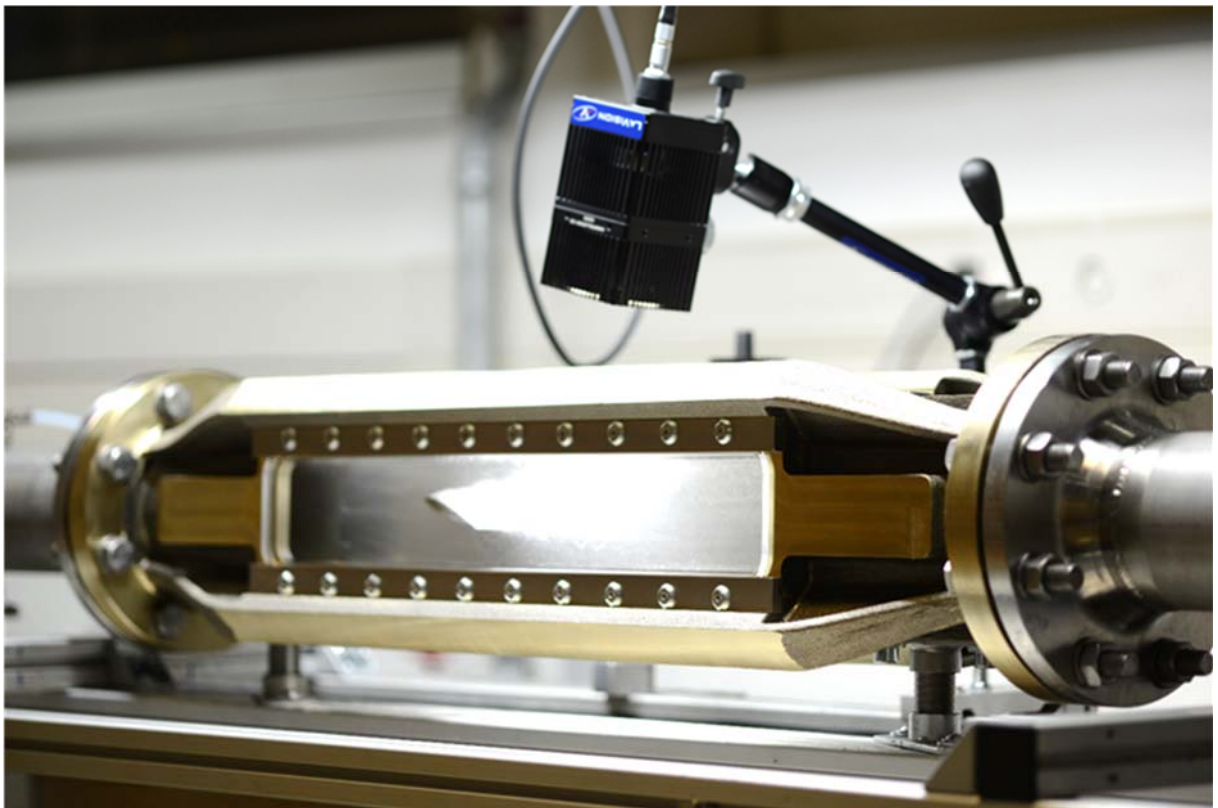




Rapport final du 17 décembre 2019

Détection et surveillance non-intrusive de la cavitation dans les machines hydrauliques



Source: @ HES SO Valais - 2019



Date : 17 décembre 2019

Lieu : Sion

Prestataire de subventions :

Office fédéral de l'énergie OFEN
Section Recherche énergétique et Cleantech
CH-3003 Berne
www.ofen.admin.ch

Bénéficiaires de la subvention :

Groupe Hydroélectricité
HES-SO Valais-Wallis
Route du Rawil 47
CH-1950 Sion 2
www.hevs.ch/hydro

Auteur(s):

Ing. François Pedroni, HES-SO Valais-Wallis, francois.pedroni@hevs.ch
Dr. Vlad Hasmatuchi, HES-SO Valais-Wallis, vlad.hasmatuchi@hevs.ch
Ing. Daniel Biner, HES-SO Valais-Wallis, daniel.biner@hevs.ch
Dr. Jean Decaix, HES-SO Valais-Wallis, jean.decaix@hevs.ch
Pr. Cécile Münch-Alligné, HES-SO Valais-Wallis, cecile.muench@hevs.ch

Suivi du projet à l'OFEN:

Klaus Jorde, klaus.jorde@kjconsult.net
Michael Moser, michael.moser@bfe.admin.ch

Numéro du contrat de l'OFEN: SI/501750-01

Les auteurs sont seuls responsables du contenu et des conclusions du présent rapport.



Zusammenfassung

Nach unserem Kenntnisstand gibt es auf dem heutigen Markt keinen Sensor oder kein System zur direkten Überwachung des Kavitationsphänomens, das in hydraulischen Maschinen auftreten und dadurch deren Lebensdauer verkürzen kann. Ziel dieses Projekts ist die Entwicklung einer Methode zur Nachbearbeitung von Signalen von nicht-intrusiven Sensoren unter kontrollierten Bedingungen auf einem Prüfstand der HES-SO Valais-Wallis, in Hinblick auf eine Echtzeitüberwachung der Kavitation in Wasserkraftwerken. Im Kavitationstunnel wurden mit unterschiedlichen Sensoren verschiedene kavitationsbehaftete Strömungen um ein NACA Tragflügelprofil untersucht. Mehrere Nachbearbeitungsmethoden der Messdaten wurden bewertet. Die Ergebnisse zeigen, dass verschiedene Sensoren fähig sind Kavitation zu detektieren und das verwendete Hydrophon könnte sogar in der Lage sein, den Kavitationstypen zu erkennen.

Résumé

A notre connaissance, aucun capteur ou système dédié de surveillance directe du phénomène de cavitation, se développant dans les machines hydrauliques et affectant leur durée de vie, n'existe sur le marché à ce jour. L'objectif de ce projet est de mettre au point une méthodologie de post-traitement des signaux émis par des capteurs non-intrusifs sur un banc test de la HES SO Valais dans un environnement maîtrisé en vue d'une surveillance en temps réel de la cavitation dans les centrales hydroélectriques. Différents capteurs ont été testés pour différents régimes d'écoulement cavitant se développant autour d'un profil de type NACA dans la veine d'essai. Plusieurs méthodes de post-traitement des signaux mesurés ont été évaluées. Plusieurs capteurs sont capables de détecter la cavitation et l'hydrophone pourrait même permettre à terme d'identifier le type de cavitation.

Summary

To the best of our knowledge, no sensor or system dedicated to direct monitoring of the development of the cavitation phenomenon in hydraulic machines, which reduces machine lifespan, exists on the market today. The objective of this work is the development of a methodology for the post-processing of signals from non-intrusive sensors using a test bench under controlled conditions that will enable real-time monitoring of cavitation in hydropower plants. Several sensors have been tested for different cavitating flow developing around a hydrofoil of NACA type in the cavitation facilities. Several posttreatment methods of the measurements have been assessed. Most of the tested sensors are able to detect cavitation and the hydrophone could even identify the type of cavitation.



Take-home messages

- La surveillance en temps réel de l'état cavitant d'une machine hydraulique reste un besoin pour les opérateurs/propriétaires des centrales dans la même mesure que celle de l'érosion par les sédiments pour mieux planifier les inspections et la maintenance avec un impact économique direct sur l'exploitation.
- La signature de la cavitation a été recherchée dans les signaux des plusieurs types de capteurs principalement non-intrusifs sur un cas simplifié constitué d'un profil NACA 0015 installé dans la veine de cavitation de la HES-SO VS à Sion.
- Plusieurs méthodes de posttraitement disponibles dans l'environnement Matlab ont été testées sur l'ensemble des signaux pour plusieurs états de développement de la cavitation, dont certaines pourraient être par la suite mis à l'épreuve sur les signaux récoltés en centrale.
- Au-delà d'un recensement bibliographique des techniques déjà testés par d'autres chercheurs, l'étude a permis de lister plusieurs techniques à combiner par la suite dans le but d'obtenir un jour une toolbox de surveillance en temps réel.



Table des matières

Zusammenfassung	3
Résumé	3
Summary	3
Take-home messages	4
Table des matières	5
Liste des abréviations	7
1 Introduction	8
1.1 Contexte et arrière-plan.....	8
1.2 Justification du projet.....	8
1.3 Objectifs du projet.....	8
2 Description des installations	10
2.1 Banc de test de la HES SO Valais	10
2.2 Veine de cavitation	11
2.3 Profil NACA 0015	12
3 Procédure et méthode	13
3.1 Architecture de l'instrumentation	13
3.2 Visualisation	13
3.3 Capteurs	14
3.3.1 Accéléromètre tri-axes.....	14
3.3.2 Accéléromètre uni-axe.....	15
3.3.3 Microphone.....	16
3.3.4 Hydrophone	16
3.3.5 Capteurs de pression	17
3.3.6 Jauges de contraintes	18
3.3.7 Géophone.....	18
3.3.8 Système d'acquisition et interface LabView	19
3.4 Outils de posttraitement.....	20
4 Résultats et commentaire	22
4.1 Plan d'expérience	22
4.2 Analyse modale	23
4.2.1 Analyse expérimentale	24
4.2.2 Analyse numérique.....	25
4.2.3 Comparaison des résultats.....	25
4.3 Carte de cavitation.....	30
4.4 Influence de l'incidence	31
4.5 Influence du niveau de pression.....	38



5	Conclusions	49
6	Aperçu et mise en œuvre prochaine	49
7	Coopération nationale et internationale.....	50
8	Publications	50
9	Bibliographie.....	50
10	Annexes.....	51
10.1	Annexe 1 – Setup expérimental des mesures Turbicav.....	51
10.2	Annexe 2 – Résultats pour sigma 2.4, alpha 6°	52
10.3	Annexe 3 – Résultats pour sigma 3.7, alpha 2°	55
10.4	Annexe 4 – Résultats pour sigma 3.7, alpha 6°	58
10.5	Annexe 5 – Résultats pour sigma 3.7, alpha 12°	61
10.6	Annexe 6 – Résultats pour sigma 4.4, alpha 2°	64
10.7	Annexe 7 – Résultats pour sigma 4.4, alpha 6°	67
10.8	Annexe 8 – Résultats pour sigma 4.4, alpha 12°	70
10.9	Annexe 9 – Résultats pour alpha 10°, sigma 2.9.....	73
10.10	Annexe 10 – Résultats pour alpha 10°, sigma 7.2.....	76
10.11	Annexe 11 – Résultats pour alpha 10°, sigma 11.6.....	79
10.12	Annexe 12 – Résultats pour alpha 12°, sigma 2.9.....	82
10.13	Annexe 13 – Résultats pour alpha 12°, sigma 7.2.....	85
10.14	Annexe 14 – Résultats pour alpha 12°, sigma 11.6.....	88



Liste des abréviations

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]
$C_{p_{min}}$: 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)]



1 Introduction

1.1 Contexte et arrière-plan

La cavitation est l'une des causes d'usure prématurée des machines hydrauliques et reste un des problèmes physiques les plus complexes encore mal compris aujourd'hui, voir Dorji & Ghomaschchi, 2014 ou Liu et al., 2016. Idéalement, le design de la machine est réalisé de sorte à éviter le développement de la cavitation dans la zone limite de fonctionnement prévue sur site. Cette zone est délimitée lors des essais à l'échelle modèle en laboratoire ou par simulation numérique avec une précision plus ou moins grande. Une fois installé sur site, le prototype peut tout de même être sujet à la cavitation, l'une des raisons pouvant être que les conditions d'exploitation sont différentes de celles prévues. La détection de la cavitation en laboratoire peut se faire à l'aide de différents types de capteurs (voir Escaler et al., 2006). L'approche classique consiste à réaliser une analyse fréquentielle des signaux de vibrations, acoustiques et de pression dynamique (Valentin et al., 2019).

1.2 Justification du projet

Avec ce projet, l'idée est de définir un set de capteurs détectant de manière non-intrusive la cavitation pour des pompes et des turbines à l'échelle prototype puis de développer une analyse fréquentielle de ces signaux permettant d'identifier le type de cavitation s'y développant. Finalement, cet outil permettra à terme de monitorer en temps réel le nombre d'heures d'opération de la machine avec ce type de cavitation et d'évaluer l'usure de la machine. Cette information pourrait être transmise au système de surveillance et ainsi faciliter les décisions concernant la maintenance et l'exploitation de l'aménagement.

L'ensemble du parc suisse de centrales hydroélectriques pourrait être concerné par ces développements. En effet, les centrales à accumulation comme les centrales au fil de l'eau, grandes et petites, doivent fonctionner de manière flexible afin d'offrir des services systèmes au réseau ou produire au bon moment selon les nouvelles règles de la commercialisation directe. À terme, ce type d'analyse pourrait être intégré aux nouveaux outils de surveillance temps réel qui sont en cours de déploiement dans les centrales (HydroClone-PVE, Diomera-Andritz, etc.)

De plus, ce projet s'inscrit dans le cadre des activités menées par les SCCER Supply of Electricity et Furies dans lequel la HES-SO Valais/Wallis a la charge du développement d'innovations technologiques pour les machines hydrauliques.

1.3 Objectifs du projet

L'objectif principal de ce projet consiste à évaluer la capacité des capteurs à détecter les différents régimes de cavitation dans un environnement maîtrisé tel que la nouvelle veine de cavitation du groupe Hydroélectricité de la HES SO Valais. Cette nouvelle veine est montée sur le banc d'essai existant du laboratoire permettant actuellement de mesurer les performances de pico-turbines. Un hydrofoil est installé dans la veine de cavitation et l'influence de différents paramètres est testée comme l'incidence du profil, la vitesse de l'écoulement ou le niveau de pression dans la veine de cavitation afin d'explorer différents régimes de cavitation. Une analyse basée sur le traitement des signaux acquis par les différents capteurs pour les différentes situations explorées et observées devrait permettre de définir la signature de la cavitation sous ses différentes formes.



Afin d'atteindre ces objectifs, le projet s'est déroulé sur une durée de 14 mois d'octobre 2018 à Décembre 2019. Les activités ont été menées par la HES SO Valais selon trois Work Packages :

WP1 - Mesures sur la veine de cavitation

1. Instrumentation de la veine d'essai
2. Sélection de plusieurs régimes de cavitation
3. Mesures pour les différents régimes sélectionnés

WP2 - Analyse des mesures

1. Traitement des signaux des différents capteurs
2. Identification des signatures de la cavitation par capteur

WP3 - Synthèse

1. Sélection des capteurs les plus efficaces
2. Rapport et présentation des résultats

Le planning final est le suivant :

Projet - Cavitation	2018			2019											
	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
WP1 - Mesures sur la veine de cavitation															
1. Instrumentation de la veine d'essai		■	■	■	■	■									
2. Sélection de plusieurs régimes de cavitation							■	■	■	■					
3. Mesures pour les différents régimes sélectionnés									■	■	■	■	■		
WP2 - Analyse des mesures															
1. Traitement des signaux des différents capteurs									■	■	■				
2. Identification des signatures de la cavitation par capteur											■	■	■	■	
WP3 - Synthèse															
1. Sélection des capteurs les plus efficaces														■	■
2. Rapport et présentation des résultats															■

Figure 1 Planning final du projet.



2 Description des installations

2.1 Banc de test de la HES SO Valais

La veine d'essai utilisée dans le cadre de ce projet a été montée sur le banc de test hydraulique de la HES SO Valais-Wallis dont les caractéristiques sont indiquées ci-dessous :

- Pression maximale du banc : **160 mCE**
- Débit maximal dans la section de test : **120 (136) m³/h**
- Puissance des pompes d'alimentation : **2x 18.5kW & 1x 5.5 kW**
- Vitesse maximale des pompes de recirculation : **3'500 min⁻¹ / 3000 min⁻¹**

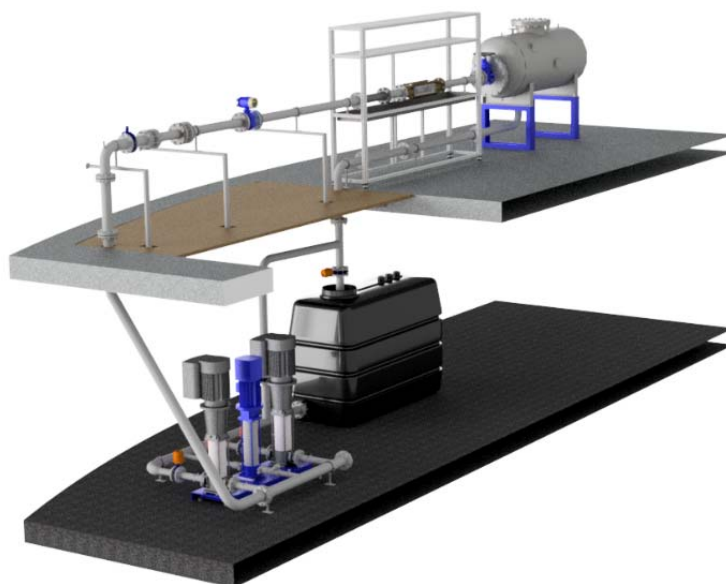


Figure 2 Banc de test hydraulique de la HES SO Valais- Wallis, voir Hasmatuchi et al., 2015.

Ce banc d'essai est composé de deux réservoirs, le réservoir supérieur, qui est pressurisable, permettant de maîtriser le niveau de pression absolue dans la veine d'essai, indispensable pour étudier la cavitation. Les trois pompes de recirculation multi-étage avec vitesse variable couplées en parallèle permettent de varier la vitesse de l'écoulement à l'entrée de la veine d'essai de 0 à 5.9 m.s⁻¹.



2.2 Veine de cavitation

La veine d'essai développée par la HES-SO VS pour étudier spécifiquement la cavitation sur le banc de test, voir Figure 3, a une longueur de 500 mm et une section transversale de 40 mm x 80 mm, voir Figure 4. La vitesse de l'écoulement à l'entrée de la section restreinte de la veine d'essai peut atteindre $11.8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ tandis que la pression relative peut varier entre -1 bar et 5 bar.

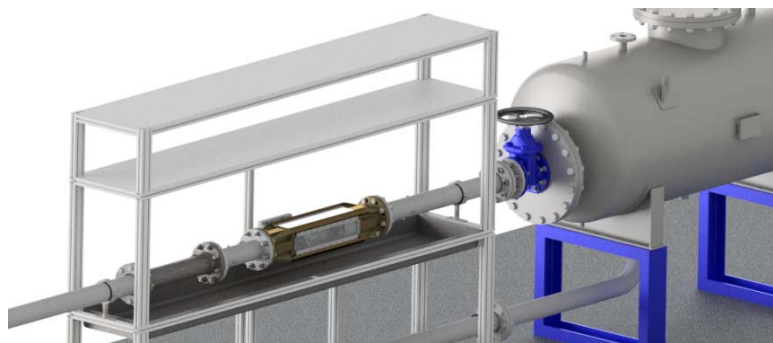


Figure 3 Veine d'essai développée pour le projet Turbicav, montée sur le banc de test de la HES-SO Valais/Wallis.

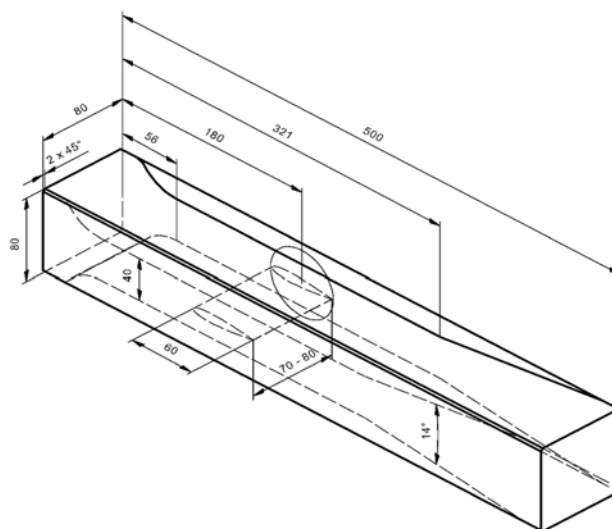


Figure 4 Géométrie et dimensions principales de la veine de cavitation en forme de Venturi.

Les parois de la veine, en Plexiglas, permettent l'investigation du phénomène de cavitation par imagerie.

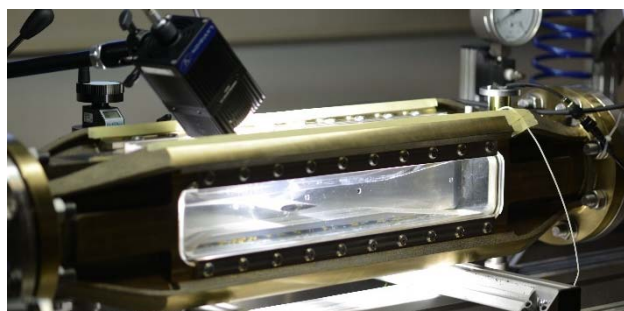


Figure 5 Photo de la veine d'essai.



2.3 Profil NACA 0015

Le profil choisi pour étudier le développement de la cavitation dans un écoulement autour d'un obstacle est de type NACA 0015 avec une longueur de corde de 60 mm, une largeur de profil de 86.5 mm et une épaisseur maximale de 9 mm.

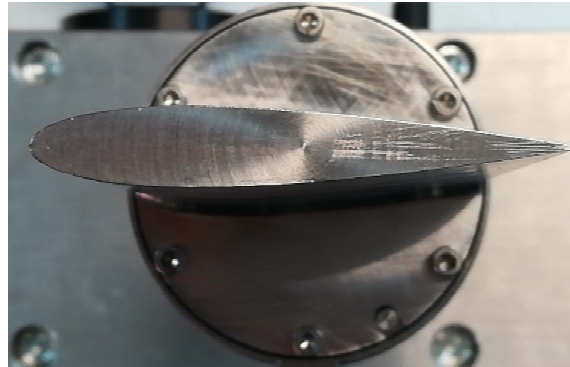


Figure 6 Photo du profil NACA 0015 installé dans la veine d'essai pour le projet TurbiCav.

La vitesse de l'écoulement, le niveau de pression dans la veine, l'incidence du profil ainsi que la distance par rapport à la paroi frontale sont des paramètres qui peuvent être variés afin d'explorer différents régimes cavitants.

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 la variation du coefficient de pression le long de la corde et en particulier sa valeur minimale. C'est à cet endroit que naîtra la cavitation si la pression atteint la pression de vaporisation. On définit le coefficient de pression minimum de la manière suivante :

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

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

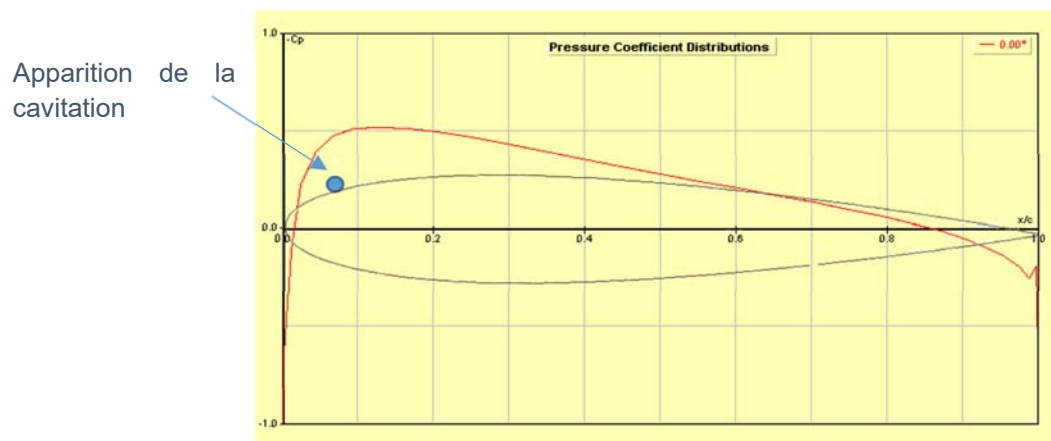


Figure 7 Courbe du coefficient de pression minimum pour un profil NACA0015 avec un angle d'incidence de 0° (Source : Javafoil)



3 Procédure et méthode

3.1 Architecture de l'instrumentation

L'instrumentation développée dans le cadre de ce projet pour observer et détecter la cavitation est composée d'une caméra rapide et de plusieurs capteurs : accéléromètres, microphone, hydrophone, jauges de contraintes, capteur de pression et géophone, représentés sur la figure ci-dessous.

