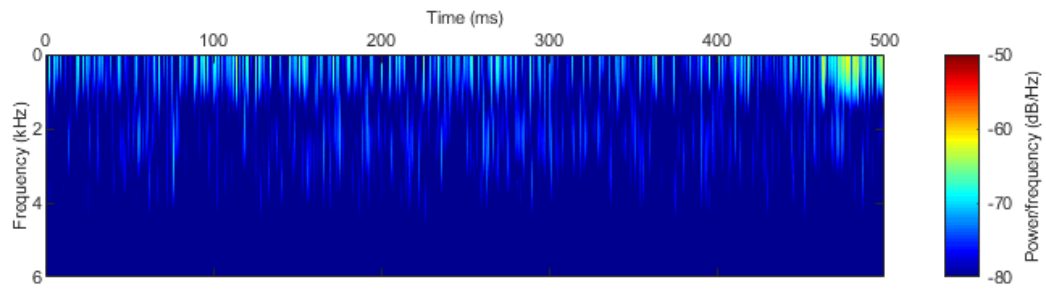


σ	3.7
α	6°
Cavitation	Non

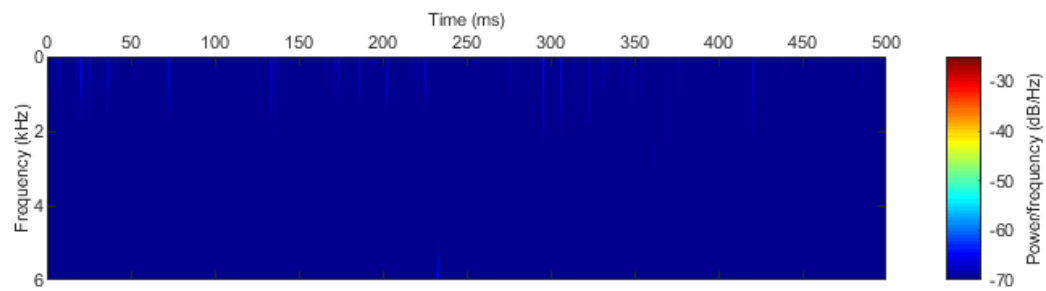


σ	3.7
α	12°
Cavitation	Par poches

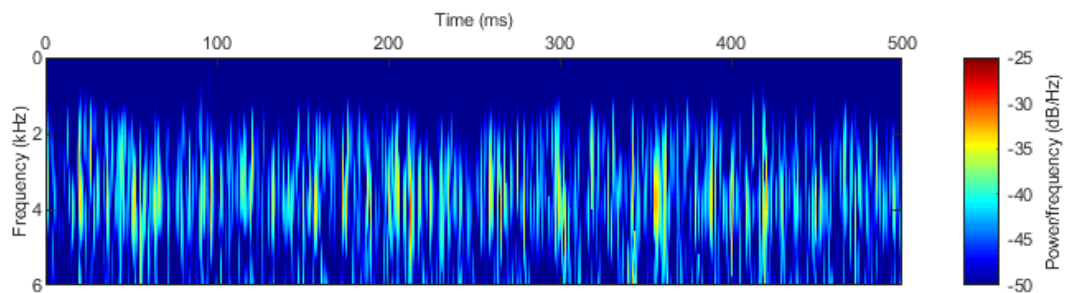
E. *Sigma 4*



σ	4
α	2°
Cavitation	Non

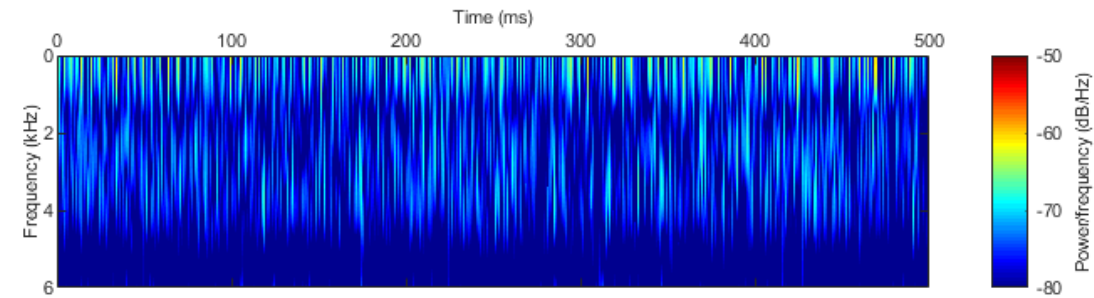


σ	4
α	6°
Cavitation	Non

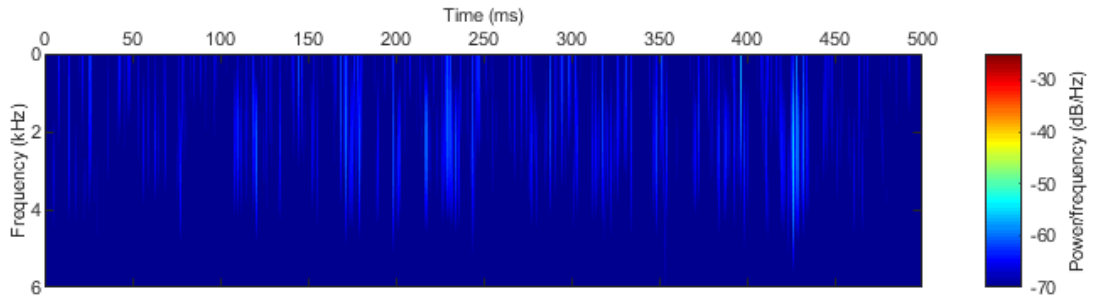


σ	4
α	12°
Cavitation	Par poches