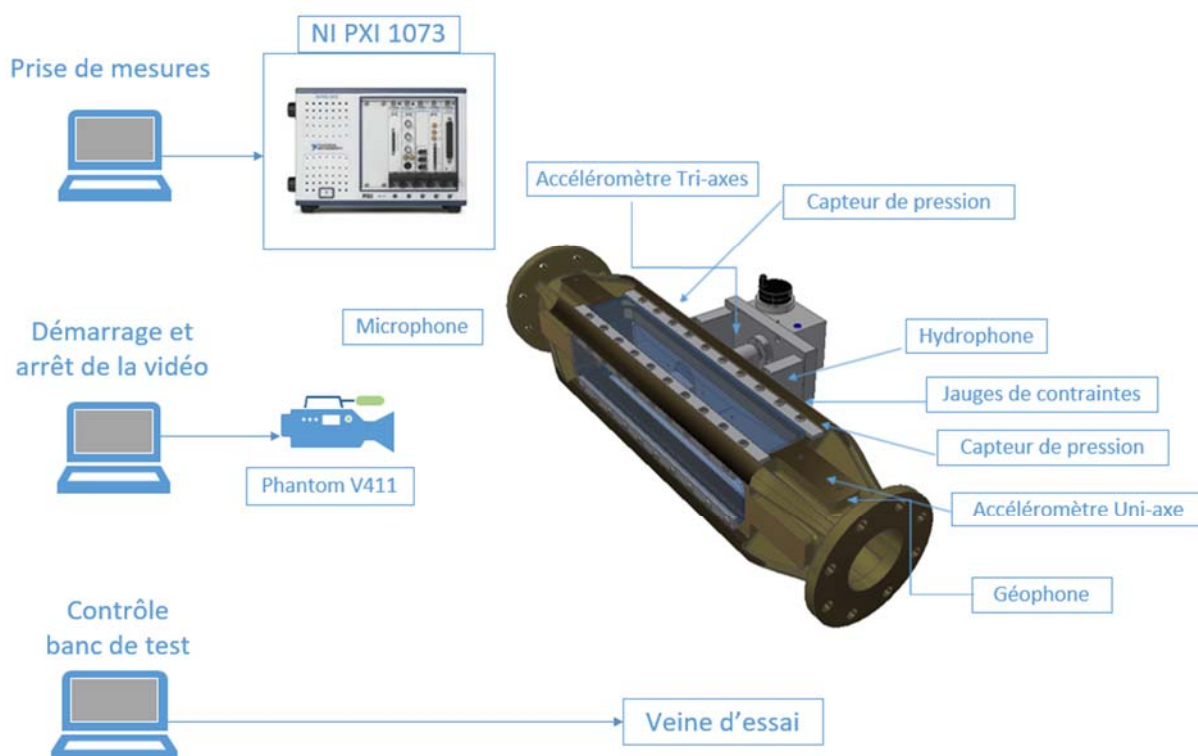


Figure 8 Architecture de l'instrumentation employée pour les mesures de cavitation.

3.2 Visualisation

Une caméra rapide de type Phantom V411 permettant la visualisation de phénomènes en slow motion a été utilisée pour les prises de vidéo. Voici les principales spécifications techniques :

Tableau 1 Spécifications techniques de la caméra Phantom V411.

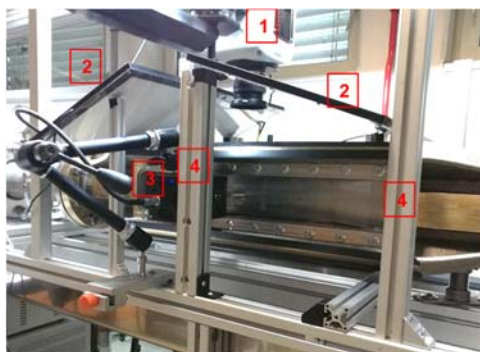
Spécification	Valeurs
Résolution CCD	1'280 x 800 pixels
Nombre d'images par seconde	4'200 pour une résolution de 1280 x 800 pixels 600'000 pour une résolution de 128 x 8 pixels
Profondeur de champs	12 bits monochrome



Deux panneaux LED ainsi qu'une lampe LED Constellation 120 ont été utilisés. Pour les visualisations depuis le haut, les deux panneaux ont été posés sur le dessus de la veine de manière à ne pas avoir de reflet, tandis que la lampe Constellation a été disposée sur le côté.

Tableau 2 Caractéristiques techniques des éléments d'éclairage

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



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

Figure 9 Dispositif d'éclairage pour la visualisation.

L'enregistrement vidéo est réalisé depuis un ordinateur de contrôle de la caméra. C'est avec le logiciel Phantom Camera Control que les ajustements de prise de vue tel que le temps d'exposition, la taille de l'image ou la fréquence des images sont réglés.

3.3 Capteurs

Pour les mesures non-intrusives de la cavitation, un large choix de capteurs a été fait. Comme leurs caractéristiques et leurs positions sur la veine d'essai sont différentes, il est important de détailler chaque capteur. Le setup expérimental complet pour cette campagne de mesures se trouve dans les annexes.

3.3.1 Accéléromètre tri-axes

L'accéléromètre permet de mesurer les vibrations d'une structure. L'accéléromètre Kistler employé est composé de 3 axes. Ses caractéristiques principales sont les suivantes :

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

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

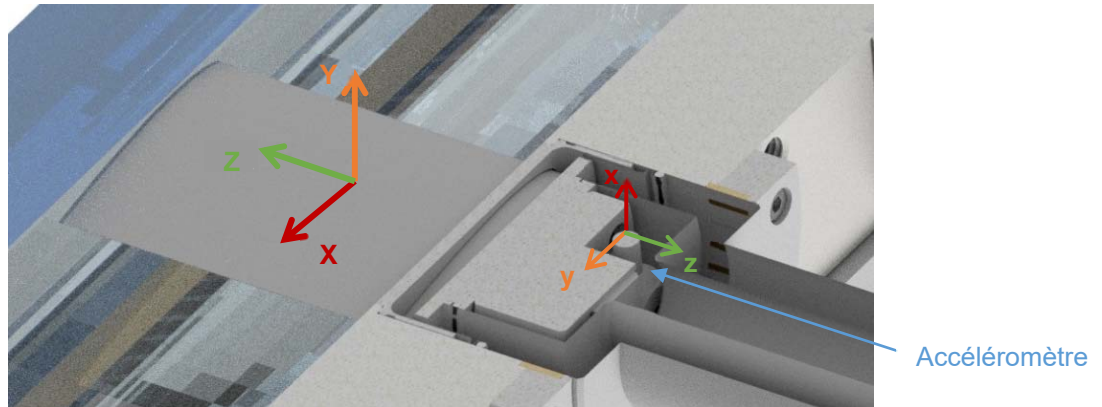


Figure 10 Emplacement de l'accéléromètre sur la base du profil NACA avec le système de coordonnées propre au profil et au capteur.

3.3.2 Accéléromètre uni-axe

Ce deuxième accéléromètre est placé à un endroit différent sur la veine d'essai. Le but est de pouvoir comparer les deux accéléromètres en termes de fréquences et des amplitudes de vibration mesurées. En effet, s'il arrive à capter les mêmes fréquences que celui fixé sur la base du profil, cela pourrait éliminer le fait qu'il s'agit d'une fréquence propre du profil.

Celui-ci est aussi de type Kistler mais il ne comporte qu'un seul axe. Ses caractéristiques sont :

- Dénomination : Kistler 8702B100
- Technologie : K-Shear®
- Plage de mesure : $\pm 100g$
- Signal de sortie : $\pm 5VDC$ IEPE

Il est collé sur la face supérieure de la veine, de sorte à mesurer les accélérations sur l'axe Y du profil NACA.

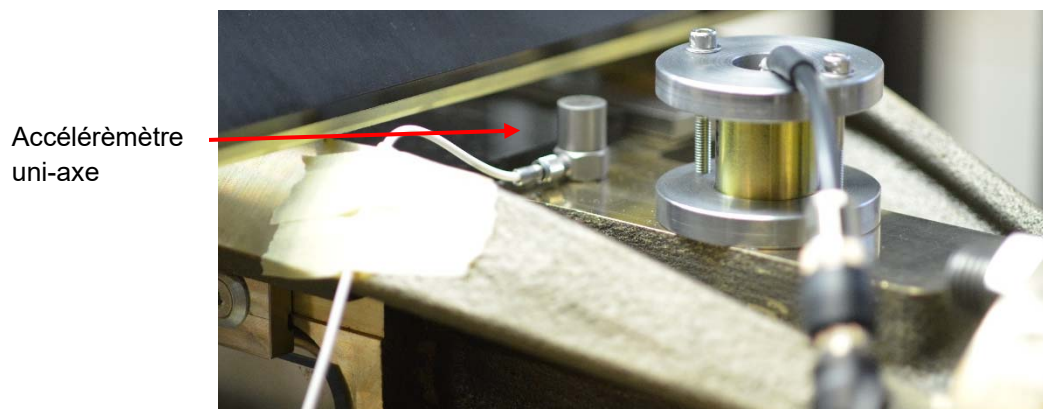


Figure 11 Emplacement de l'accéléromètre uni-axe.



3.3.3 Microphone

Le microphone va permettre de mesurer le bruit produit par la cavitation et transmis à travers l'air ambiant. Son utilisation a pour but de déterminer sa capacité à distinguer le bruit de la cavitation par rapport aux bruits de l'environnement qui l'entoure.

Les caractéristiques du microphone G.R.A.S 46 AE employé sont les suivantes :

- Plage de mesure : 15...120 dB
- Plage de fréquence : 3.5...20kHz
- Signal de sortie : ± 8 VDC IEPE

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 de son positionnement.

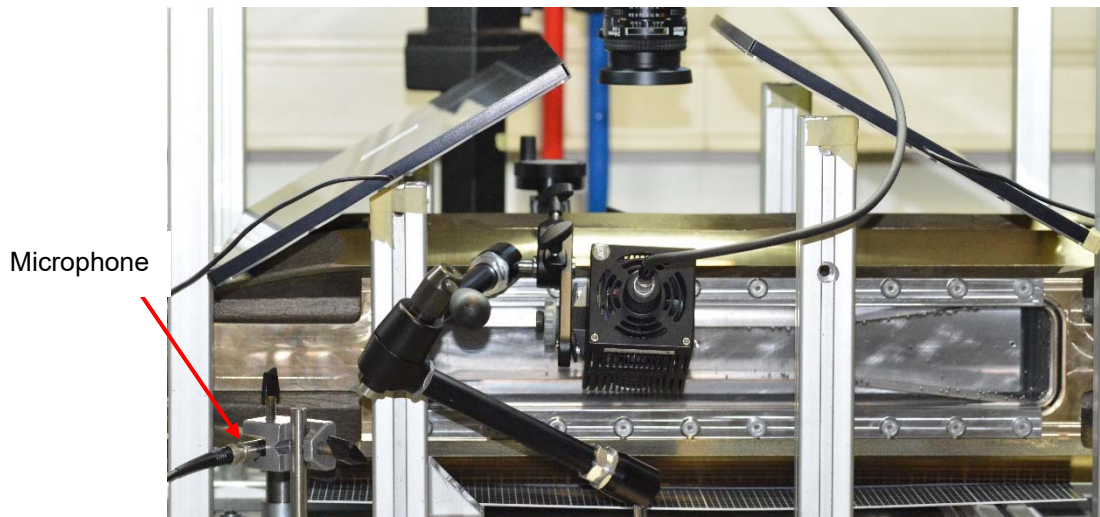


Figure 12 Emplacement du microphone.

3.3.4 Hydrophone

L'hydrophone est un capteur de pression dynamique. Il est semi-intrusif, en effet un trou dans la structure doit être réalisé afin de le positionner en contact avec l'eau dans le circuit. Il a le même rôle que le microphone mais dans l'eau. Il va mesurer les fluctuations de pression dues aux implosions des poches de vapeur. Il est placé en aval du profil NACA. Ses caractéristiques sont les suivantes :

- Dénomination : Kistler 601CBA00014.0
- Plage de mesure : 0...14 bar
- Signal de sortie : ± 5 VDC IEPE



Hydrophone

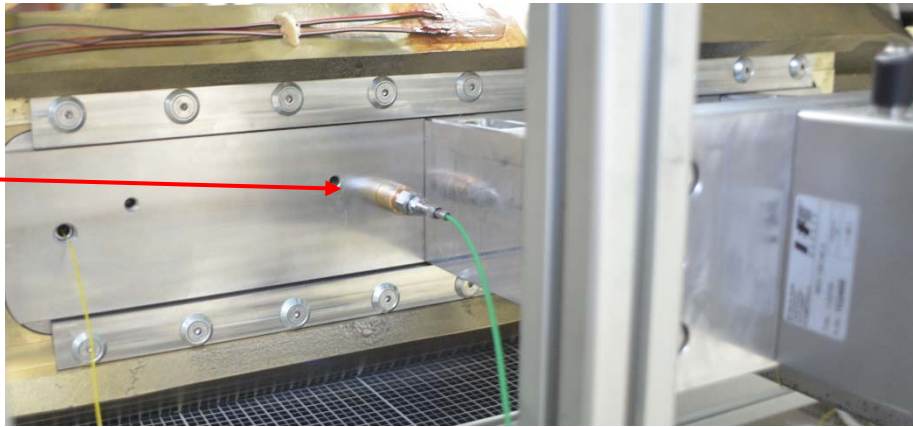


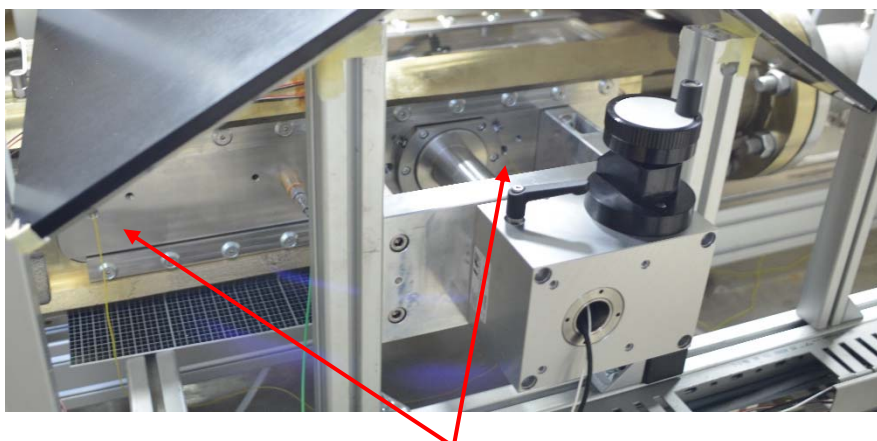
Figure 13 Emplacement de l'hydrophone.

3.3.5 Capteurs de pression

Deux capteurs de pression statique à haute fréquence de réponse sont utilisés. Le premier est placé en amont du profil tandis que l'autre est placé un peu plus loin dans l'écoulement en aval. Comme pour l'hydrophone, il s'agit d'un capteur semi-intrusif, car c'est à l'aide de 2 trous faits dans la structure que nous pouvons venir les placer idéalement au contact de l'écoulement. Ceux-ci vont permettre de voir les variations de pression statique aux alentours du profil NACA.

Les caractéristiques des capteurs employés sont :

- Dénomination : HF900-00186.500 Unisensor
- Plage de mesure : 0...7 bar
- Signal de sortie : ± 5 VDC



Capteurs de pression

Figure 14 Emplacement des capteurs de pression en amont et en aval du profil.



3.3.6 Jauges de contraintes

Afin d'essayer de voir si la cavitation déformait la structure de manière significative, des jauges de contraintes ont été placées sur le corps en cupro-aluminium de la veine d'essai. Elles sont positionnées au milieu de celle-ci. Le but de ces jauges est de mesurer le « bruit » induit par les implosions de la cavitation. On ne cherche pas à savoir la déformation réelle de la structure, seulement à détecter un signal provoqué par la cavitation.

Les 2 jauges employées ont les caractéristiques suivantes :

- Dénomination jauge aluminium : 1-LY13-6/120 HBM
- Dénomination jauge acier : 6/120ALY11 HBM
- Facteur de jauge aluminium : $2.11 \pm 1\%$
- Facteur de jauge acier : $2.03 \pm 1\%$
- Résistance : $120 \Omega \pm 0.35\%$
- Tension d'excitation : $\pm 5\text{VDC}$
- Montage en quart de pont

Jauges de contraintes

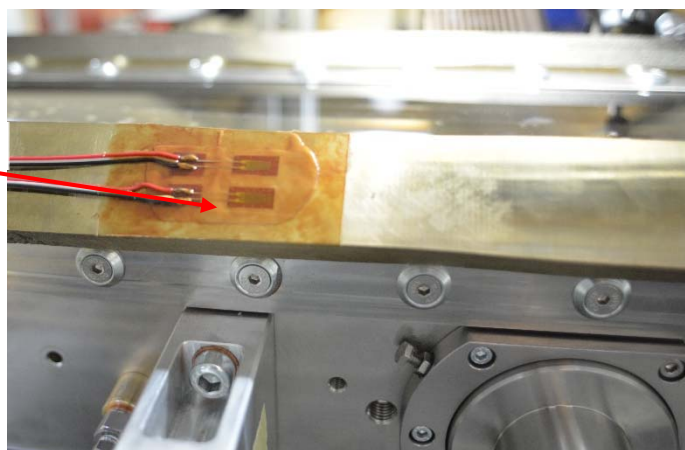


Figure 15 Emplacement des 2 jauges de contraintes.

3.3.7 Géophone

Le géophone est un capteur généralement utilisé pour la mesure de vibrations à basses fréquences. Les vibrations vont permettre de créer une tension et c'est la valeur de cette tension qui déterminera l'intensité des vibrations. Avec les accéléromètres, on mesure des vibrations généralement de haute fréquence et pas plus basses que 20 Hz. La plage calibrée du géophone se borne à quelques dizaines de Herz.

Il a les caractéristiques suivantes :

- Dénomination : Géophone SM24/U-B 10Hz 375 Ohm
- Sensibilité : 28.8 V/m/s
- Plage de mesure : $< 240 \text{ Hz}$

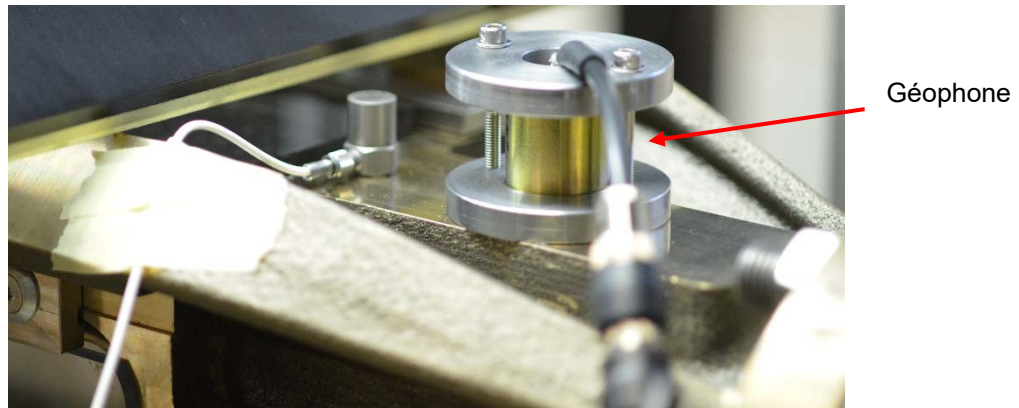


Figure 16 Emplacement du géophone sur le dessus de la veine d'essai.

3.3.8 Système d'acquisition et interface LabView

Le système d'acquisition est composé d'un châssis National Instruments dont la dénomination est NI PXIe-1073. Sur ce châssis sont montés 2 modules d'acquisition :

- NI PXIe-4497 à 16 entrées analogiques 24 bits et conditionnement à courant constant IEPE
- NI PXIe-4339, module d'entrée de mesure de déformation, 24 bits, 8 voies

Sur le module NI PXIe-4497 sont connectés les deux accéléromètres, le microphone et l'hydrophone.

Sur le module NI PXIe-4339 est connecté un bloc de terminaison à montage frontal TB-4339. Sur celui-ci viennent se brancher les deux capteurs de pression, les deux jauges de contraintes et le géophone.

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 tous les capteurs utilisés. De plus, le logiciel donne le signal FFT en temps réel de tous les capteurs cités précédemment.

La fréquence d'acquisition est différente pour chaque module PXI. Le PXIe-4339 n'accepte qu'une fréquence inférieure à 25.6 kHz, alors que le PXIe-4497 peut monter à 204.8 kHz

De ce fait, la fréquence d'acquisition sélectionnée pour le module PXIe-4497 est de 40 kHz. Elle a été choisie comme telle car la cavitation est un phénomène que l'oreille humaine peut entendre, c'est-à-dire sur une plage de 20 Hz à 20'000 Hz. Il découle du théorème de Shannon qui dit que la fréquence d'échantillonnage doit être égale ou supérieure à deux fois la fréquence du signal¹:

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

¹ Francis Cottet, *Traitement du signal Aide-mémoire*, Chap. 6 Numérisation des signaux, 2000

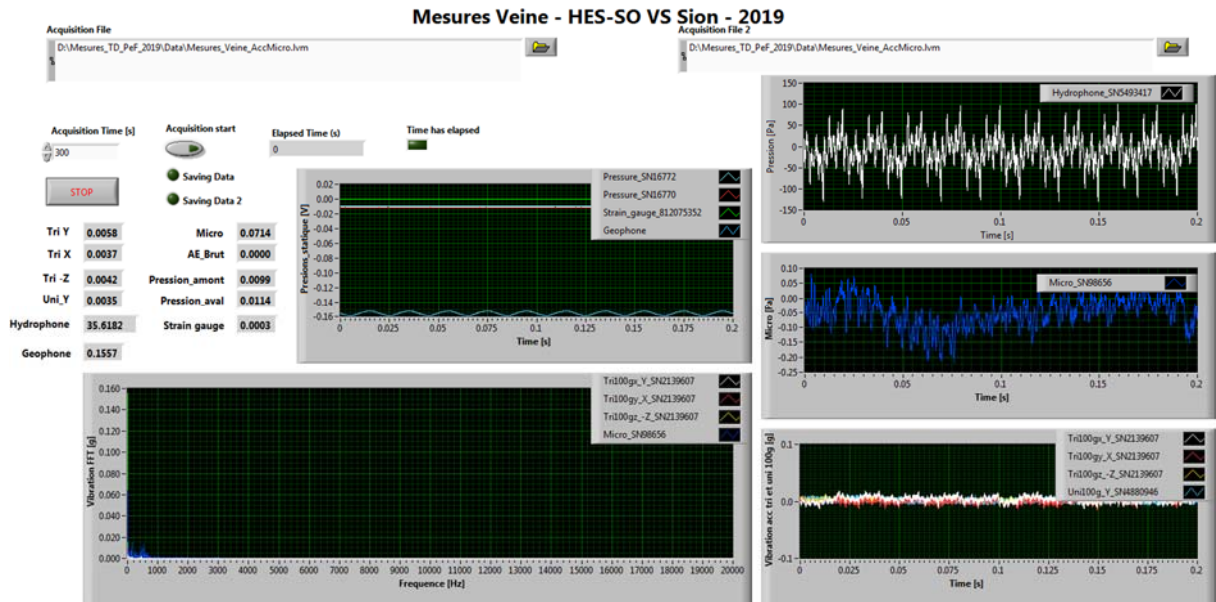


Figure 17 Interface LabView construite pour la prise de mesures.