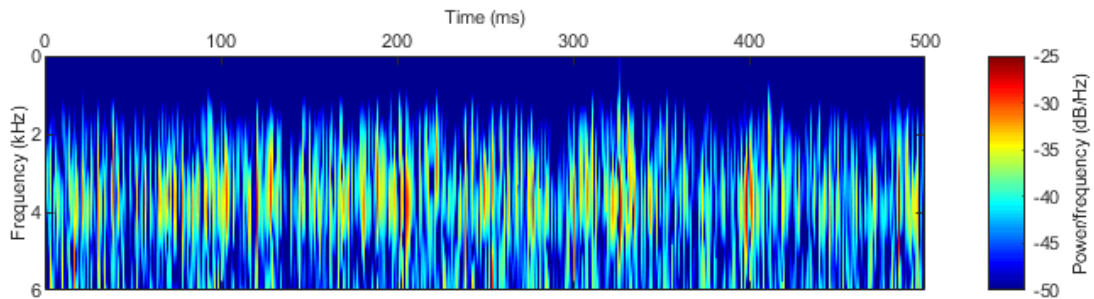
F. *Sigma 4.4*



σ	4.4
α	2°
Cavitation	Non



σ	4.4
α	6°
Cavitation	Non



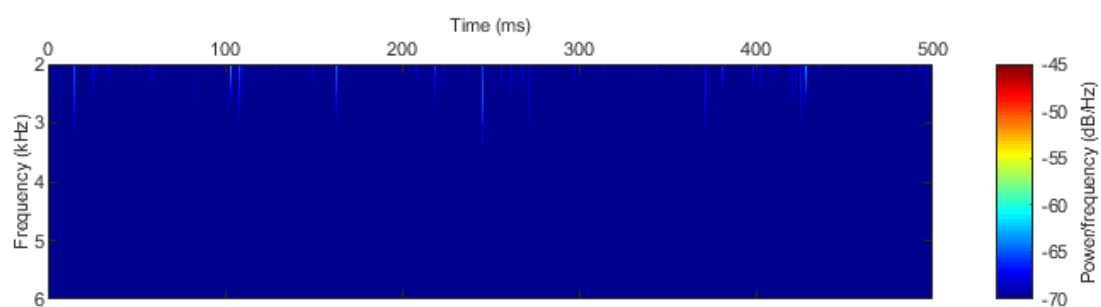
σ	4.4
α	12°
Cavitation	Par poches

ANNEXE 9

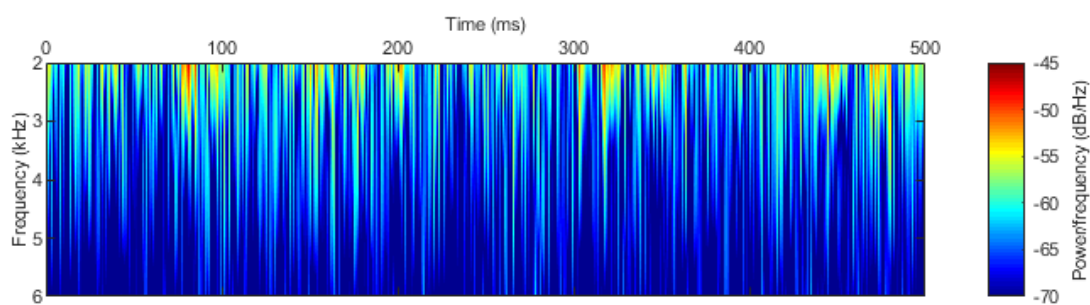
Spectrogrammes microphone

1. *Sigma 2.4*
2. *Sigma 2.7*
3. *Sigma 3.1*
4. *Sigma 3.7*
5. *Sigma 4*
6. *Sigma 4.4*