Pour le deuxième module, une fréquence d'acquisition de 25 kHz a été choisie. Afin de pouvoir faire l'acquisition aux deux fréquences voulues, l'écriture a été faite sur 2 fichiers différents.

3.4 Outils de posttraitement

Pour étudier les signaux, les deux outils suivants ont été principalement utilisés :

- 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).² 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.* »³ 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.⁴

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 $X(f)$.

² Michel Prenat, *Séries temporelles*, Chap. 4 Covariance et densité spectrale, 2012

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

⁴ Ibidem



Le périodogramme est une estimation non paramétrique de la densité spectrale. 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.

Le spectrogramme va permettre de représenter l'intensité des fréquences d'oscillation 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. L'avantage de cette approche réside dans le fait qu'il permet de visualiser l'évolution de la réponse fréquentielle dans le temps, qui est plus pertinent pour un phénomène peu stationnaire (comme la cavitation). De plus, il rend le résultat des mesures sous forme d'image, interprétable par la suite éventuellement avec des techniques d'analyse par intelligence artificielle et non pas par des approches classiques.



4 Résultats et commentaire

4.1 Plan d'expérience

Pour assurer la meilleure répétabilité possible des 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 reproduits.

Pour chaque mesure, la caméra haute vitesse est utilisée afin d'avoir un visuel de tous les points de fonctionnement choisis. Le temps d'acquisition est de 60 secondes, de cette manière il est possible d'observer la régularité du phénomène.

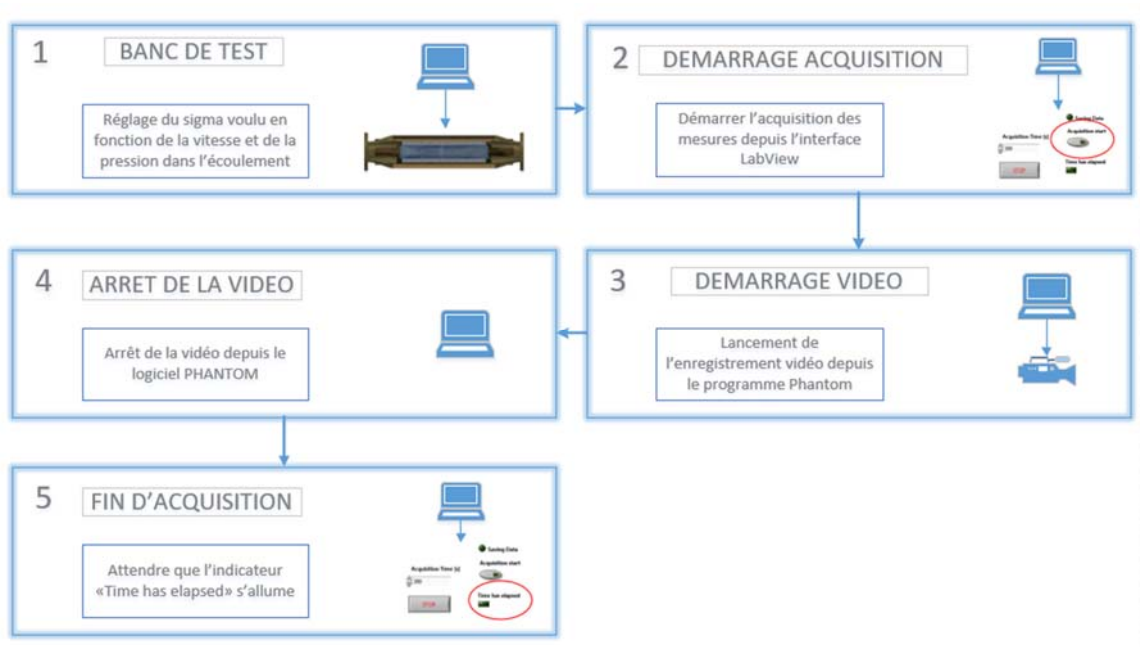


Figure 18 Plan d'expérience pour chaque mesure réalisée.

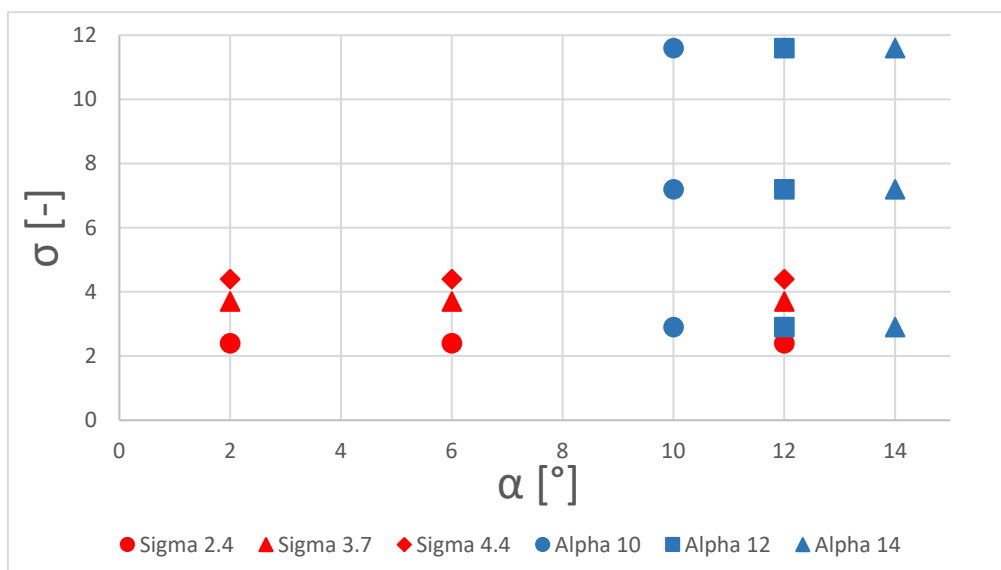


Figure 19 Caractéristiques des points de mesure.

Afin d'identifier l'influence de l'angle d'incidence du profil et l'influence du paramètre de cavitation σ , plusieurs points de mesure ont été définis, voir Figure 19.

Les points permettant de voir l'influence de l'angle d'incidence sont en rouge tandis que ceux qui mettront en évidence l'influence du paramètre de cavitation sont en bleu.

En plus de ces points de mesures, une mesure dynamique a été réalisée pour un angle de 10°. L'acquisition a été réalisée pendant 2 minutes, durant lesquelles le paramètre de cavitation a été modifié en variant la pression dans le circuit, de manière à provoquer ou non de la cavitation.

4.2 Analyse modale

Afin de correctement détecter les fréquences de la cavitation, il est nécessaire de pouvoir écarter toutes les fréquences induites par d'autres phénomènes physiques. Comme n'importe quelle structure, le banc de test de la HES-SO Valais/Wallis a des fréquences propres. Les fréquences 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 a été réalisée avant de mettre en place toute l'instrumentation ainsi qu'une analyse numérique sur ANSYS Workbench.



4.2.1 Analyse expérimentale

Afin de déterminer les fréquences propres de la structure, il faut la faire entrer en vibration. 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 identifier les fréquences propres.

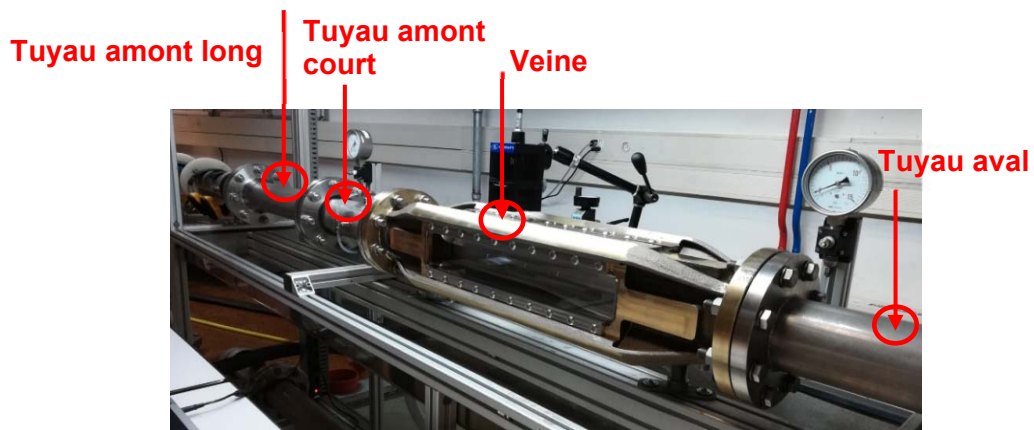


Figure 21 Emplacement et direction (flèche) des coups de marteau sur le banc de test.



Figure 20 Emplacement des coups de marteau sur l'axe du profil NACA.

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



Les mesures sont répétées 3 fois pour chaque point afin de confirmer les fréquences trouvées. 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.

4.2.2 Analyse numérique

L'analyse numérique simplifiée 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. L'analyse numérique a été effectuée avec un maillage grossier afin de réaliser des calculs qualitatifs rapidement et 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 ». Le maillage est constitué d'éléments tétraédriques.

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 identifiées de manière expérimentale.

4.2.3 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 et les modes excités.

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. 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.

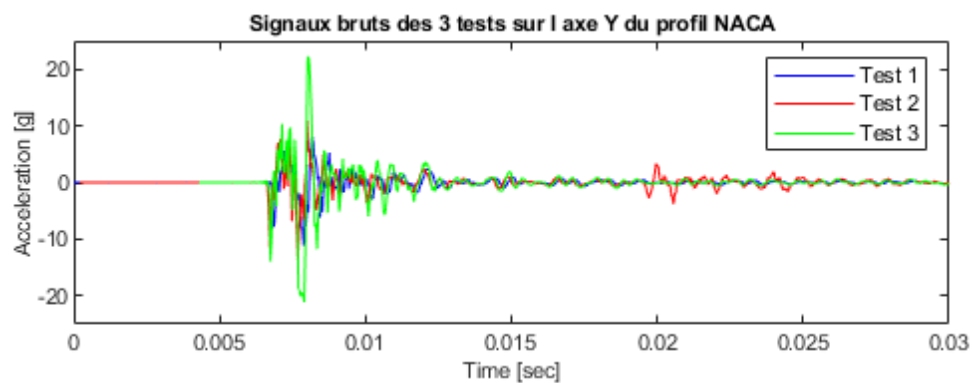


Figure 22 Réponse de l'accéléromètre pour les 3 coups de marteaux donnés sur l'axe du profil NACA dans l'air.

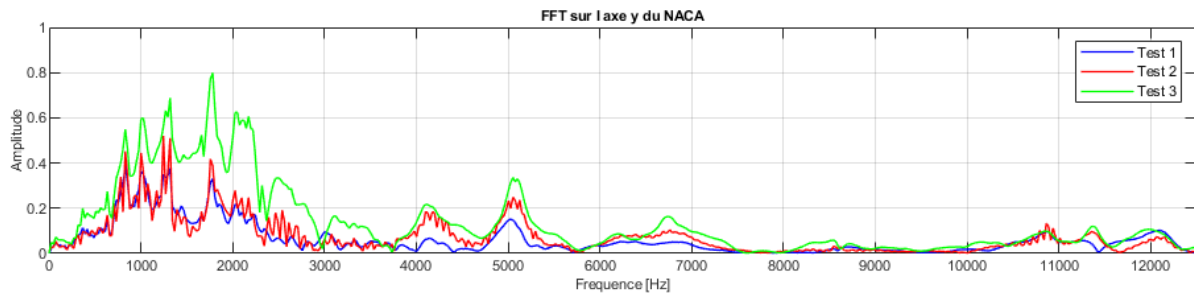


Figure 23 FFT du coup de marteau donné sur l'axe du profil NACA dans l'air dans la direction Y du référentiel du profil.



Le tableau suivant récapitule les fréquences trouvées sur chacun des tests. En couleur, celles qui se retrouvent sur 4 des 5 points de mesure.

Tableau 3 Récapitulatif des fréquences propres trouvées pour l'analyse expérimentale dans l'air.

	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			

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, il s'agit d'une approche simplifiée avec un maillage grossier. Le but était d'avoir une comparaison entre les mesures et l'analyse numérique. 30 modes de fréquence allant de 200 Hz à 2300 Hz ont été identifiés dans les calculs numériques.

L'analyse numérique permet de retrouver les mêmes fréquences que celles trouvées par l'analyse expérimentale, mais pas seulement. En effet, d'autres fréquences apparaissent. Cela est dû au fait que la simulation permet de connaître séparément les fréquences propres de chaque élément qui compose l'ensemble veine, support et profil NACA. Dans la réalité, les fréquences propres de l'ensemble de la structure ne reprennent pas toujours celles de chaque élément séparément. 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 propres qui sont les suivants :

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

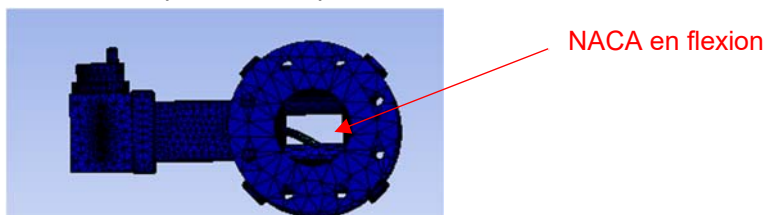


Figure 24: Mode 6 à 754.9 Hz avec le profil NACA en flexion.



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

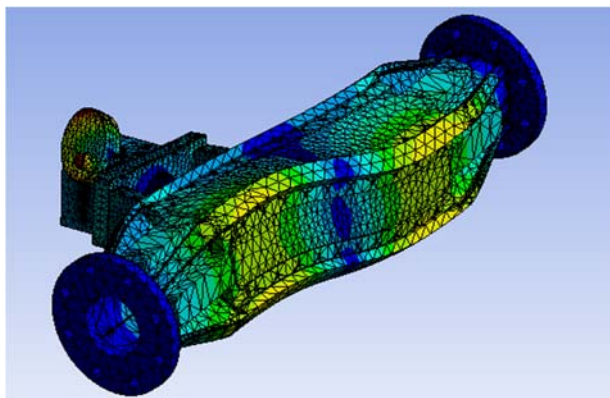


Figure 25: Mode 12 à 981.16 Hz.

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

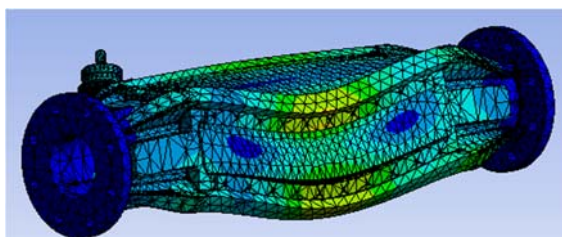


Figure 26: Mode 15 à 1310.8 Hz.

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

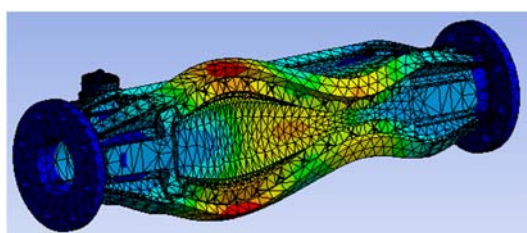


Figure 27: Mode 28 à 2222 Hz.

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

Pour l'analyse expérimentale dans l'eau, seuls les résultats expérimentaux ont été analysés.

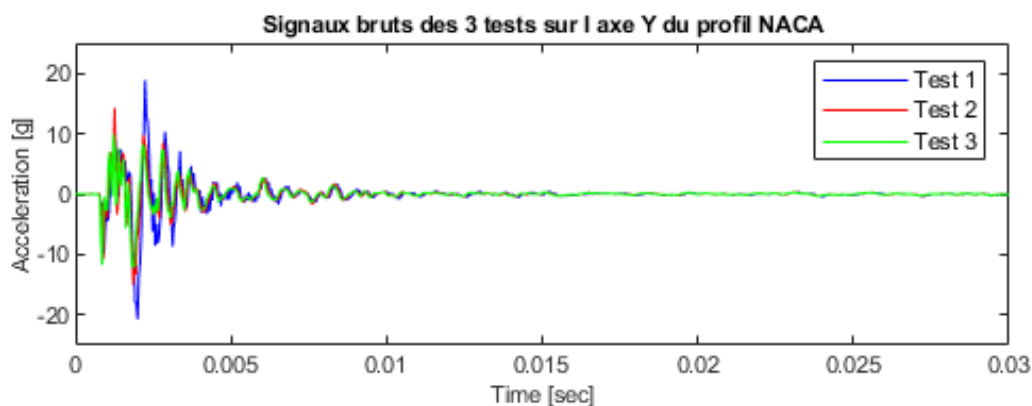


Figure 28: Réponse de l'accéléromètre pour les 3 coups de marteau donné sur l'axe du profil NACA dans l'eau.

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

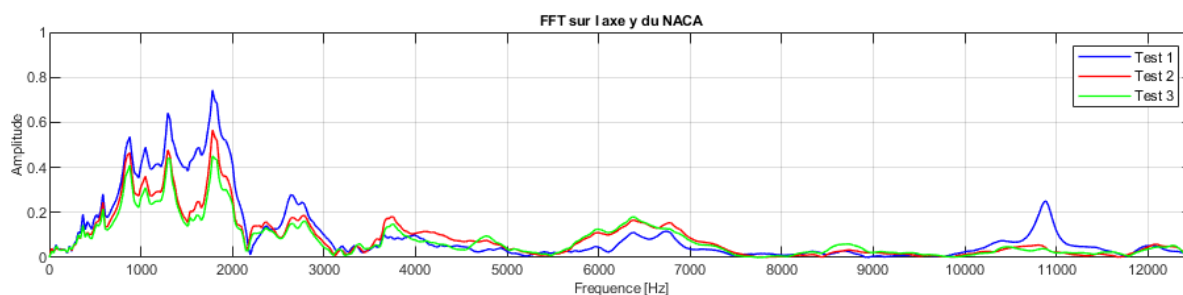


Figure 29: FFT du coup de marteau donné sur l'axe du profil NACA dans l'eau dans la direction Y du référentiel du profil.

Les 3 mesures se superposent parfaitement, excepté lors le premier test où un pic apparait autour des 11 kHz. De même que pour l'analyse modale dans l'air, tous les résultats pour chaque point de mesure se trouve en annexe de ce rapport.

Le tableau suivant récapitule les fréquences trouvées pour chaque test et chaque point de mesure dans l'eau.

Tableau 4 Récapitulatif des résultats trouvés pour l'analyse expérimentale dans l'eau.

	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		525
		850	750	850	
		1000		950	970
		1300	1300		
				1650	
		1800	1800	1800	1900
		2200		2000	
		3700	3000		



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 mesurée 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.

4.3 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. 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 a été caractérisée par rapport aux différentes formes de cavitation que l'on peut trouver. Le but est de savoir quelle forme de cavitation est observé (poches, bulles séparées etc..) selon la valeur du paramètre de cavitation donné et de l'angle d'incidence.

Une carte de cavitation a été réalisée à partir de ces observations pour délimiter les zones des différents régimes de cavitation pouvant être observés dans le cas du profil NACA0015 en fonction de ces paramètres.

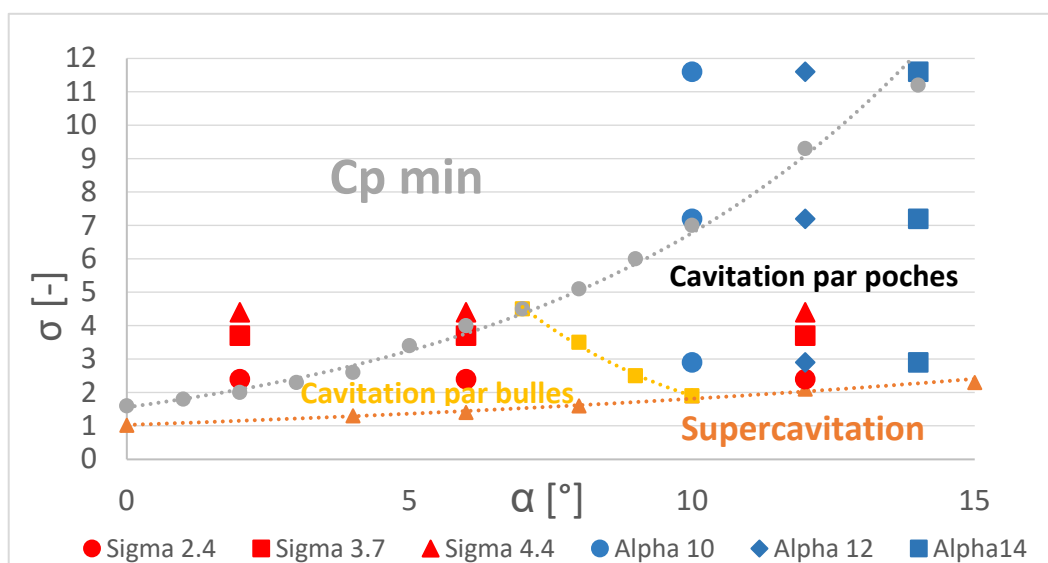


Figure 30 Carte de cavitation du profil NACA0015 avec les points de mesures effectués.

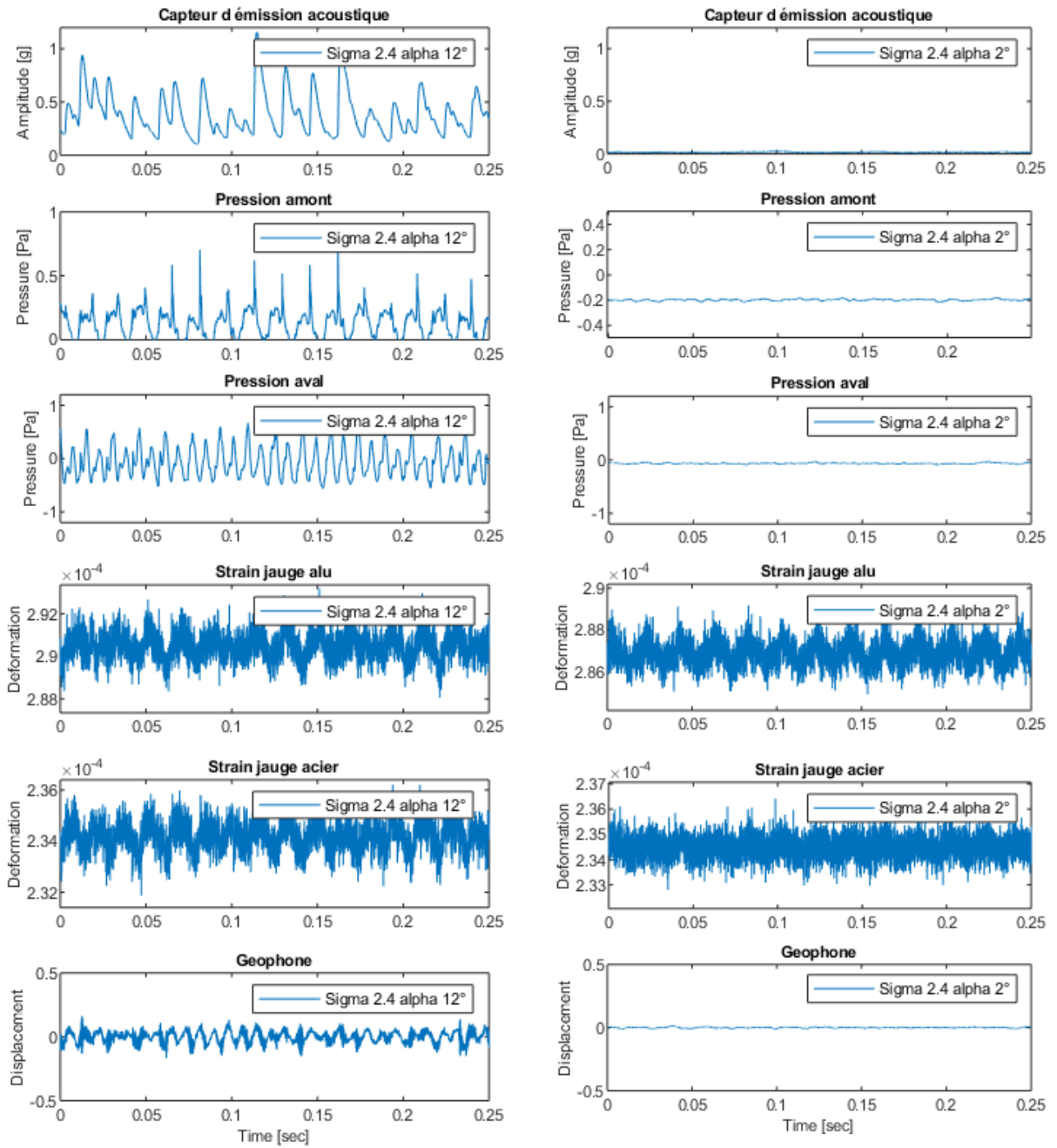


Figure 32 Signaux bruts pour les cas avec et sans cavitation.

Les figures 31 et 32 montrent bien les différences entre un écoulement cavitant ou non. Tous les capteurs, sauf peut-être les jauges de contraintes montrent une grande évolution d'amplitude du signal. Pour le cas présenté, c'est-à-dire un sigma de 2.4 et une incidence de 12° , la cavitation est pulsée. Les poches de cavitation se développent et ensuite disparaissent de manière périodique. Chaque capteur, si ce n'est le microphone et les jauges de contraintes sont capables de montrer directement cette périodicité dans leur signal brut. Cela montre qu'ils sont capables de mesurer la cavitation. Cependant, il faut voir s'ils permettent d'en sortir une fréquence propre à la cavitation.

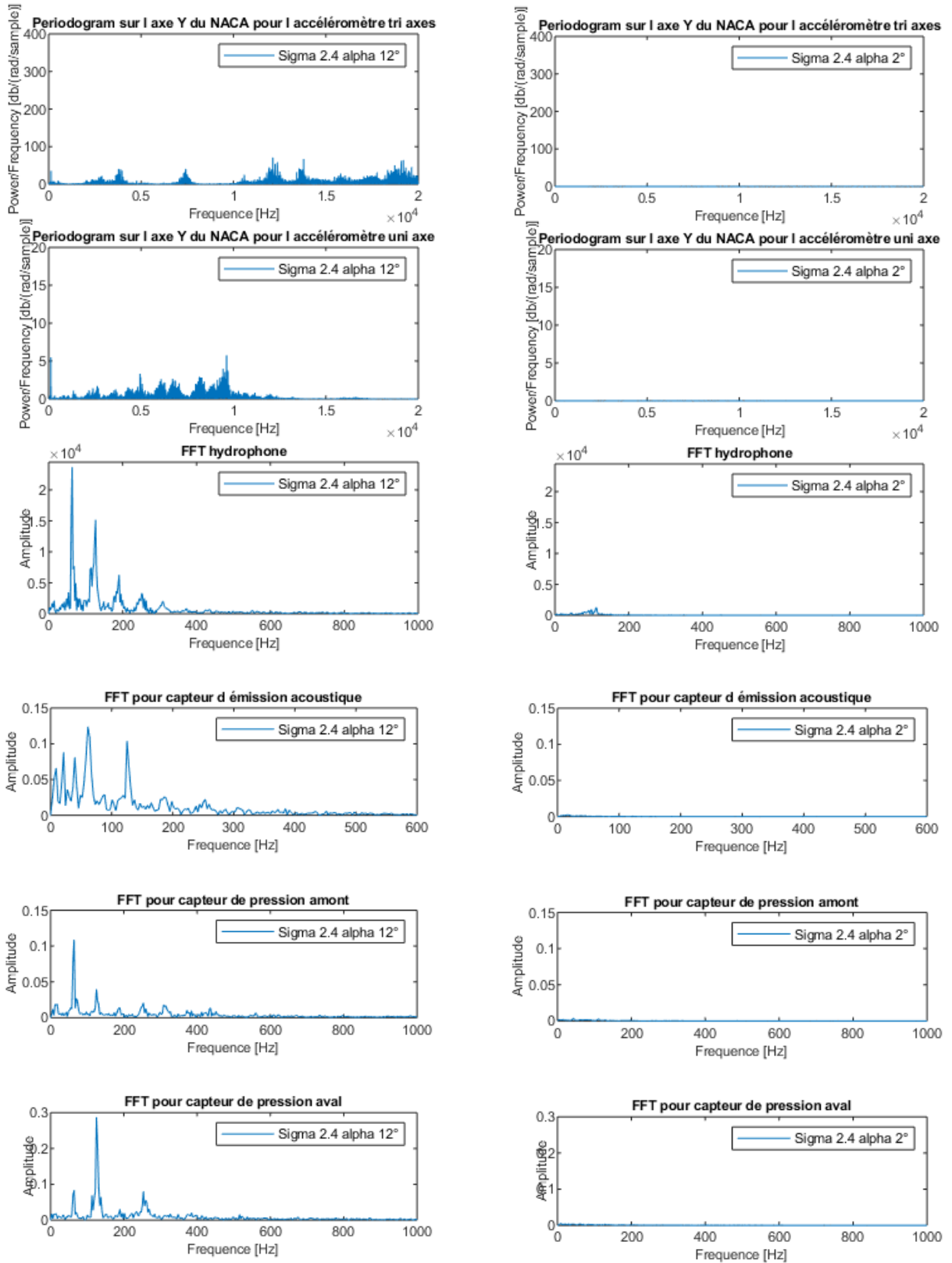


Figure 33 Périodogrammes et FFT pour un sigma de 2.4 et une incidence de 12° et 2° .

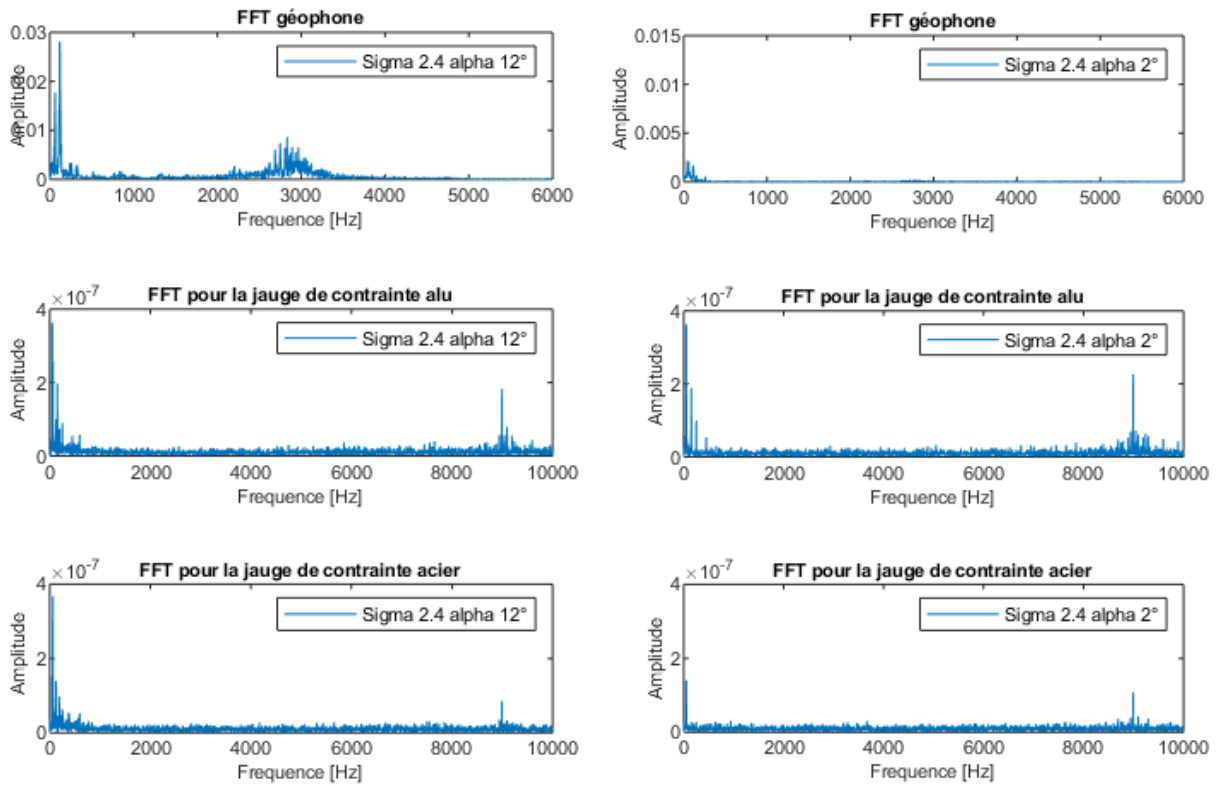


Figure 34 FFT pour un sigma de 2.4 et une incidence de 12°.

Cette étude préliminaire montre par la forme des signaux bruts que des basses fréquences devraient ressortir des FFT. Ces basses fréquences sont clairement mises en évidence en observant la FFT des capteurs de pressions, de l'hydrophone et du géophone. Ces 4 capteurs montrent des fréquences de réponse d'environ 60 Hz et 120 Hz. La fréquence de 120 Hz pourrait être une harmonique de celle de 60 Hz.

Pour ce qui est des accéléromètres et même du géophone, des hautes fréquences apparaissent dans les périodogrammes. Il est intéressant de voir que les deux accéléromètres ne donnent pas les mêmes fréquences. En effet celui placé sur le corps de la veine a des gros pics de fréquences jusqu'à environ 10 kHz tandis que le tri-axes placé à la base du profil obtient des fréquences significatives jusqu'à 20 kHz. Cependant, comme les capteurs cités précédemment, ces deux accéléromètres mesurent une basse fréquence de 120 Hz (Figure 35). Cette fréquence semble cohérente par rapport au fait que les poches de vapeur sont pulsantes et qu'elles pulsent plus de 100 fois à la seconde.

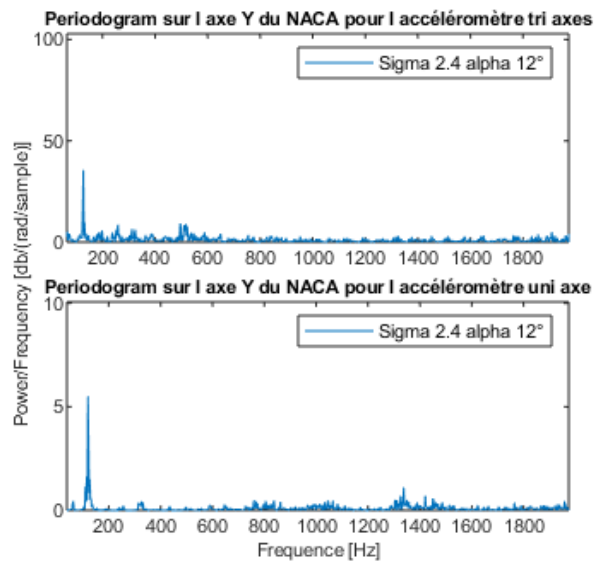


Figure 35 Periodogrammes des deux accéléromètres pour un sigma de 2.4 et une incidence de 12°.

Le géophone a une FFT très propre et il obtient des basses fréquences vers 60 et 120 Hz, mais aussi dans les plus hautes fréquences, autour des 2800 Hz. Entre ces deux zones rien d'évident n'apparaît.

Si l'on compare ces résultats mesurés lorsqu'il y a ou non de la cavitation, la différence est très nette. A même échelle d'amplitude, lorsque l'écoulement ne cavite pas, les capteurs ne mesurent aucune fréquence significative. Cela montre de manière évidente, la capacité des capteurs à détecter les différences entre un écoulement cavitant ou non. Cependant pour voir si les fréquences trouvées sont bien liées à la cavitation, il faut regarder si elles apparaissent de manière pulsée comme les poches de vapeurs.

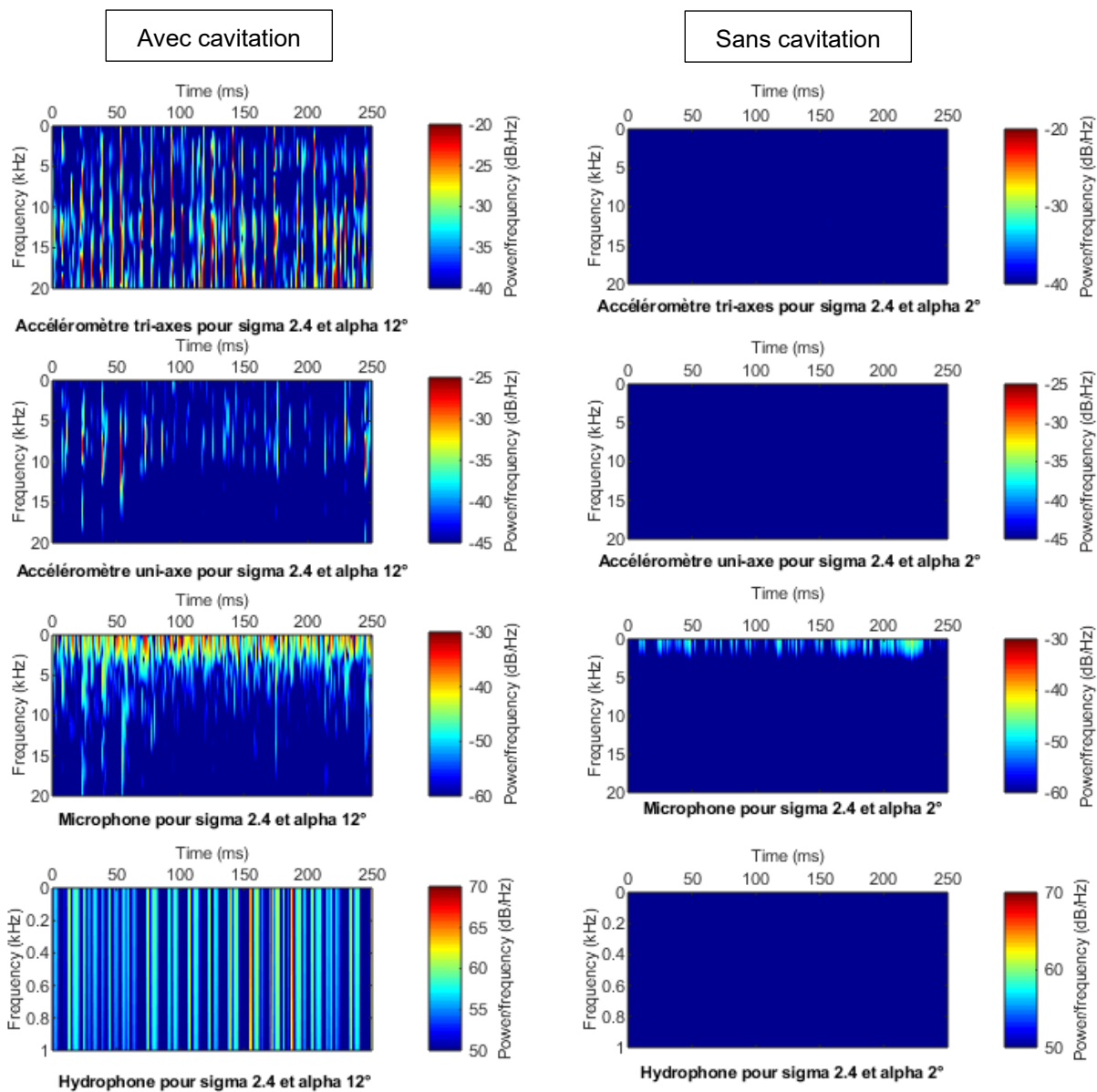


Figure 36 Comparaison des spectrogrammes avec et sans cavitation.

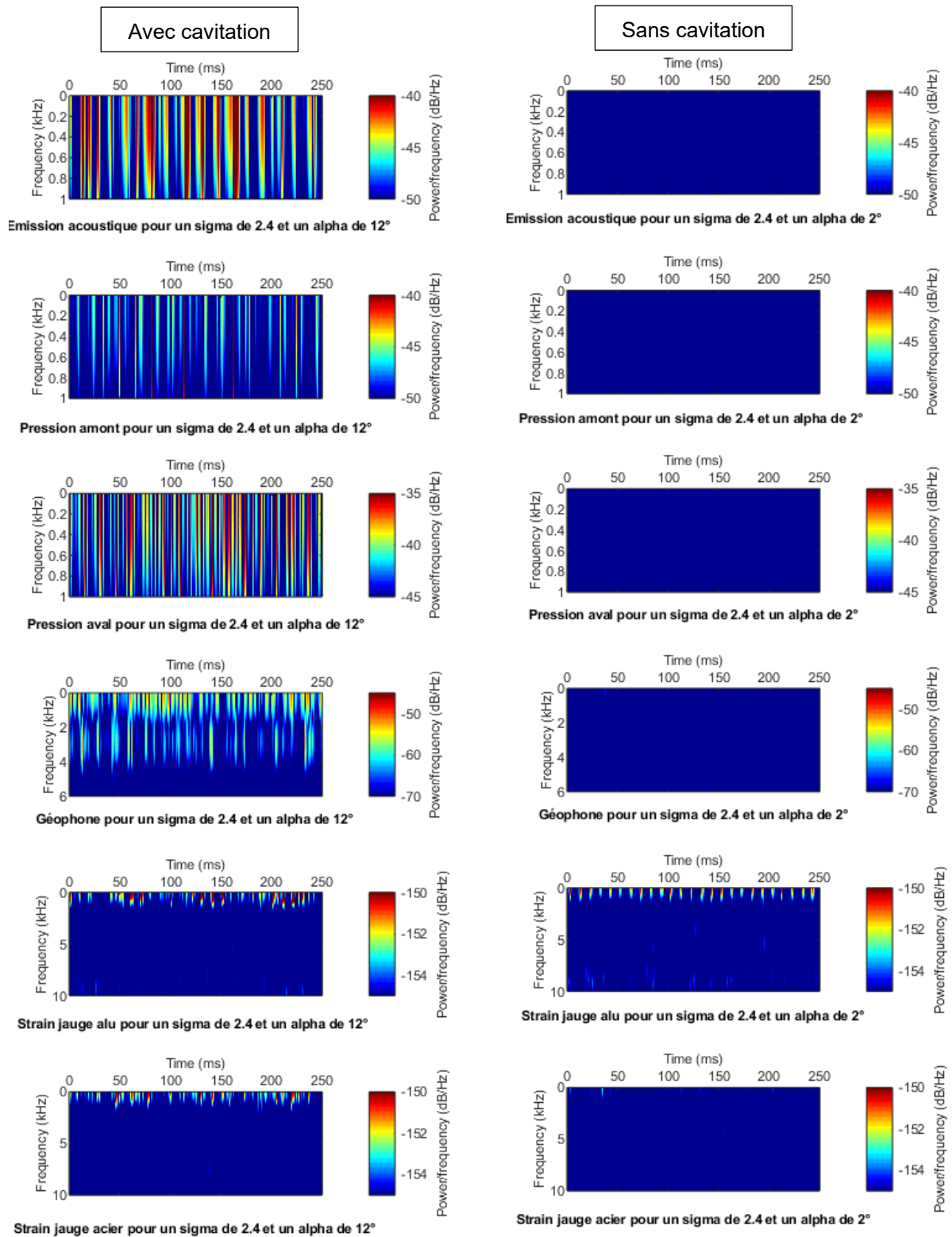


Figure 37 Comparaison des spectrogrammes avec et sans cavitation

Les spectrogrammes montrent très clairement que les fréquences trouvées par les FFT sont liées aux pulsations des poches de vapeur. La différence est très nette entre la situation où la cavitation se produit et la situation où elle ne se produit pas. Il n'y a que les jauges de contraintes qui montrent très peu de



différences. Les jauges ne semblent pas capables de très bien détecter la cavitation, c'est pourquoi on ne regardera plus leurs signaux pour la suite de cette analyse préliminaire.

De part ces deux cas où l'angle d'incidence est changé, on peut remarquer que plus l'incidence augmente plus une dépression va se créer autour du profil et va donc être propice à créer de la cavitation. Sans même changer la vitesse d'écoulement et la pression dans le circuit et donc sans varier le paramètre de cavitation, il a été observé que l'on peut créer de la cavitation autour du profil.

4.5 Influence du niveau de pression.

On a vu que la variation de l'angle d'incidence pouvait engendrer de la cavitation et que cette cavitation semblait se produire à une basse fréquence entre 60 et 120 Hz. Cependant il y a un autre moyen de créer la cavitation pour une même incidence, simplement en changeant le paramètre de cavitation par une variation de pression.

Le cas présenté ici est pour une incidence de 14° et un sigma qui varie entre 2.9 et 11.6. La méthodologie est la même qu'avant. Les signaux bruts seront d'abord présentés ensuite les FFT et enfin les spectrogrammes.

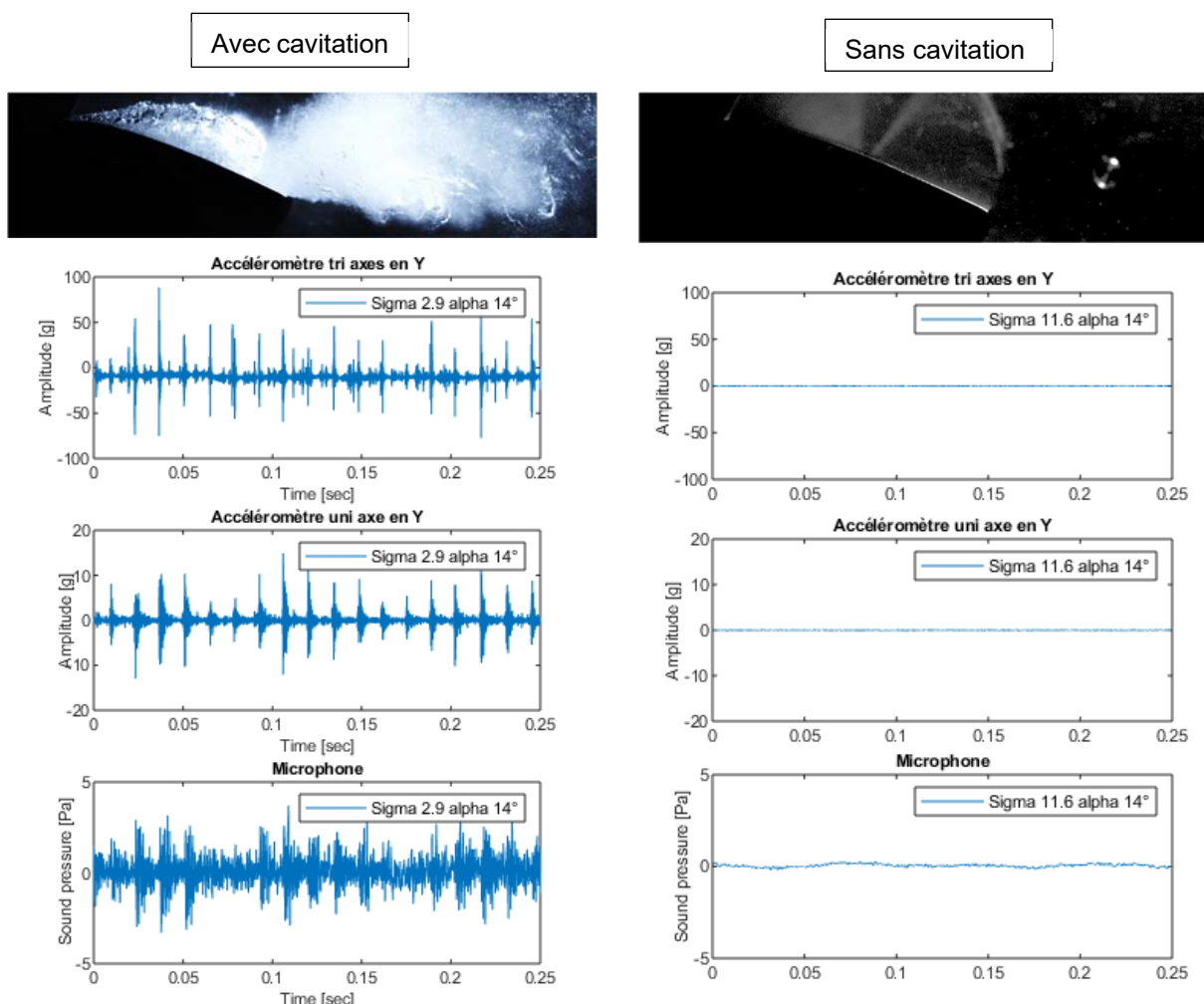


Figure 38 Comparaison des signaux pour un alpha de 14° avec et sans cavitation.