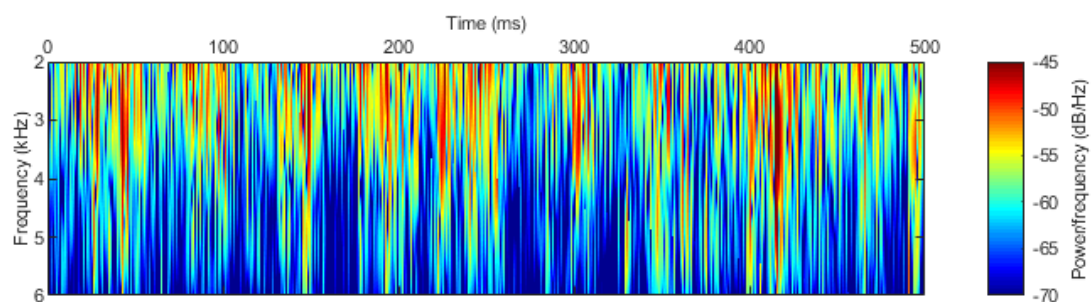
1. *Sigma 2.4 : Microphone*



σ	2.4
α	2°
Cavitation	Non

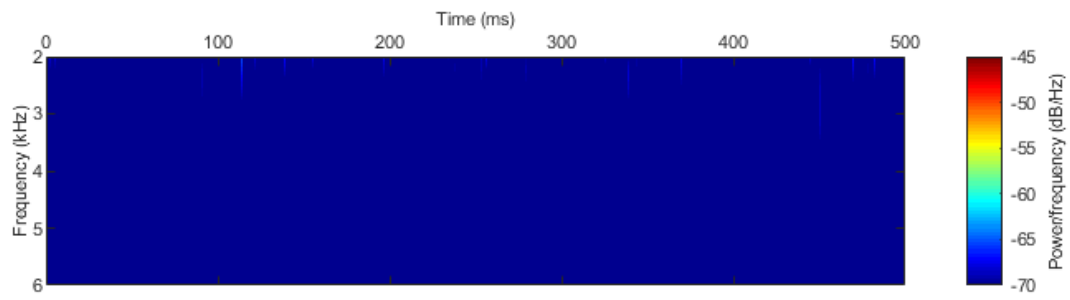


σ	2.4
α	6°
Cavitation	A bulles

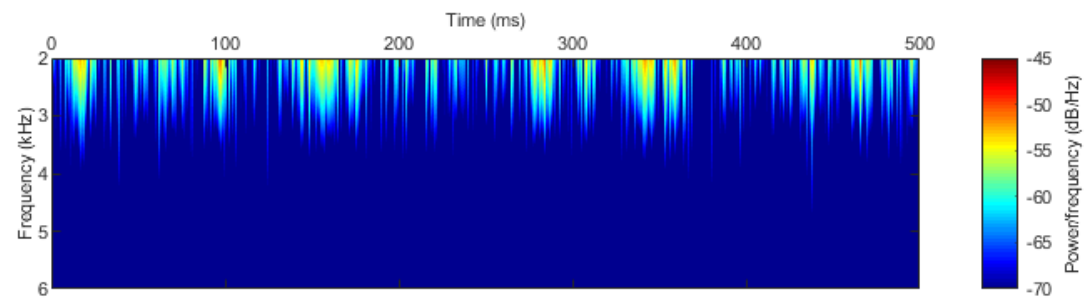


σ	2.4
α	12°
Cavitation	Par poches

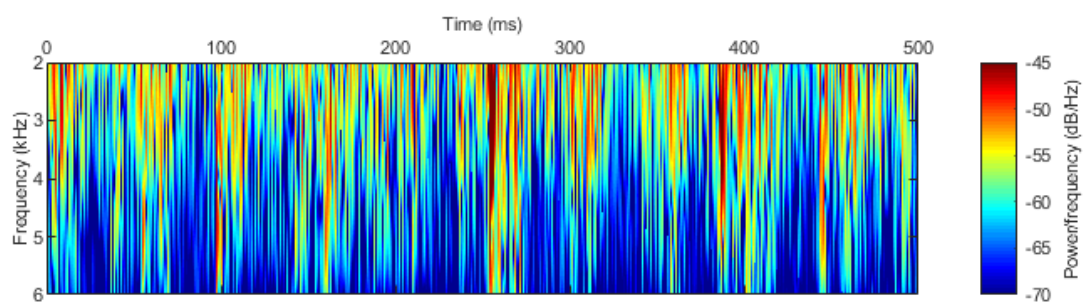