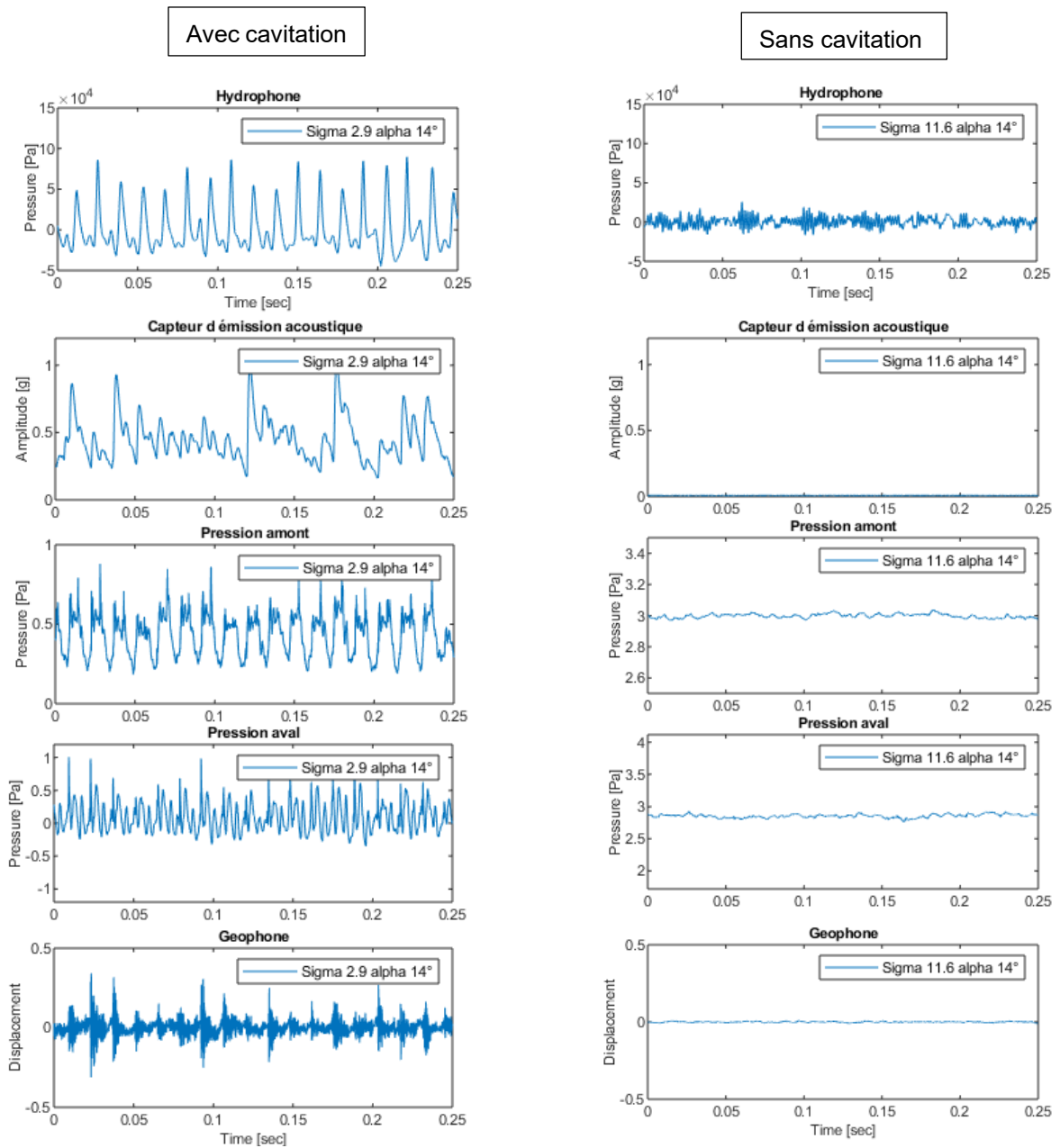


Figure 39 Comparaison des signaux bruts pour un alpha de 14° avec et sans cavitation.

Comme pour le premier cas présenté, les capteurs détectent les pulsations des poches de vapeur. La différence entre le cas cavitant ou la pression dans le circuit est de 0.5 bar relatif et le cas non cavitant ou la pression est de 3 bar relatif, est évidente. Comme précédemment chaque capteur est capable de détecter une différence entre les 2 situations par l'amplitude des fluctuations.

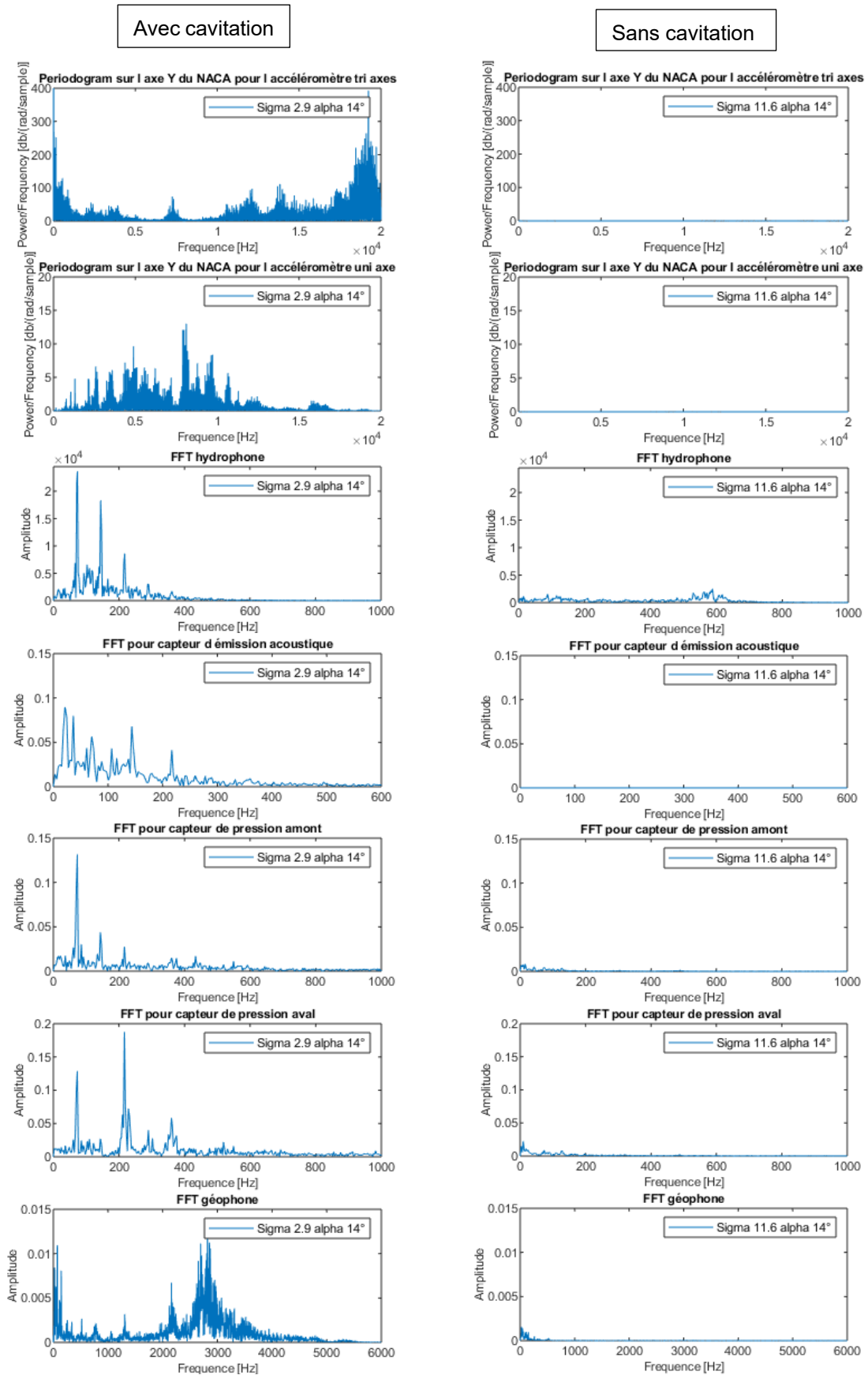


Figure 40 Comparaison des FFT et des periodogrammes pour un alpha de 14° avec et sans cavitation.



Cette fois-ci, les FFT ne donnent pas les mêmes fréquences que pour le cas précédent. L'hydrophone le montre le plus clairement (Figure 40). La FFT a une fondamentale à environ 70Hz et des harmoniques à 140 et 210 Hz. Cette fréquence est commune à chaque capteur. Elle est beaucoup plus difficile à constater pour les accéléromètres et le géophone. Il semble que les 70 Hz correspondent à la fréquence de pulsations des poches de vapeurs. Cependant le géophone redonne la même fréquence autour de 2800 Hz qu'il avait mesuré pour le cas avec une incidence de 12° et un sigma de 2.4. De même pour les accéléromètres qui mesurent des hautes fréquences allant jusqu'à 20 kHz.

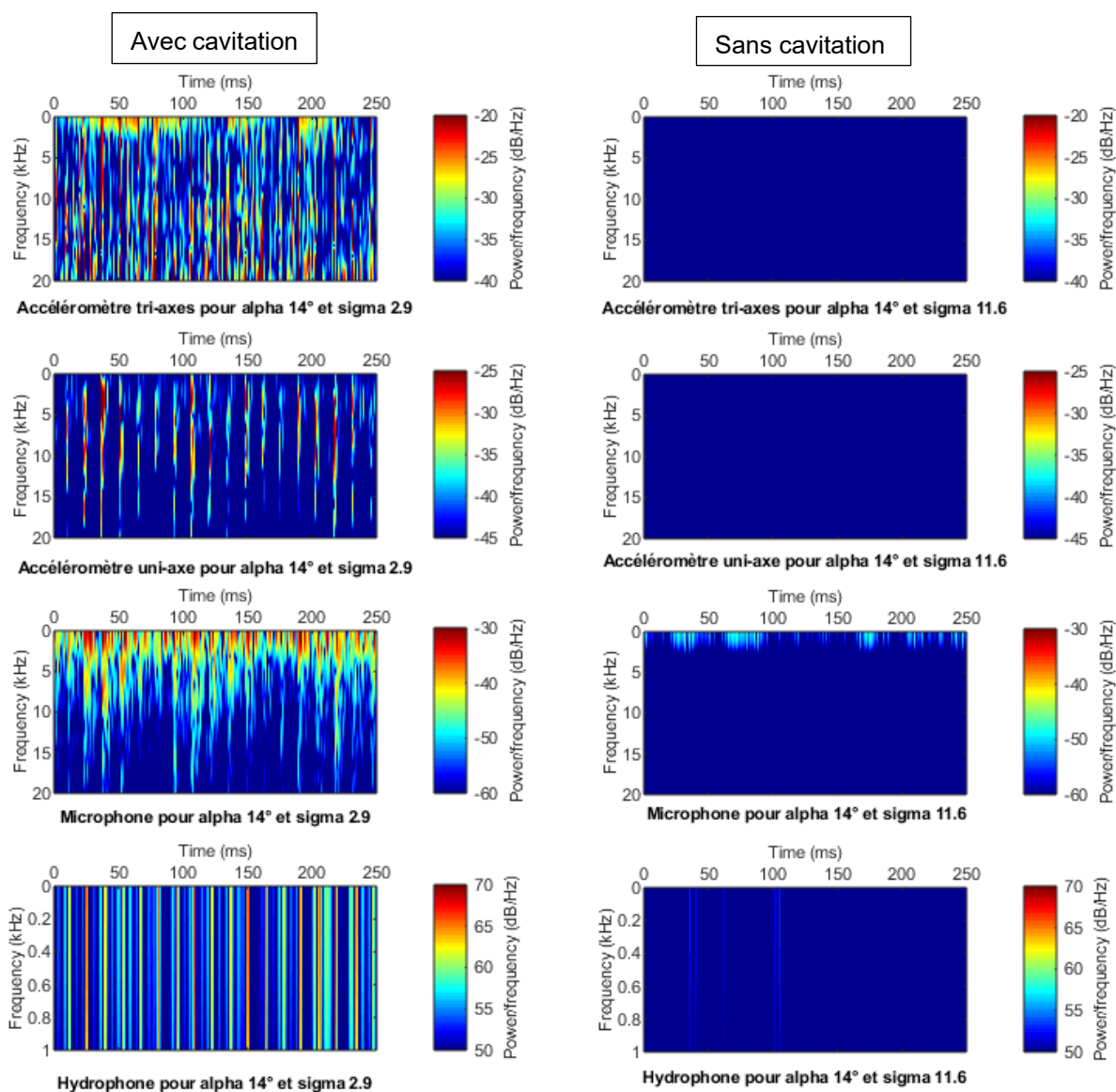


Figure 41 Comparaison des spectrogrammes pour un alpha de 14° avec et sans cavitation.

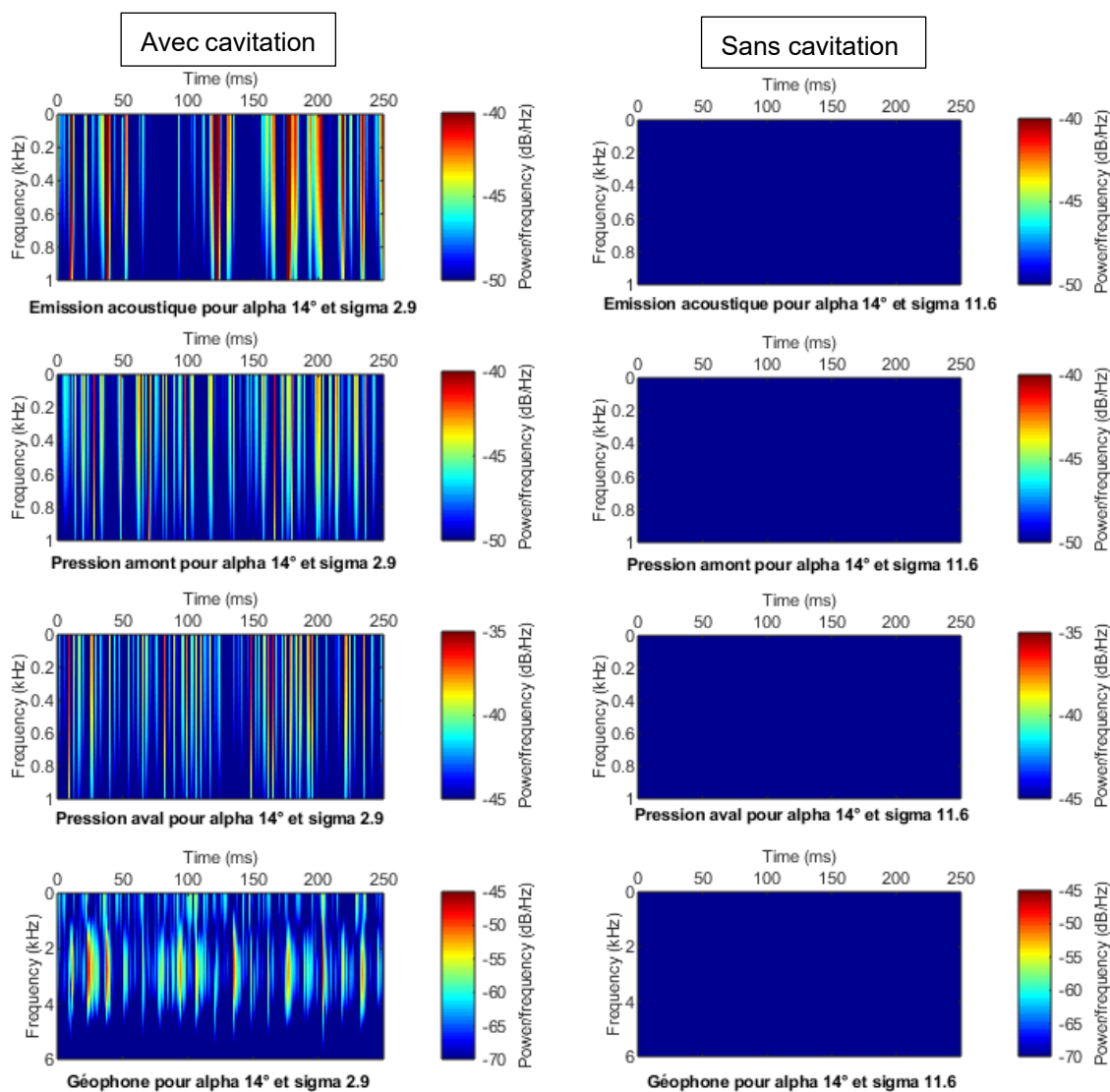


Figure 42 Comparaison des spectrogrammes pour un alpha de 14° avec et sans cavitation

Les spectrogrammes viennent confirmer que les fréquences trouvées sont liées aux pulsations de la cavitation. Dans le cas ci-présent, on peut affirmer que les poches apparaissent et disparaissent à une fréquence de 70 Hz environ. Mais les spectrogrammes montrent que les hautes fréquences mesurées par les accéléromètres le microphone et le géophone sont dues à la cavitation. Sans regarder les pulsations, on peut voir que lorsque la poche est développée, les hautes fréquences apparaissent, ce qui veut dire que la cavitation en elle-même semble se produire à haute fréquence.

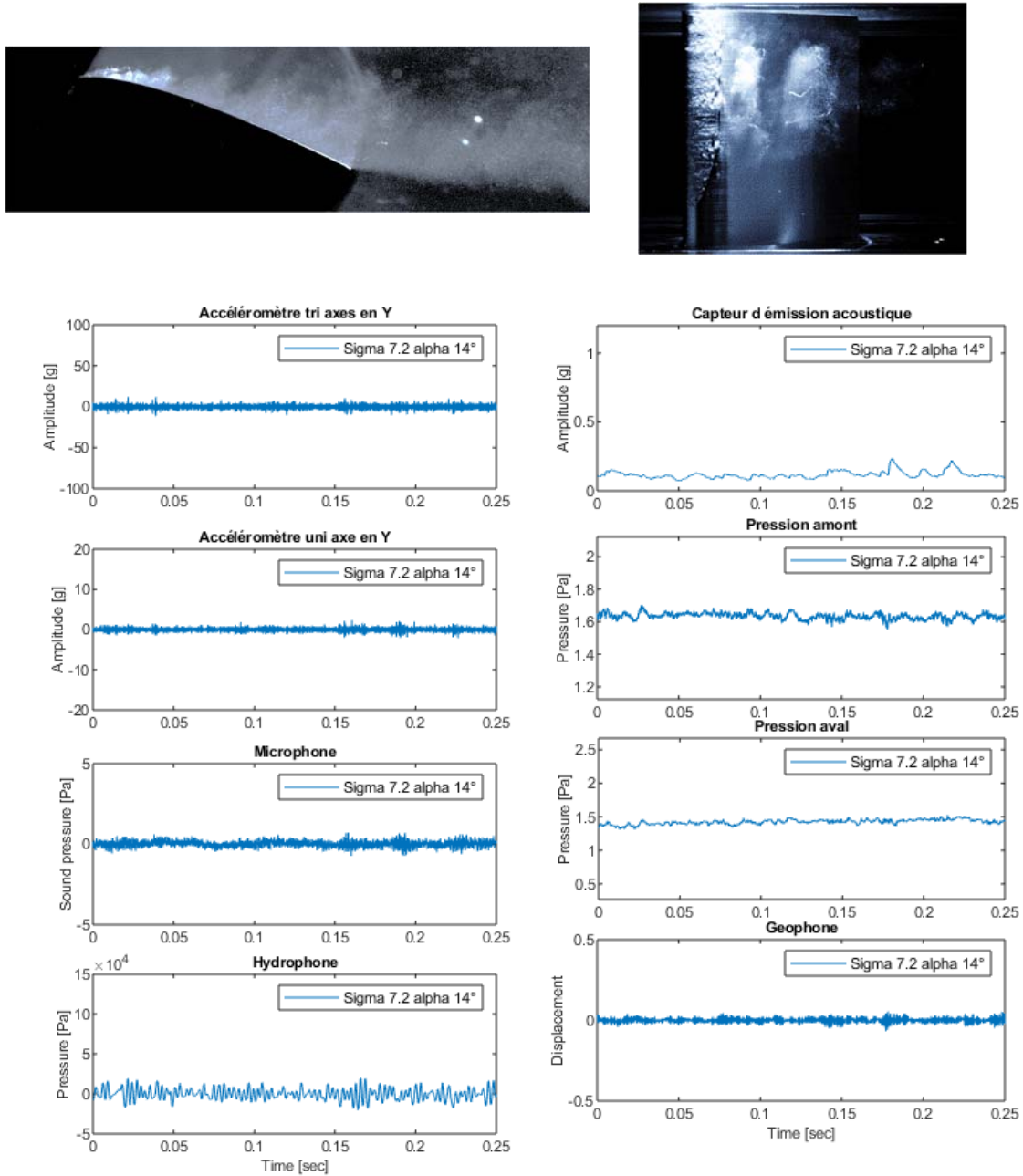


Figure 43 Signaux bruts pour un alpha de 14° et un sigma de 7.2.

Lorsque la cavitation n'est pas extrême et qu'elle ne pulse pas, l'amplitude des signaux est beaucoup plus faible et les fluctuations de basse fréquence ne sont pas présentes. L'hydrophone semble varier à plus haute fréquence que lorsque la cavitation pulse, de même pour les capteurs de pression.

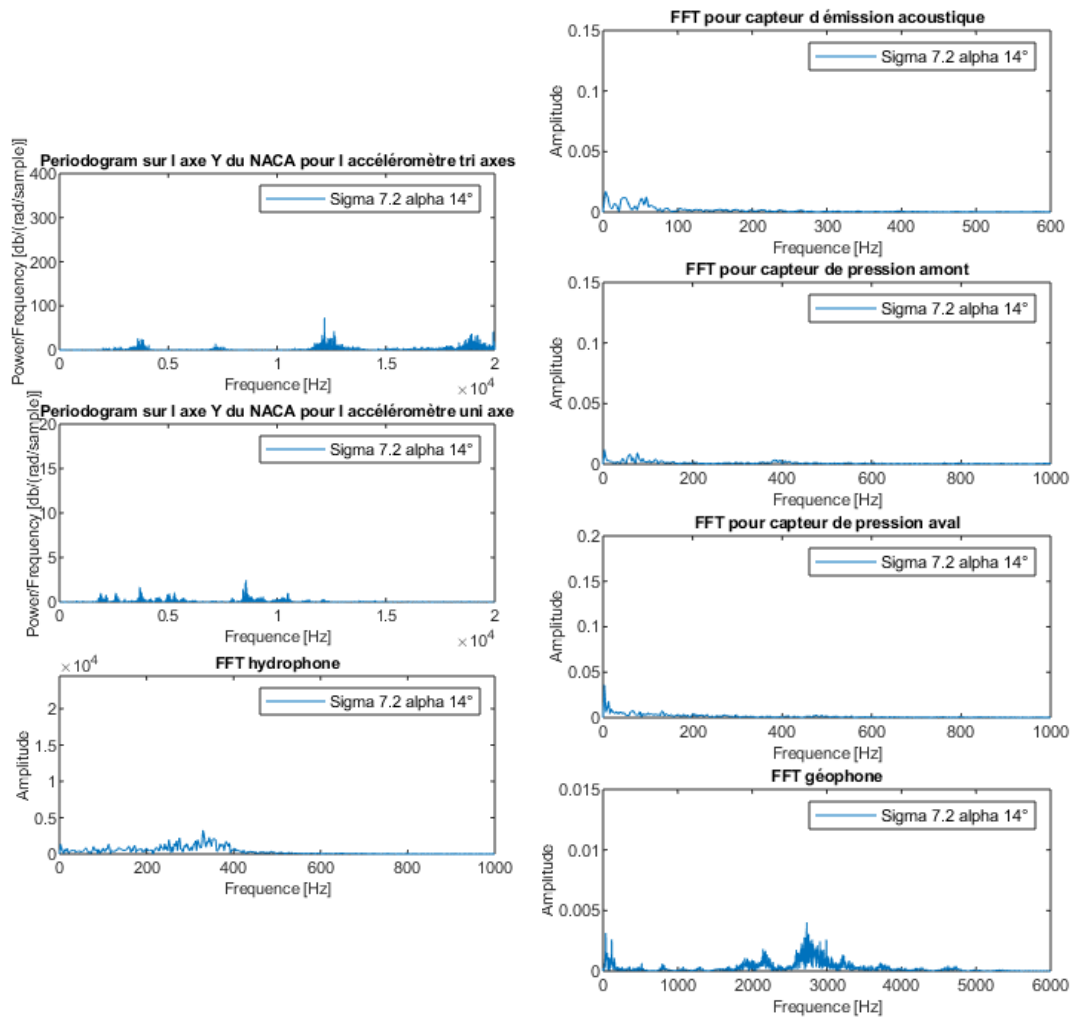


Figure 44 FFT et périodogrammes pour un alpha de 14° et un sigma de 7.2.

L'intensité des fréquences mesurée est beaucoup plus faible. Les accéléromètres et le géophone donnent toujours les mêmes fréquences. Les capteurs de pression semblent montrer déjà des basses fréquences mais de très faible amplitude. L'hydrophone ressort des fréquences totalement différentes, ce qui est logique vu que son signal se produit à plus haute fréquence que lorsque la cavitation est pulsée. Dans le cas présent il semble que la fréquence soit d'environ 380 Hz. Ce qui est intéressant de noter pour l'hydrophone c'est que son signal varie clairement en fonction du type de cavitation. Contrairement aux accéléromètres et au géophone, qui eux, donnent toujours les mêmes fréquences mais avec plus ou moins d'amplitude.

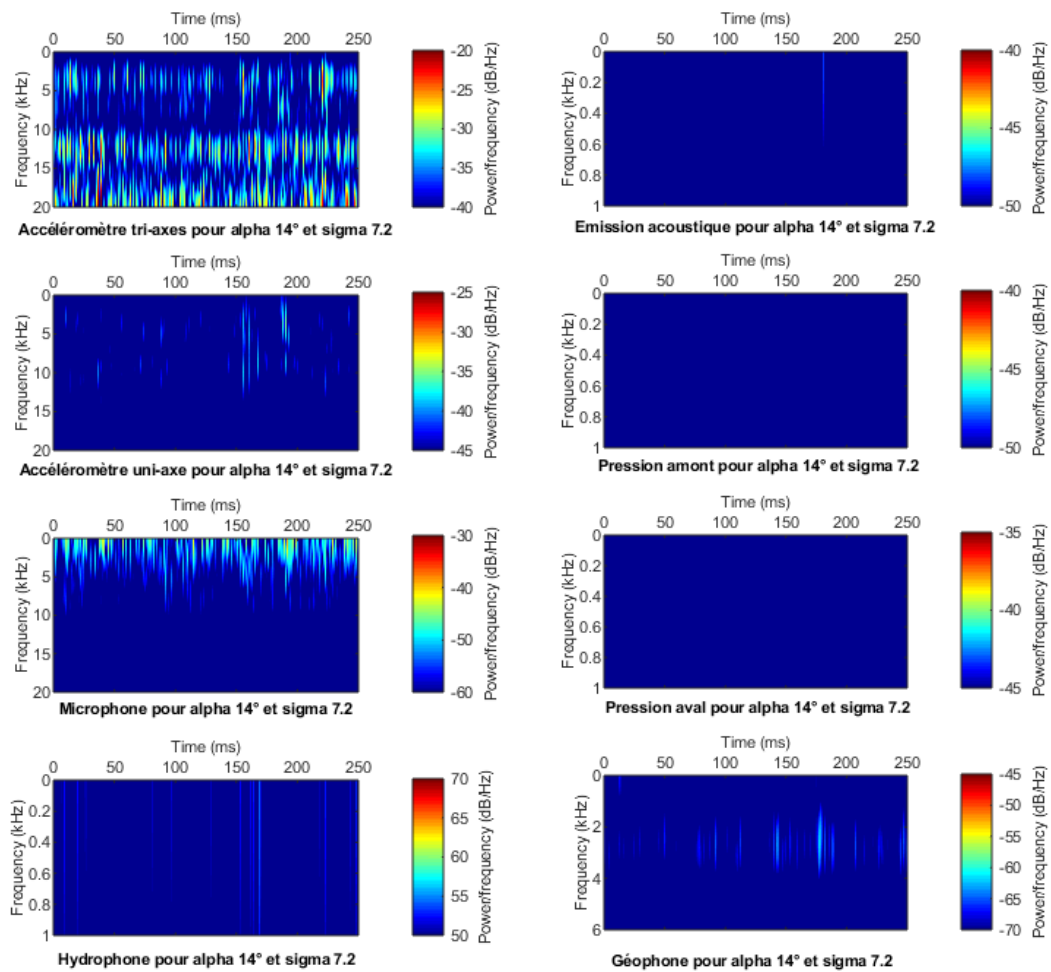


Figure 45 Spectrogrammes pour un alpha de 14° et un sigma de 7.2.

Les spectrogrammes de la figure 45 montrent que l'intensité des fréquences est beaucoup plus faible et cela semble lié au fait que les poches de vapeur implosent de manière moins puissante et cela dû au fait que la pression dans le circuit est plus grande et donc que le sigma est plus élevé.

Pour finir, une mesure dynamique a été réalisée sur un temps de 2 minutes. Le but était de commencer la mesure avec une incidence donnée et de varier la pression au cours de la mesure afin de varier sigma. De ce fait la mesure débute sans cavitation ensuite la pression diminue et la cavitation commence à apparaître et pour finir la pression augmente à nouveau et la cavitation disparaît. Tout cela pour un même angle d'incidence.

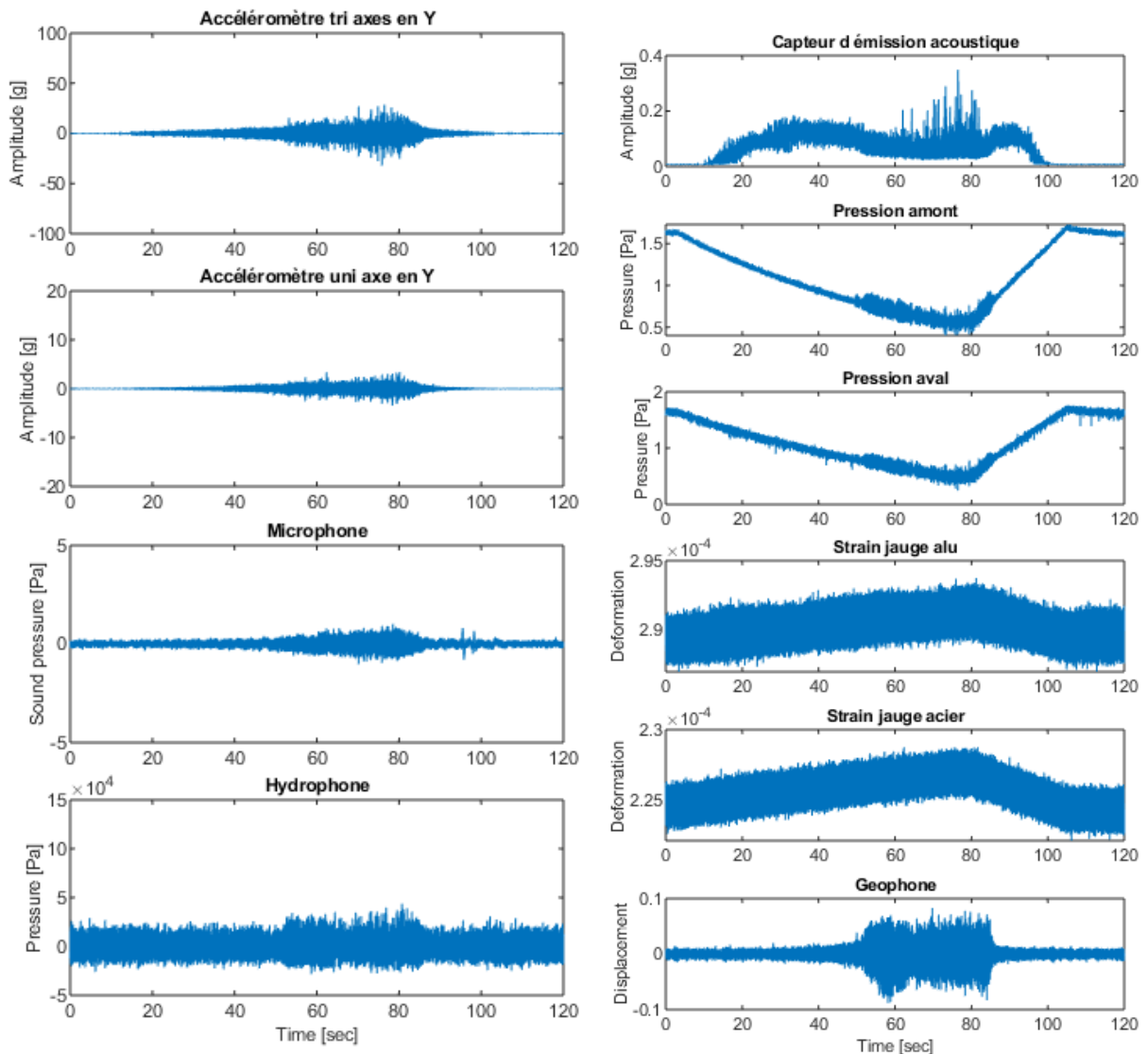


Figure 46 Signaux bruts pour la mesure dynamique avec une incidence de 10° .

L'apparition et la disparition de la cavitation se voit de manière évidente sur tous les graphiques de la figure 46. L'on peut remarquer que la cavitation apparaît de manière lente, cela est dû au fait que la diminution de pression se fait au travers d'un silencieux qui relâche la pression lentement. La disparition est beaucoup plus rapide car le réservoir est mis en pression à l'aide d'un compresseur et donc la pression remonte plus rapidement dans le circuit. Les capteurs de pressions montrent cette variation, tout d'abord en ayant une pente négative et ensuite en augmentant à nouveau par une pente positive plus significative. Les jauges de contraintes voient leur déformation changée principalement à cause de la variation de pression et non à cause de la cavitation. Celle-ci ne semble pas influencer l'amplitude du signal donné par les jauges. Cela justifie le fait que nous ayons mis dans un premier temps de côté ces deux capteurs pour étudier la cavitation. Cependant, une analyse plus détaillée devrait être fait ultérieurement en utilisant différents filtres.



Les spectrogrammes permettent de voir comment la fréquence de réponse des signaux des capteurs évolue au cours du temps. La figure 47 met en évidence les fréquences avec une plus grande intensité. De fait lorsque la cavitation apparaît certaines fréquences gagnent en intensité tandis que les autres non.

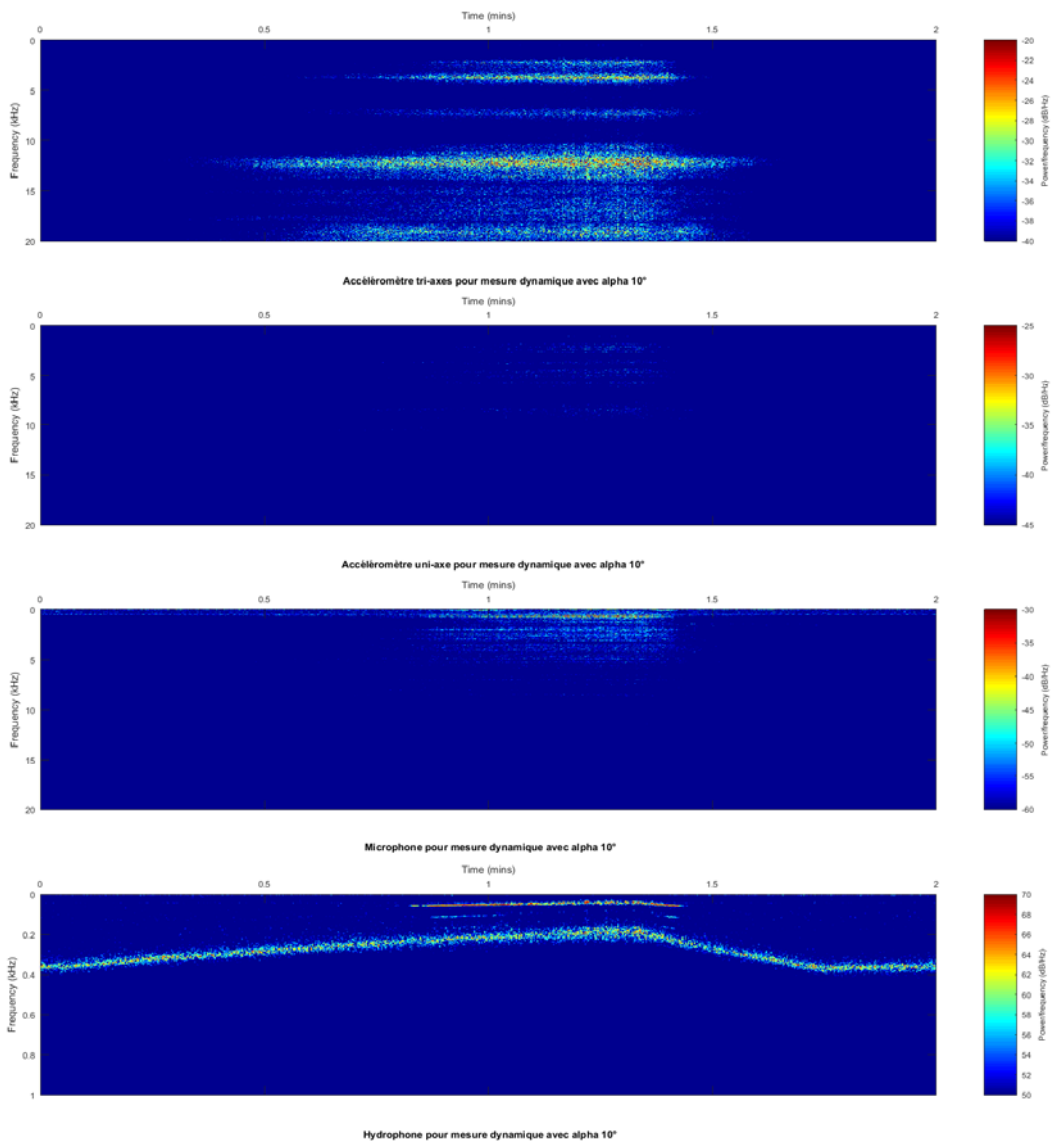


Figure 47 Spectrogrammes pour la mesure dynamique pour une incidence de 10°.

On voit que l'hydrophone a des fréquences plus intenses tout le long de la mesure, mais celles-ci changent au cours du temps. Ces fréquences sont sûrement liées à la pression dans l'écoulement. Cependant l'on remarque que lorsque la cavitation apparaît, l'hydrophone détecte des basses fréquences autour des 100 Hz, fréquences qui jusqu'alors était beaucoup plus faible en intensité.

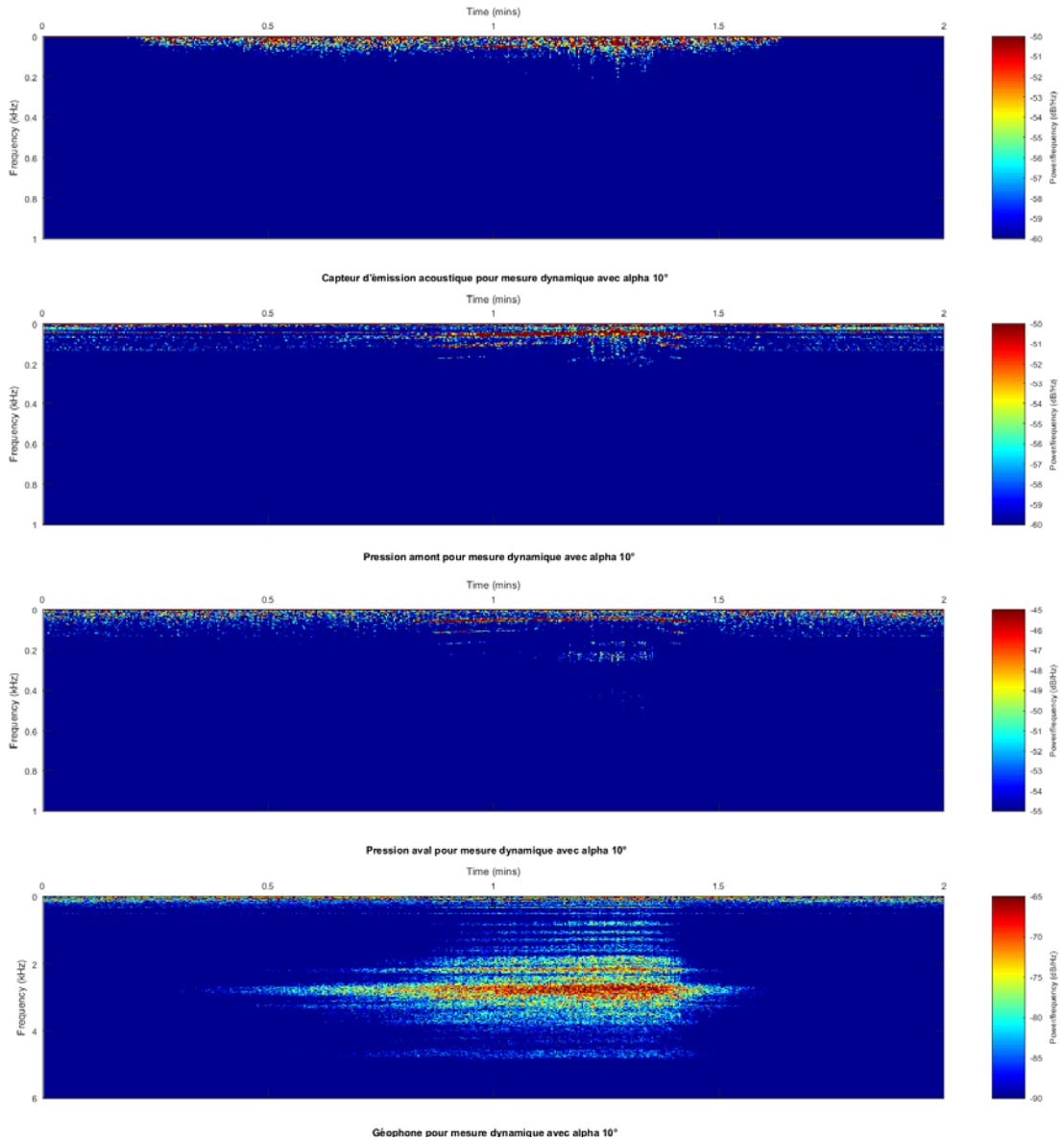


Figure 48 Spectrogrammes pour la mesure dynamique avec une incidence de 10°

La figure 48 montre que la fréquence de 2800 Hz que voyait le géophone sur les autres mesures est bien liée à l'apparition de la cavitation. Pour ce qui est du capteur d'émission acoustique et des capteurs de pression, l'on remarque que ceux-ci ne voient que des basses fréquences et que celles-ci sont présentes presque tout le long de la mesure.

Cette mesure dynamique a permis de voir clairement l'évolution de l'intensité des fréquences au cours du temps et permet de lier, au moins pour ce cas simplifié, l'apparition de certaines fréquences avec la cavitation.



5 Conclusions

Cette étude préliminaire de la cavitation a permis de mettre en évidence la capacité de certains capteurs à détecter ce phénomène. La carte de cavitation du profil NACA0015 a pu être établie grâce à la visualisation réalisée avec la caméra Phantom V411. De cette carte les points de fonctionnement ont été établis et ont permis de voir l'influence de l'angle d'incidence et du niveau de pression sur la cavitation.

Les résultats montrent que les capteurs voient une différence entre un écoulement cavitant ou non. Seules les deux jauges de contraintes qui ne semblent pas capables de détecter la cavitation. Que ce soient les accéléromètres, les capteurs de pression, l'hydrophone, le microphone ou le géophone, ils ont tous été capable de détecter au moins la pulsation des poches de vapeurs, autant au niveau du signal brut quand dans la FFT et les spectrogrammes.

Ces premières mesures semblent établir que la fréquence de pulsations de poches se situe pour ce cas test autour des 100 Hz. Cependant le phénomène en lui-même de la cavitation semble se produire à plus haute fréquence. Le géophone et les deux accéléromètres donnent les 3 une fréquence en lien avec la cavitation autour de 3000 Hz. Les capteurs de pression et l'hydrophone semblent avoir plus de peine à détecter la cavitation non pulsée. Cependant, il est à noter que l'hydrophone ne sort pas les mêmes fréquences pour les différents types de cavitation, contrairement aux autres capteurs. Ce résultat semble indiquer qu'en continuant ces investigations avec un hydrophone, le type de cavitation se développant dans un écoulement pourrait être identifié.

La mesure dynamique réalisée pour un angle de 10° met en avant l'apparition de certaines fréquences en même temps que l'apparition de la cavitation. Celle-ci démontre la capacité des accéléromètres, de l'hydrophone et du géophone de détecter la cavitation au cours du temps.

6 Aperçu et mise en œuvre prochaine

Les prochaines étapes seraient de :

- Tester l'effet du positionnement des capteurs sur les signaux et la fiabilité de détection de la cavitation.
- Tester la capacité de détection de la cavitation d'un stéthoscope électronique, d'un capteur à émission acoustique à basse fréquence ou encore d'un accéléromètre absolu.
- Tester d'autres méthodes de post-traitement (p. ex. les Wavelets, les algorithmes d'intelligence artificielle appliqués aux spectrogrammes ou aux Wavelets, etc.).
- Déployer l'instrumentation testée sur le profil d'une vanne paillon ou encore sur les pompes de recirculation, qui elles, cavitent également dans certaines circonstances.
- Déployer l'instrumentation utilisée dans la centrale sur le banc de test.

Pour finir il faudrait étudier toutes les données mesurées dans la centrale avec la méthodologie qu'on aura sélectionné comme étant la plus prometteuse pour la détection de la cavitation.



7 Coopération nationale et internationale

Les travaux menés dans le cadre de cette étude s'inscrivent dans les activités de recherche du Groupe Hydroélectricité dans le cadre des programmes SCCER-SoE and Furies, en collaboration avec les principaux acteurs académiques et industriels suisses dans le domaine de l'énergie, supportés financièrement par InnoSuisse. Ce projet est le fruit d'une coopération d'étude plus étroite menée avec Meggitt SA (Vibro-Meter®) et HydroExploitation SA. En effet, Meggitt SA a mis à disposition une chaîne de mesure complète pour le monitoring à long terme dans une centrale hydroélectrique. La même instrumentation a été mise à disposition en laboratoire pour compléter ultérieurement cette étude. HydroExploitation SA a mis à disposition l'installation des capteurs dans la centrale ainsi qu'un important feedback au niveau de la direction du développement de l'étude présente et futurs afin d'attendre l'objectif final. Concernant la dissémination des résultats, un poster a été exposé à la Conférence Annuelle SCCER-Furies qui a eu lieu à Aarau le 21 octobre 2019. L'étude a aussi été présentée dans le cadre des Journées SHF/AFM : Machines Hydrauliques et Cavitation (une conférence internationale avec des acteurs spécialisés dans le domaine de la cavitation) déroulées entre 6 et 7 novembre 2019 à Sion. Des articles de conférence et de journal sont prévus une fois le posttraitement des données plus avancé.