2. *Sigma 2.7 : Microphone*



σ	2.7
α	2°
Cavitation	Non

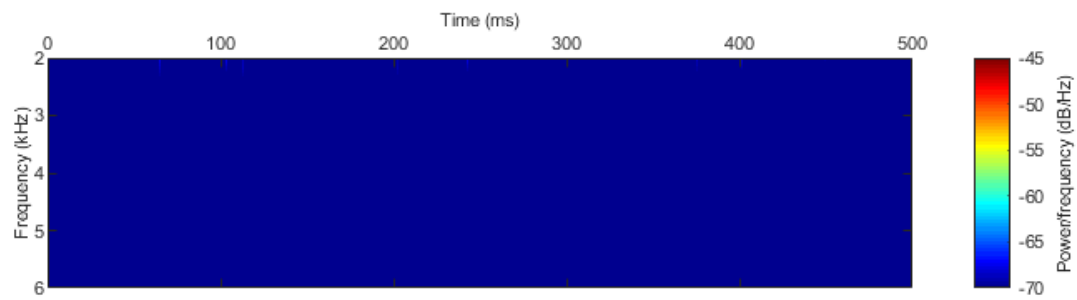


σ	2.7
α	6°
Cavitation	Vortex

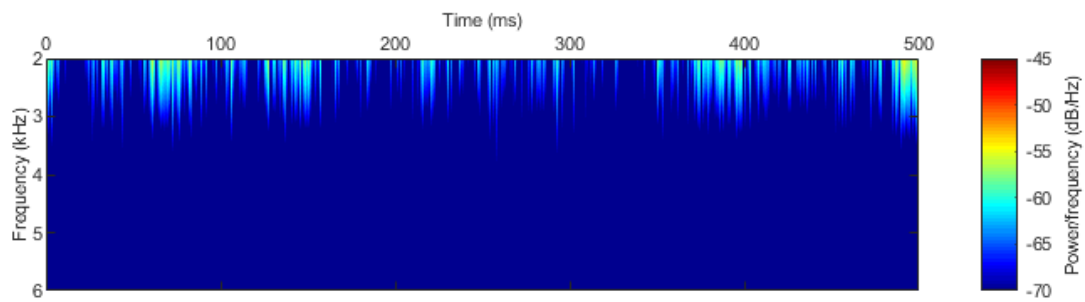


σ	2.7
α	12°
Cavitation	Par poches

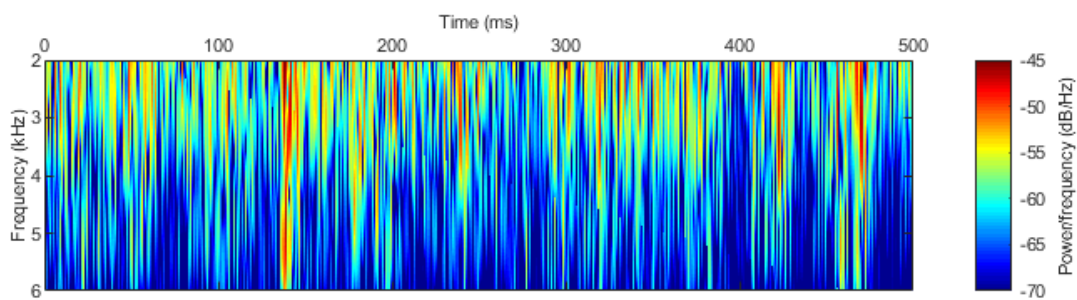
3. *Sigma 3.1 : Microphone*