8 Publications

F. Pedroni, *Détection de la cavitation*, Travail de Bachelor, HES-SO VS, Sion, Suisse, 2019.

V. Hasmatuchi, F. Pedroni, D. Biner, J. Decaix, G. Blommaert, C. Münch-Alligné, *Non-intrusive detection and monitoring of cavitation in hydraulic machines*, SCCER-Furies Annual Conference 2019, Aarau, Suisse, 2019.

V. Hasmatuchi, F. Pedroni, D. Biner, J. Decaix, G. Blommaert, C. Münch-Alligné, *Non-intrusive detection and monitoring of cavitation in hydraulic machines*, Journées SHF/AFM: Machines Hydrauliques et Cavitation, Sion, Suisse, 2019.

9 Bibliographie

U. Dorji, R. Ghomaschchi, 2014, *Hydro turbine failure mechanisms: An overview*. Engineering Failure Analysis 44 (2014), 136–147.

X. Liu, Y. Luo. Z. Wang, 2016, *A review on fatigue damage mechanism in hydroturbines*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 54 (2016), 1-14.

X. Escaler, E. Egusquiza, M. Farhat, F. Avellan, M. Coussirat, 2006, *Detection of cavitation in hydraulic turbines*. Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006), 983–1007.

D. Valentín, A. Presas, C. Valero, M. Egusquiza, E. Egusquiza, 2019, *Detection of Hydraulic Phenomena in Francis Turbines with Different Sensors*. Sensors 2019, 19(18), 4053.

M. Prenat, *Séries temporelles*, Chap. 4 Covariance et densité spectrale. Techniques de l'ingénieur, 2012.

F. Cottet, *Aide-mémoire-Traitement du signal*, Chap. 3 Système de transmission. Dunod Ed. 2011.

V. Hasmatuchi, F. Botero, S. Gabathuler, C. Münch, 2015, *Design and control of a new hydraulic test rig for small hydro turbines*. The International Journal on Hydropower & Dams, 22(4), 51-60.



10 Annexes

10.1 Annexe 1 – Setup expérimental des mesures Turbicav

Mesures de la cavitation sur la veine d'essai de la HES-SO Valais – décembre 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-A10	Kistler IEPE acc. 3-axis	±5 VDC	±100 g	Structure – Y profil NACA0015
3	Tri100gy_X_SN2139607	PXIe-4497-A11	Kistler IEPE acc. 3-axis	±5 VDC	±100 g	Structure – X profil NACA0015
4	Tri100gz_Z_SN2139607	PXIe-4497-A12	Kistler IEPE acc. 3-axis	±5 VDC	±100 g	Structure – Z profil NACA0015
5	Micro_SN98656	PXIe-4497-A13	G.R.A.S IEPE Microphone 46AE	±8 VDC	15...120 dB	Amont côté droite du profil NACA0015
6	Uni100g_Y_SN4880946	PXIe-4497-A14	Kistler IEPE acc. 1 axis	±5 VDC	±100 g	Corps de la veine – Y du profil NACA0015
7	Hydrophone_SN5493417	PXIe-4497-A15	Kistler IEPE Hydrophone	±5 VDC	0...14 bar	Aval du profil NACA0015
8	AE_Brut_SN5527551	PXI-6238-A10	Kistler Acoustic Emission Sensor	4...20 mA	50...400 kHz	Structure – Profil NACA0015
9	AE_RMS_SN5527551	PXIe-4339-A10	Kistler Acoustic Emission Sensor	±10 VDC	50...400 kHz	Structure – Profil NACA0015
10	Pressure_SN16772	PXIe-4339-A11	Unisensor pressure sensor	±5 VDC	0...7 bar	Amont du profil NACA0015
11	Pressure_SN16770	PXIe-4339-A12	Unisensor pressure sensor	±5 VDC	0...7 bar	Aval du profil NACA0015
12	Strain_gauge_812075352	PXIe-4339-A13	HBM strain gauge 1-LY13-6/120	±5 VDC	-	Corps de la veine
13	Strain_gauge_EV6844400	PXIe-4339-A14	HBM strain gauge 6/120ALY11	±5 VDC	-	Corps de la veine
14	Geophone	PXIe-4339-A15	SM geophone	±5 VDC	-	Corps de la veine

- Fréquence d'acquisition : 40 kHz et 25kHz
- Système d'acquisition : NI PXIe-1073 + NI PXIe 4497 + NI PXI 6238 + NI PXIe 4339
- Câblage carte NI TB-4339 :



10.2 Annexe 2 – Résultats pour sigma 2.4, alpha 6°

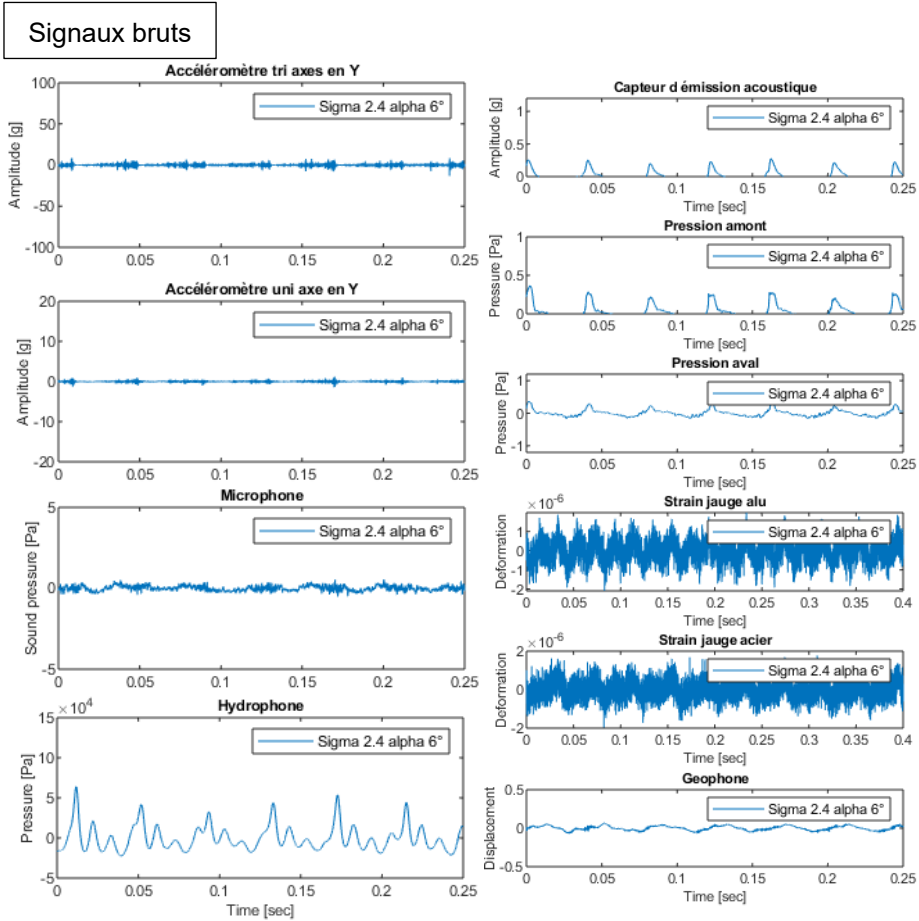


Figure 49 Signaux bruts pour un alpha de 6° et un sigma de 2.4.



Périodogrammes et FFT

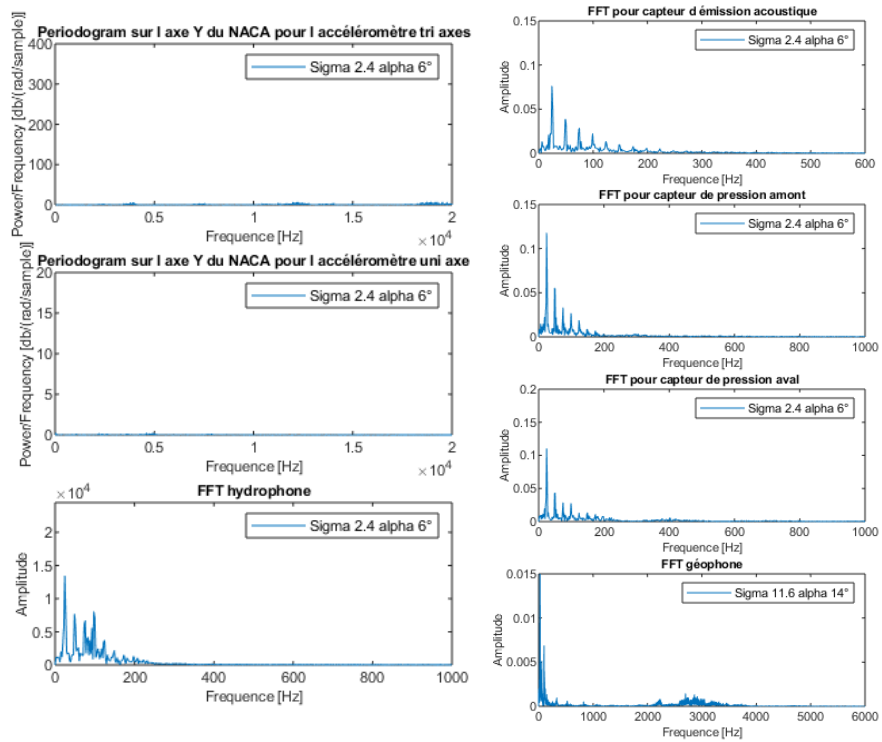


Figure 50 Périodogrammes et FFT pour un α de 6° et un σ de 2.4.



Spectrogrammes

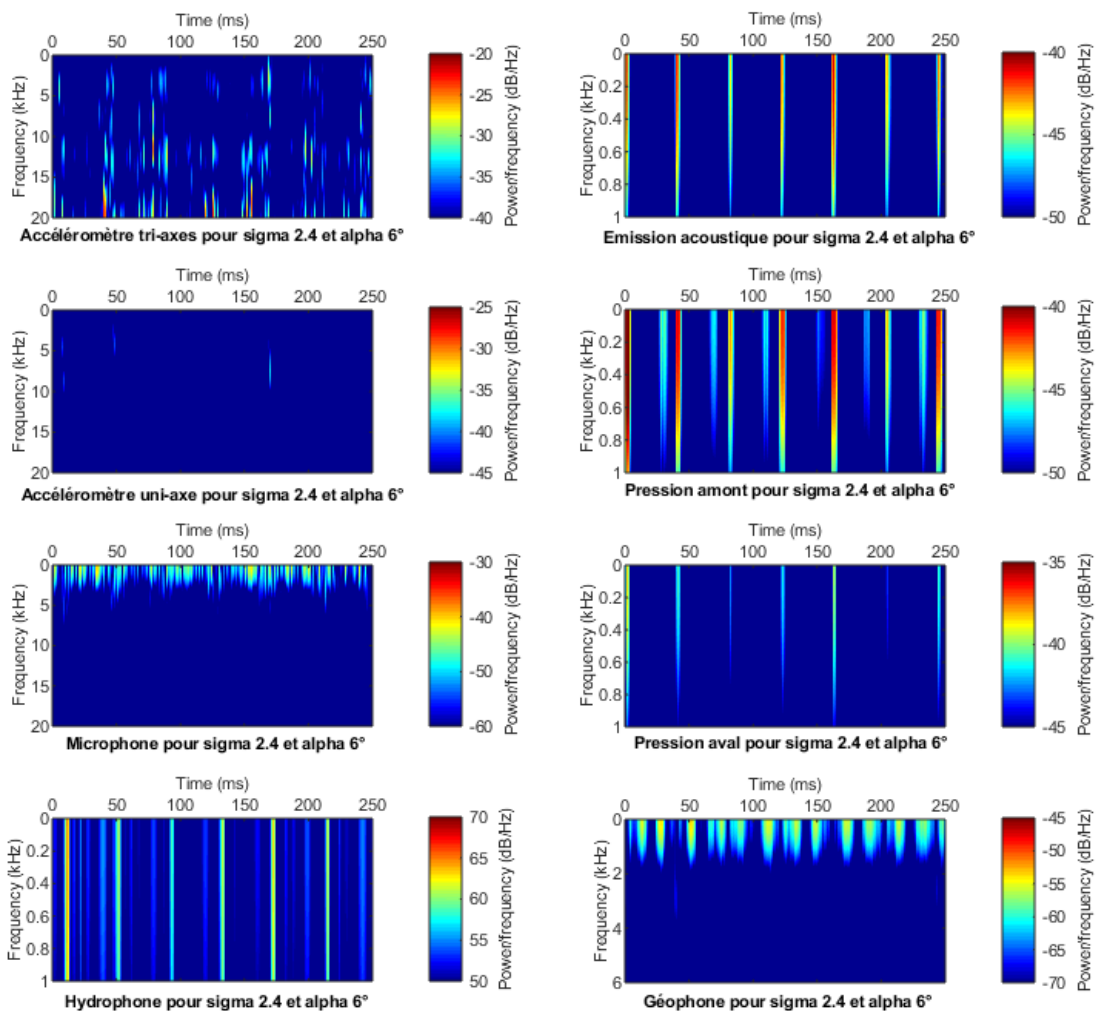


Figure 51 Spectrogrammes pour un alpha de 6° et un sigma de 2.4.



10.3 Annexe 3 – Résultats pour sigma 3.7, alpha 2°

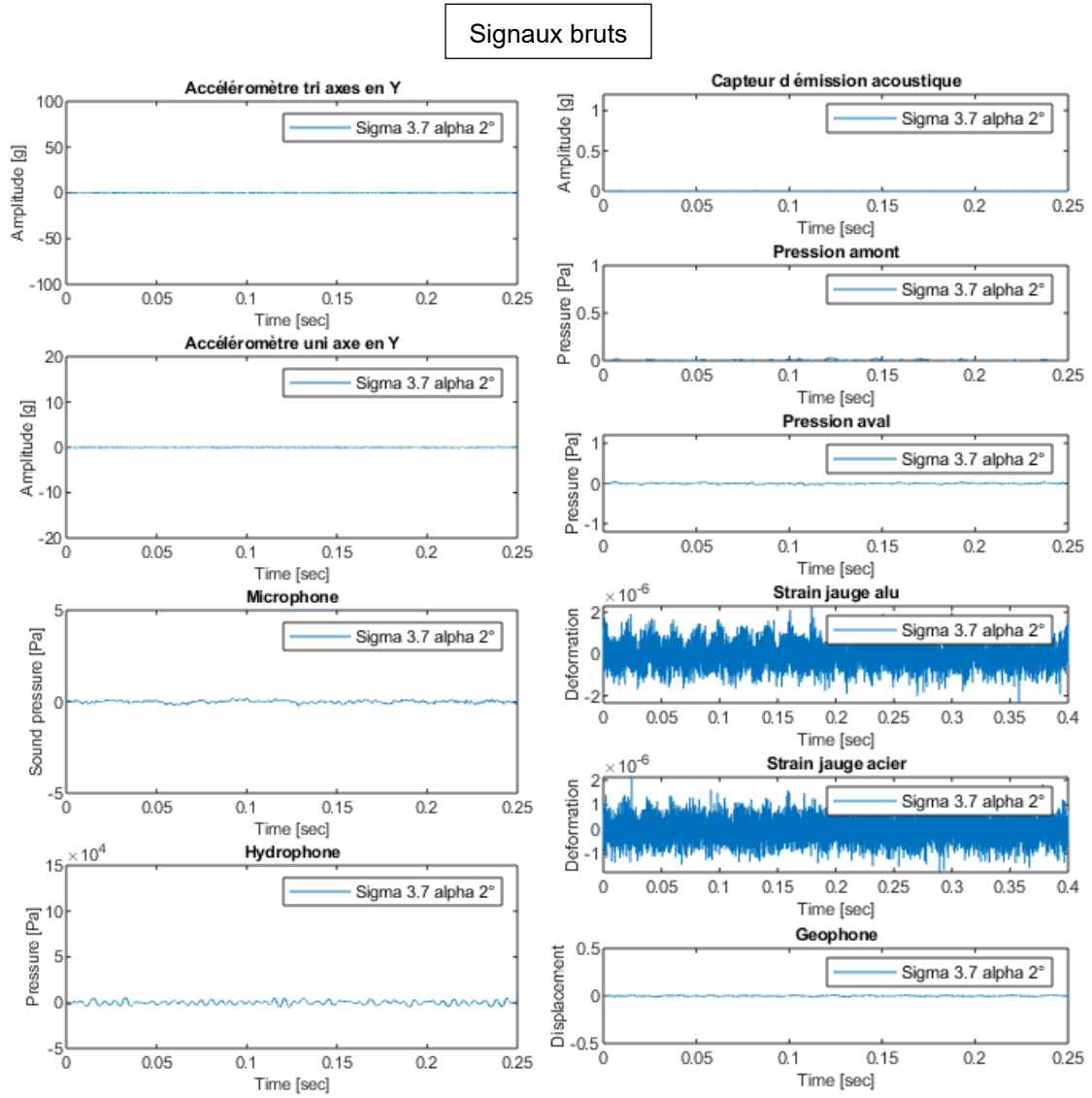


Figure 52 Signaux bruts pour un alpha de 2° et un sigma de 3.7.



Periodogrammes et FFT

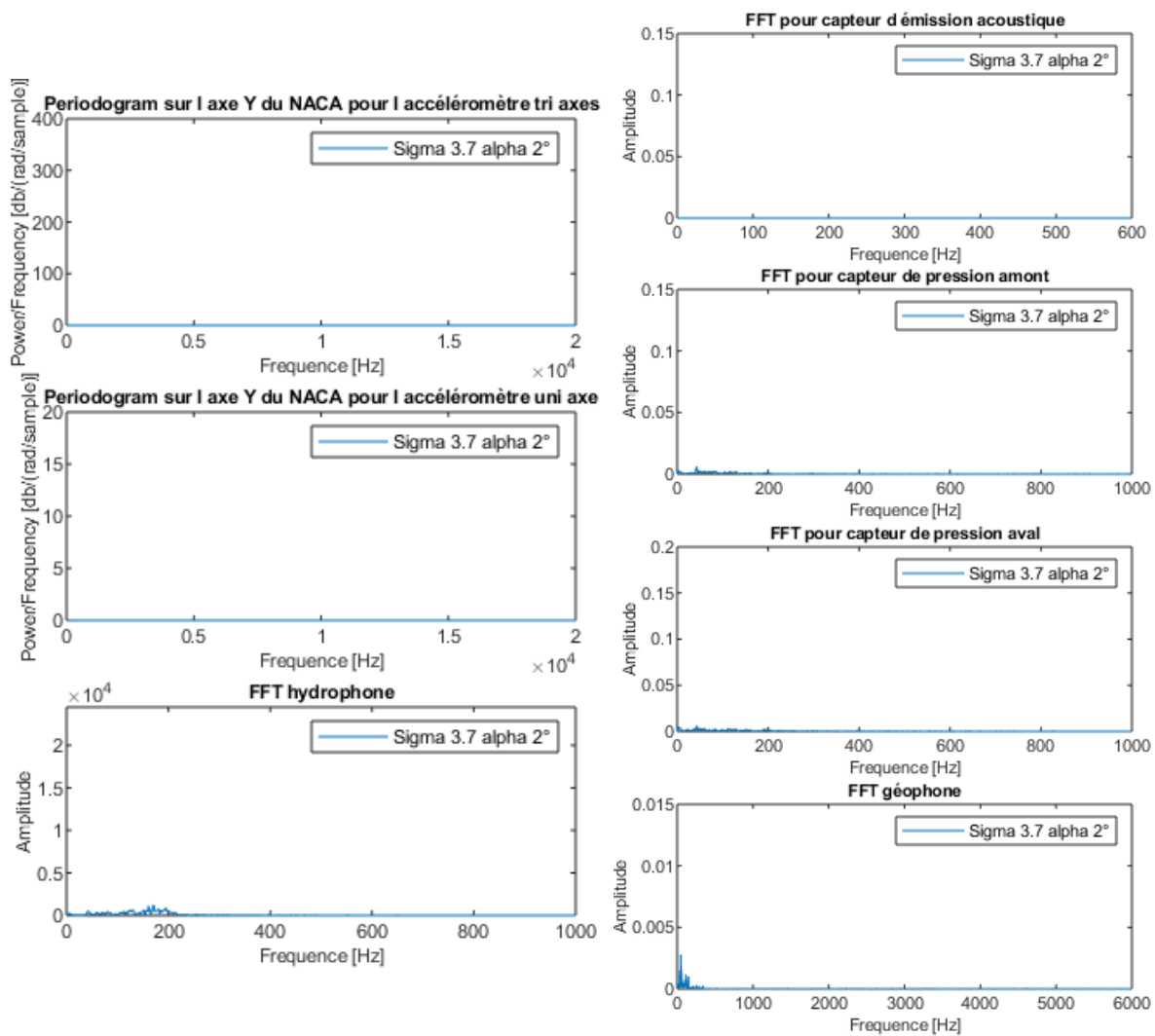


Figure 53 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 2° et un sigma de 3.7.



Spectrogrammes

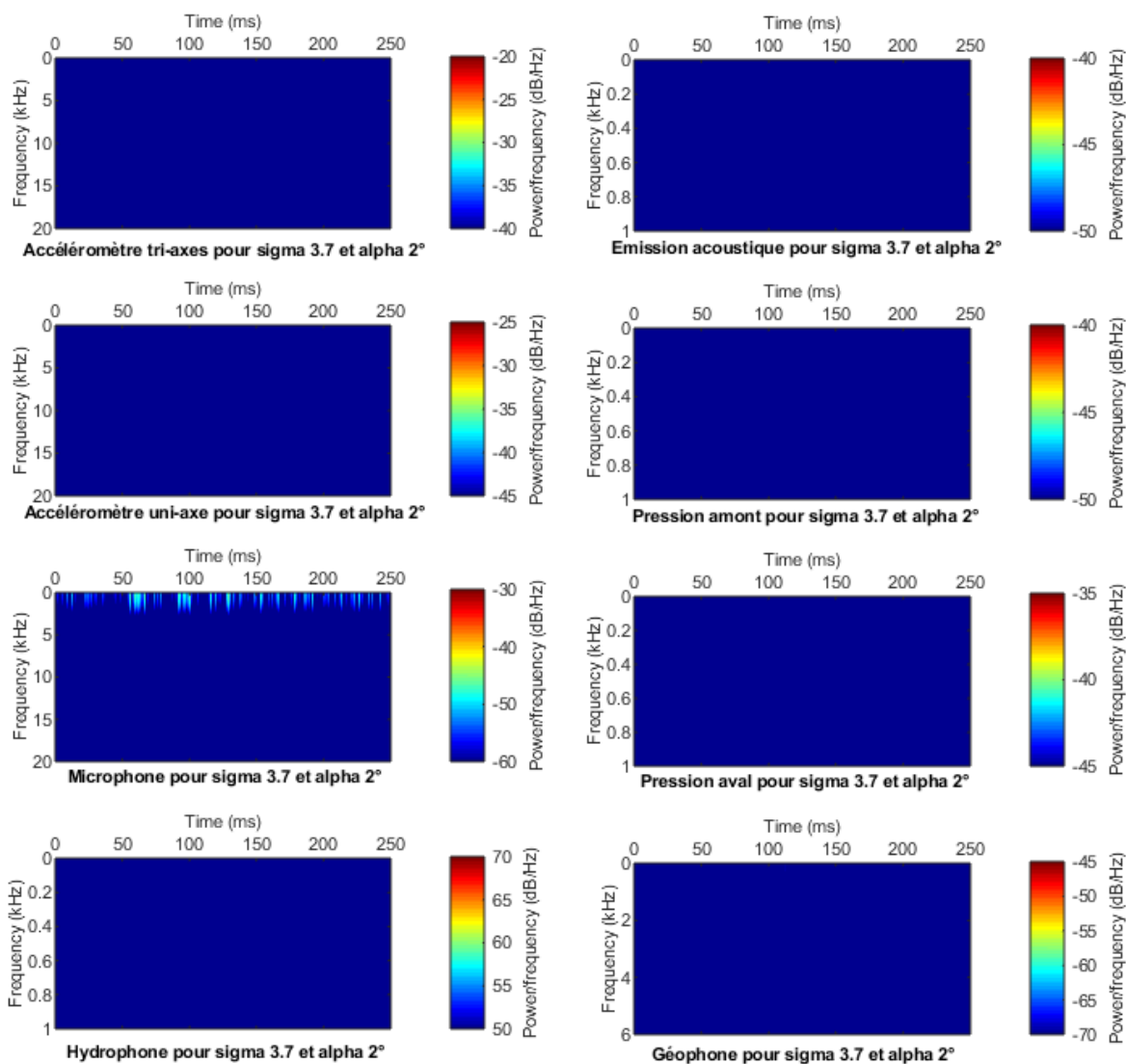


Figure 54 Spectrogrammes pour un alpha de 2° et un sigma de 3.7.