σ	3.1
α	2°
Cavitation	Non

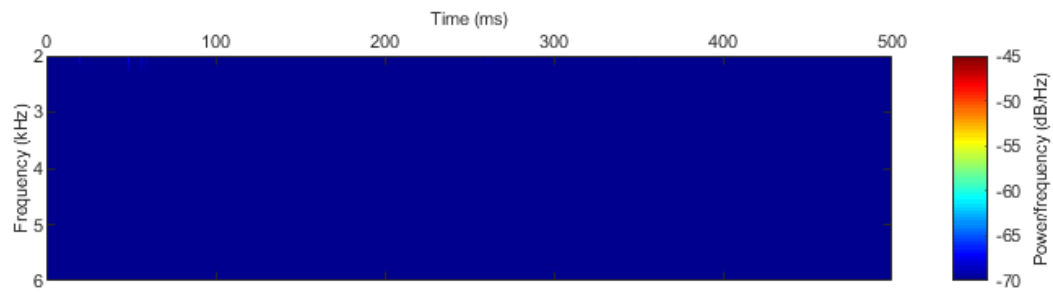


σ	3.1
α	6°
Cavitation	Vortex

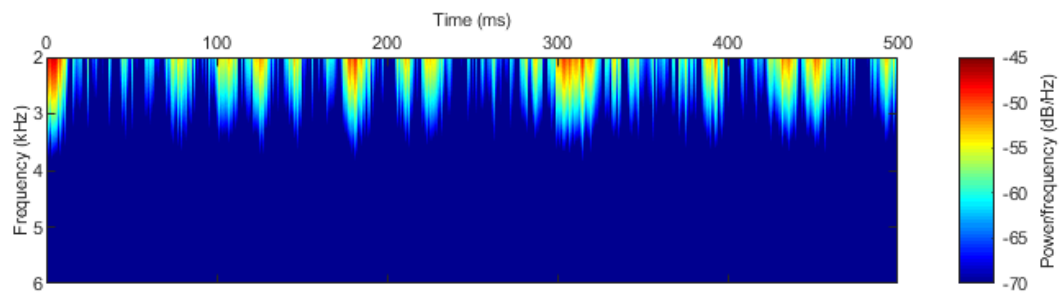


σ	3.1
α	12°
Cavitation	Par poches

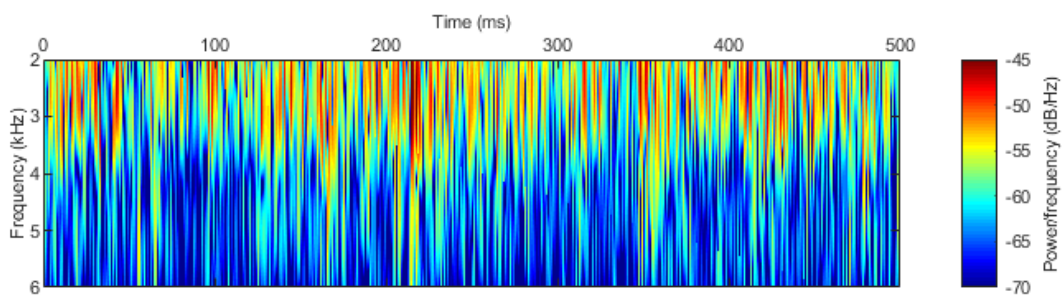
4. *Sigma 3.7 : Microphone*



σ	3.7
α	2°
Cavitation	Non

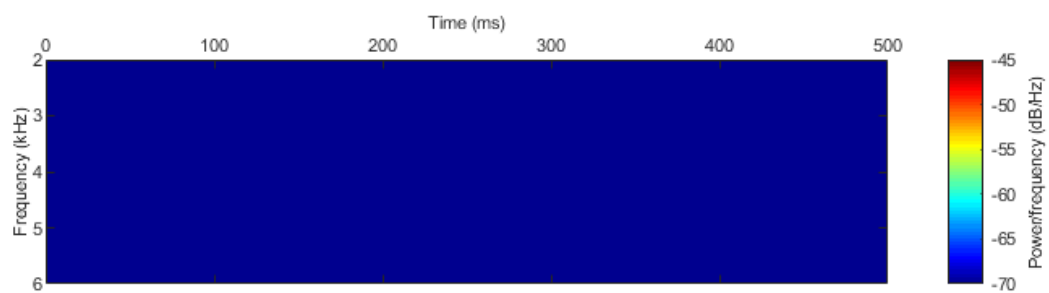


σ	3.7
α	6°
Cavitation	Non

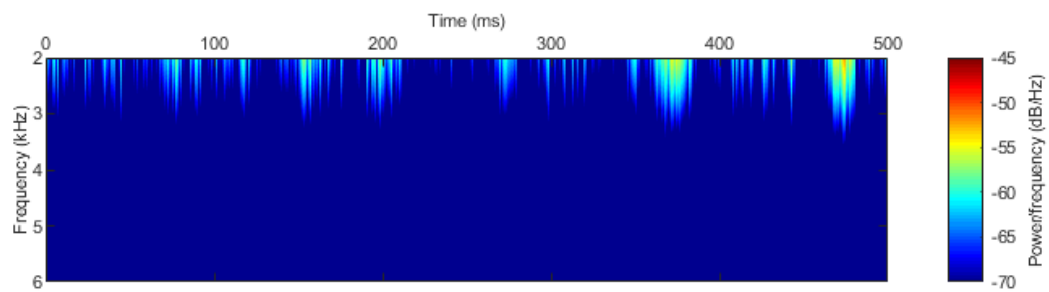


σ	3.7
α	12°
Cavitation	Par poches

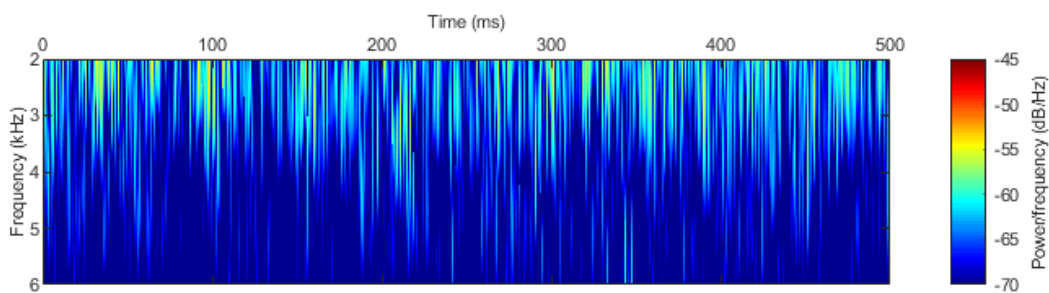
5. *Sigma 4 : Microphone*



σ	4
α	2°
Cavitation	Non

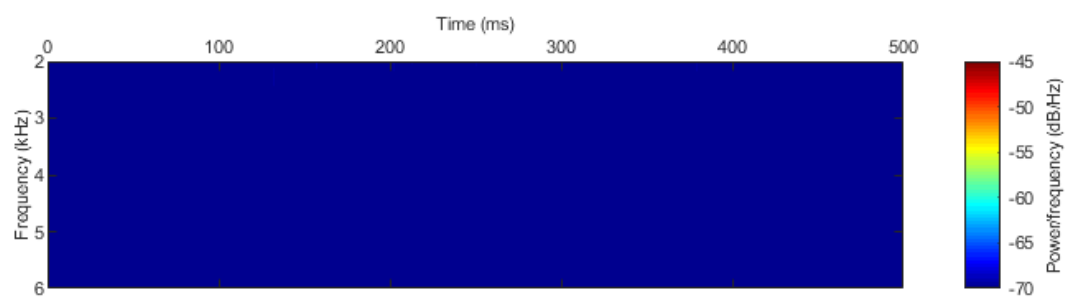


σ	4
α	6°
Cavitation	Non

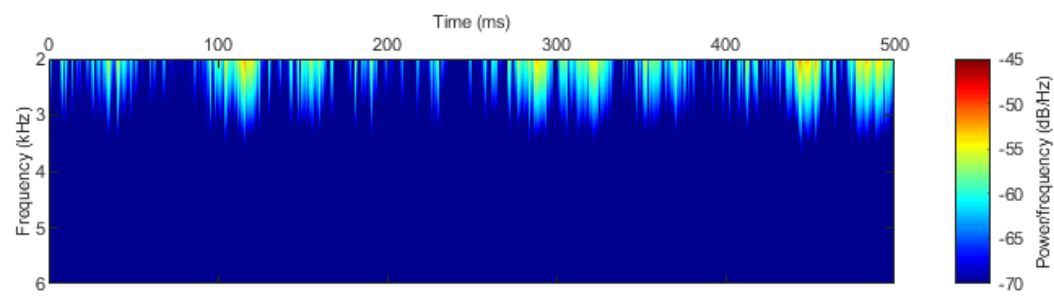


σ	4
α	12°
Cavitation	Par poches

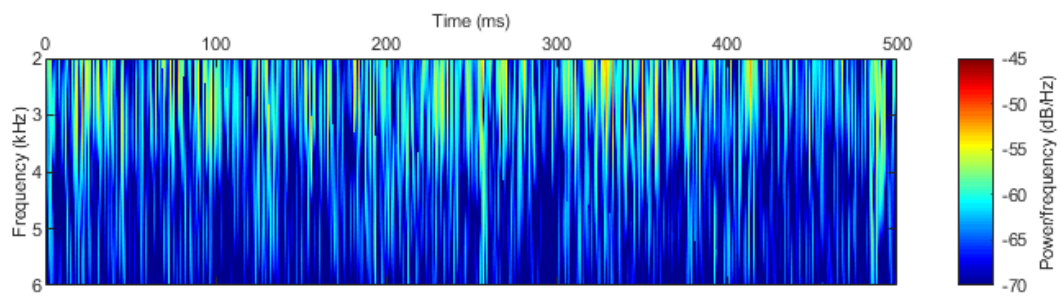
6. *Sigma 4.4 : Microphone*



σ	4.4
α	2°
Cavitation	Non



σ	4.4
α	6°
Cavitation	Non



σ	4.4
α	12°
Cavitation	Par poches