10.4 Annexe 4 – Résultats pour sigma 3.7, alpha 6°

Signaux bruts

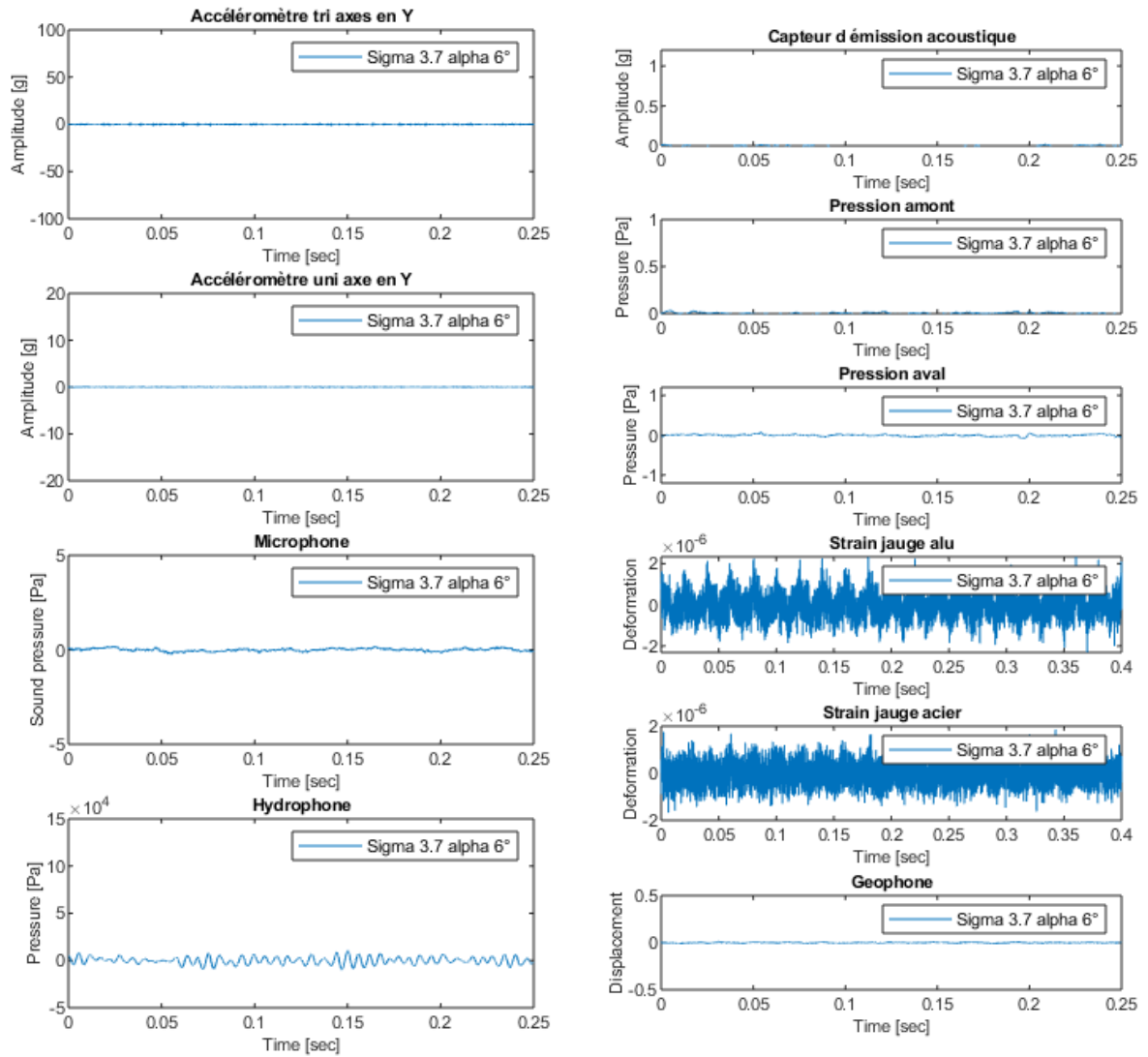


Figure 55 Signaux bruts pour un alpha de 6° et un sigma de 3.7.



Periodogrammes et FFT

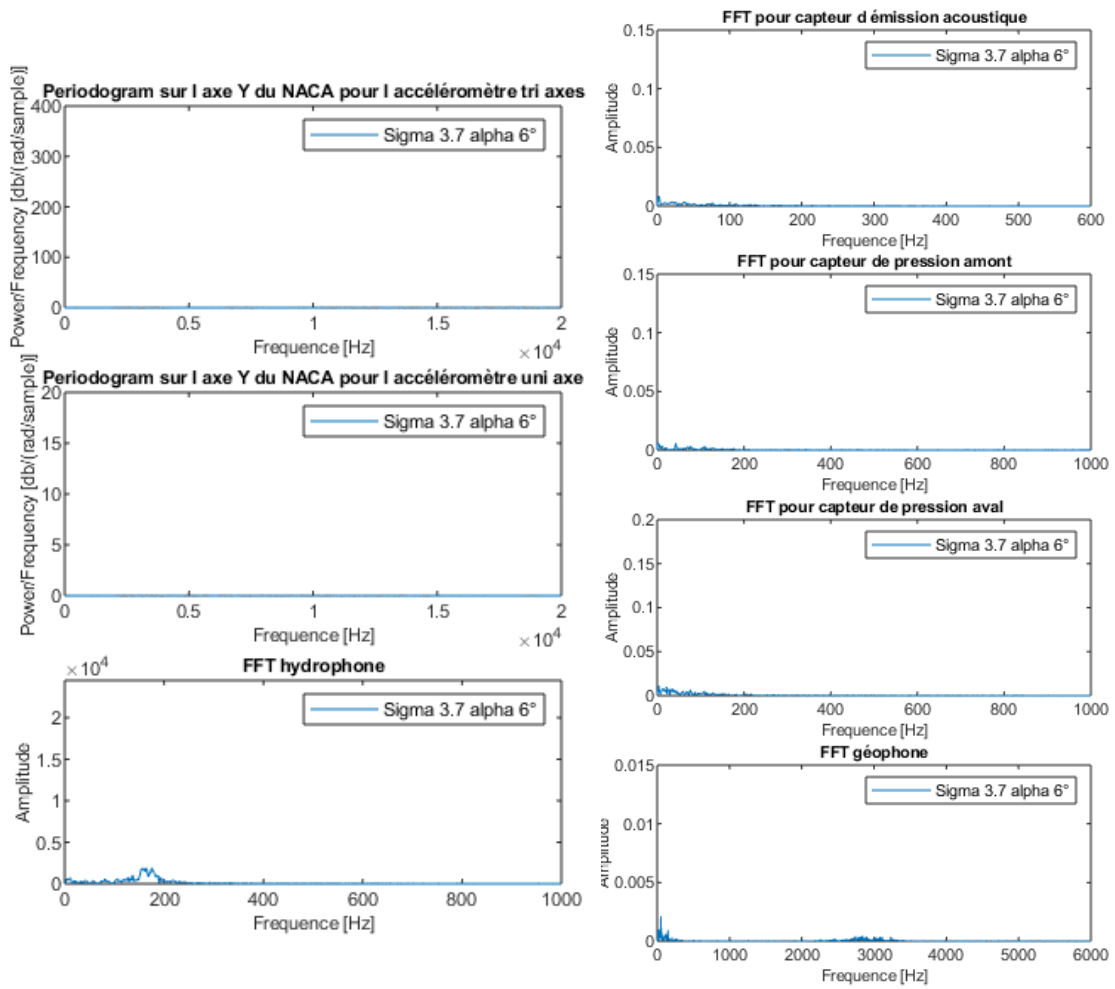


Figure 56 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 6° et un sigma de 3.7.



Spectrogrammes

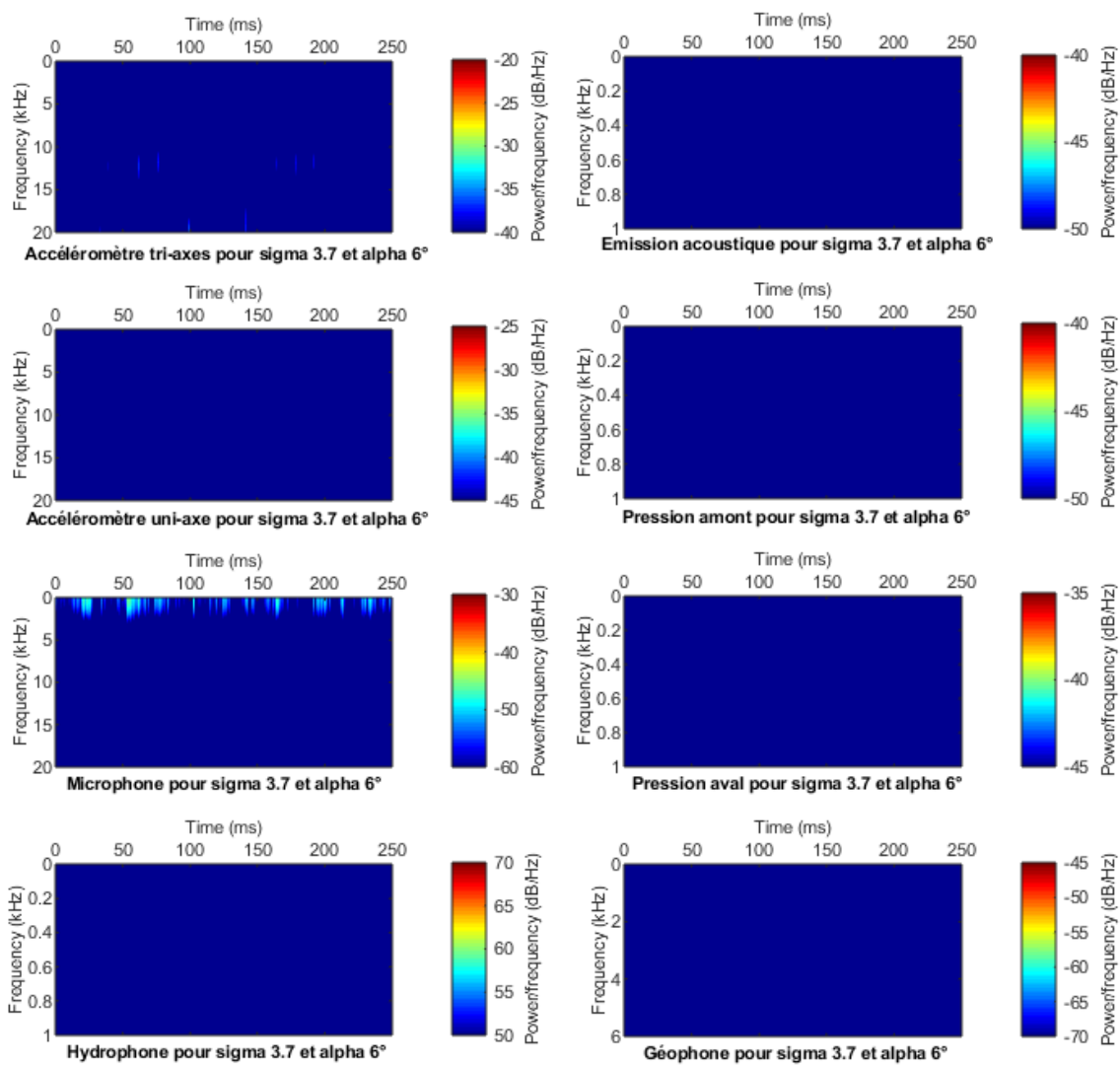


Figure 57 Spectrogrammes pour un alpha de 6° et un sigma de 3.7.



10.5 Annexe 5 – Résultats pour sigma 3.7, alpha 12°

Signaux bruts

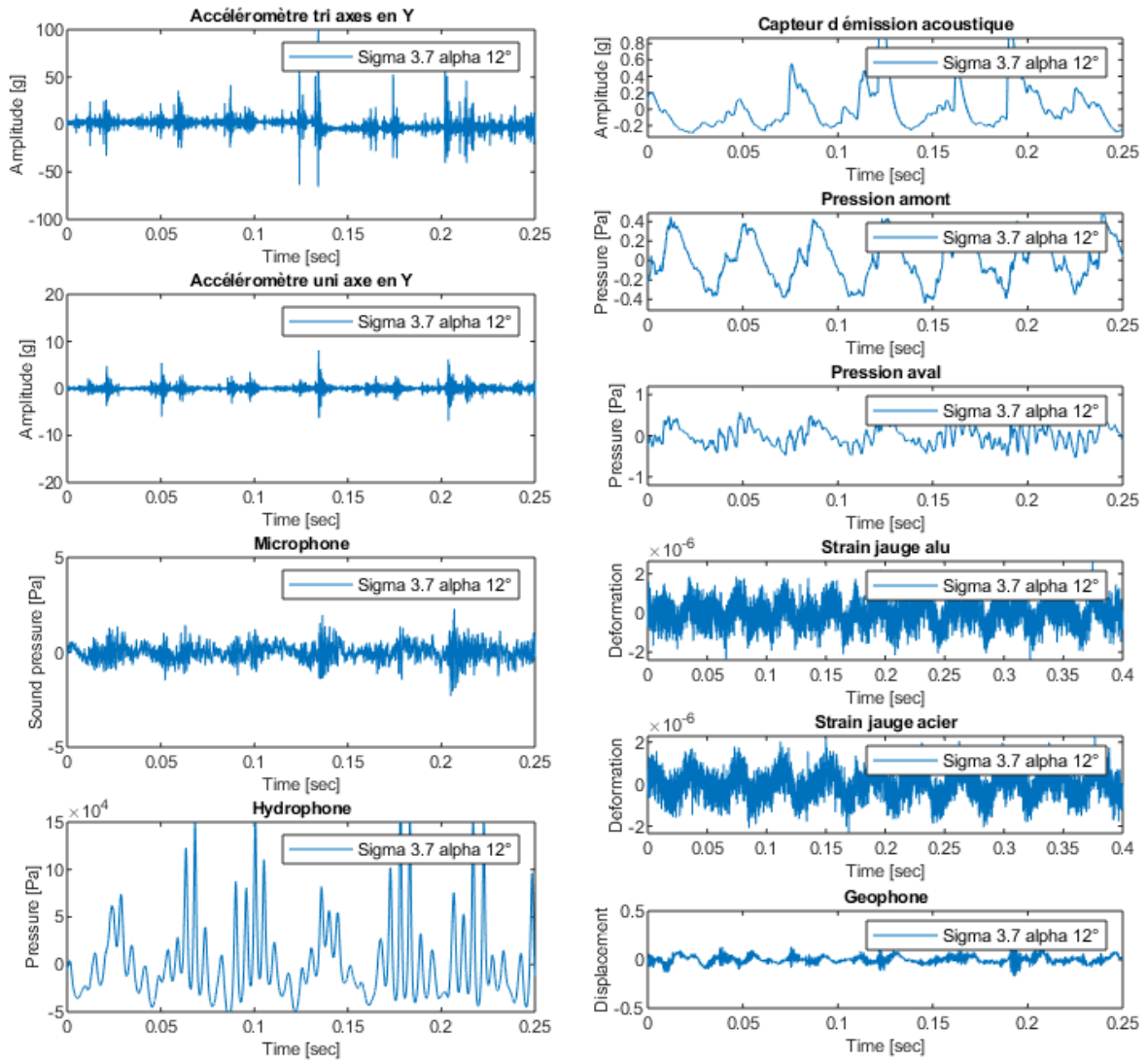


Figure 58 Signaux bruts pour un alpha de 12° et un sigma de 3.7.



Periodogrammes et FFT

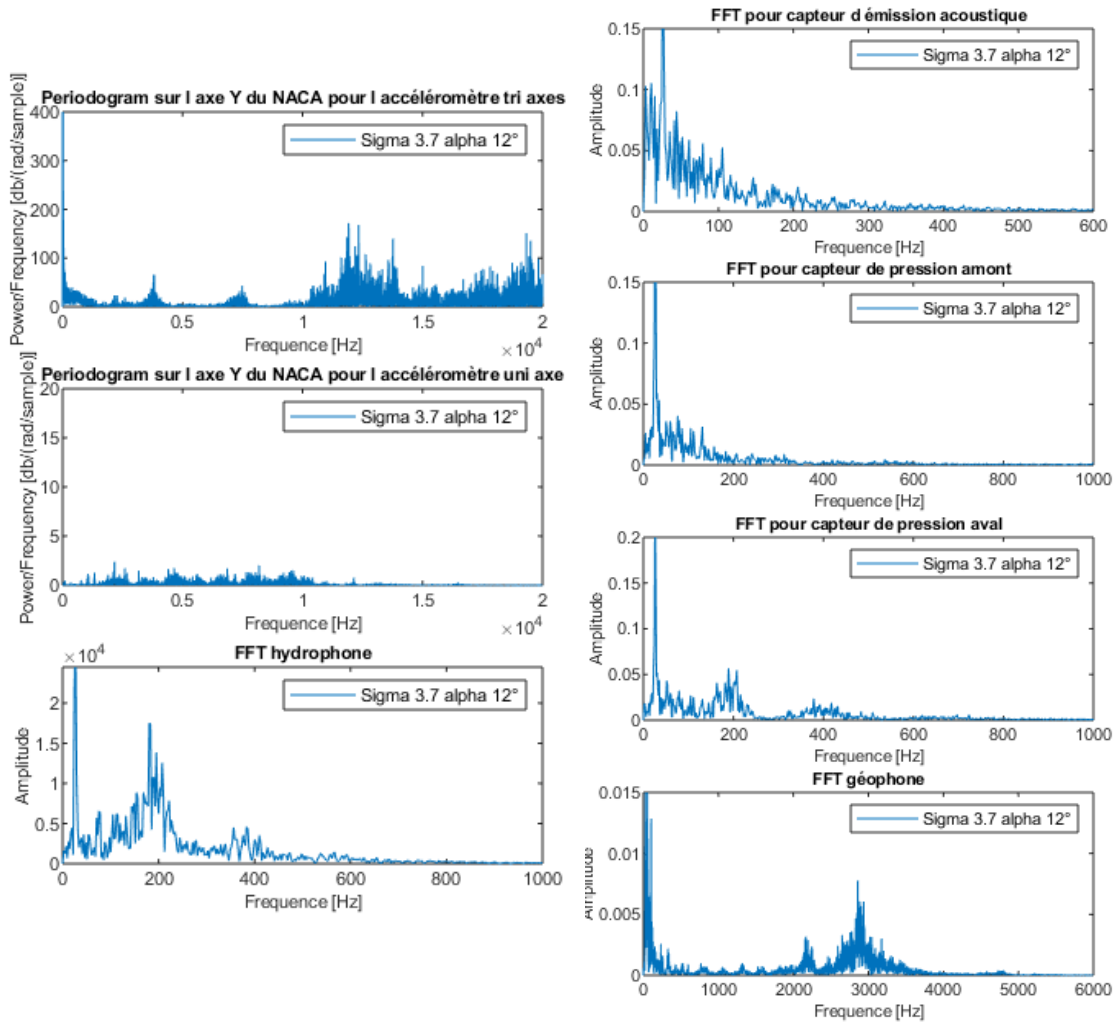


Figure 59 Periodogrammes et FFT pour un α de 12° et un σ de 3.7.



Spectrogrammes

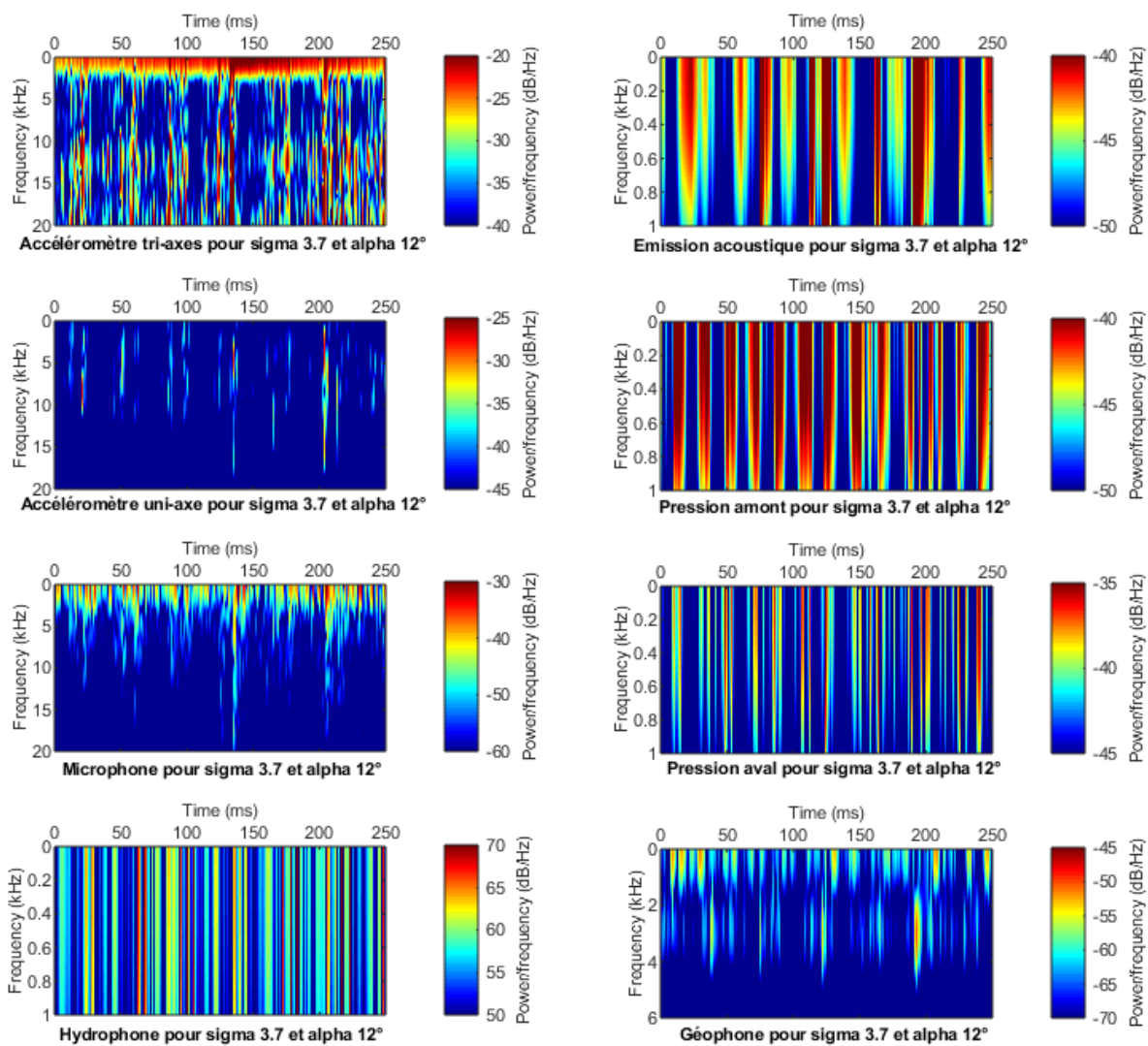


Figure 60 Spectrogrammes pour un alpha de 12° et un sigma de 3.7.



10.6 Annexe 6 – Résultats pour sigma 4.4, alpha 2°

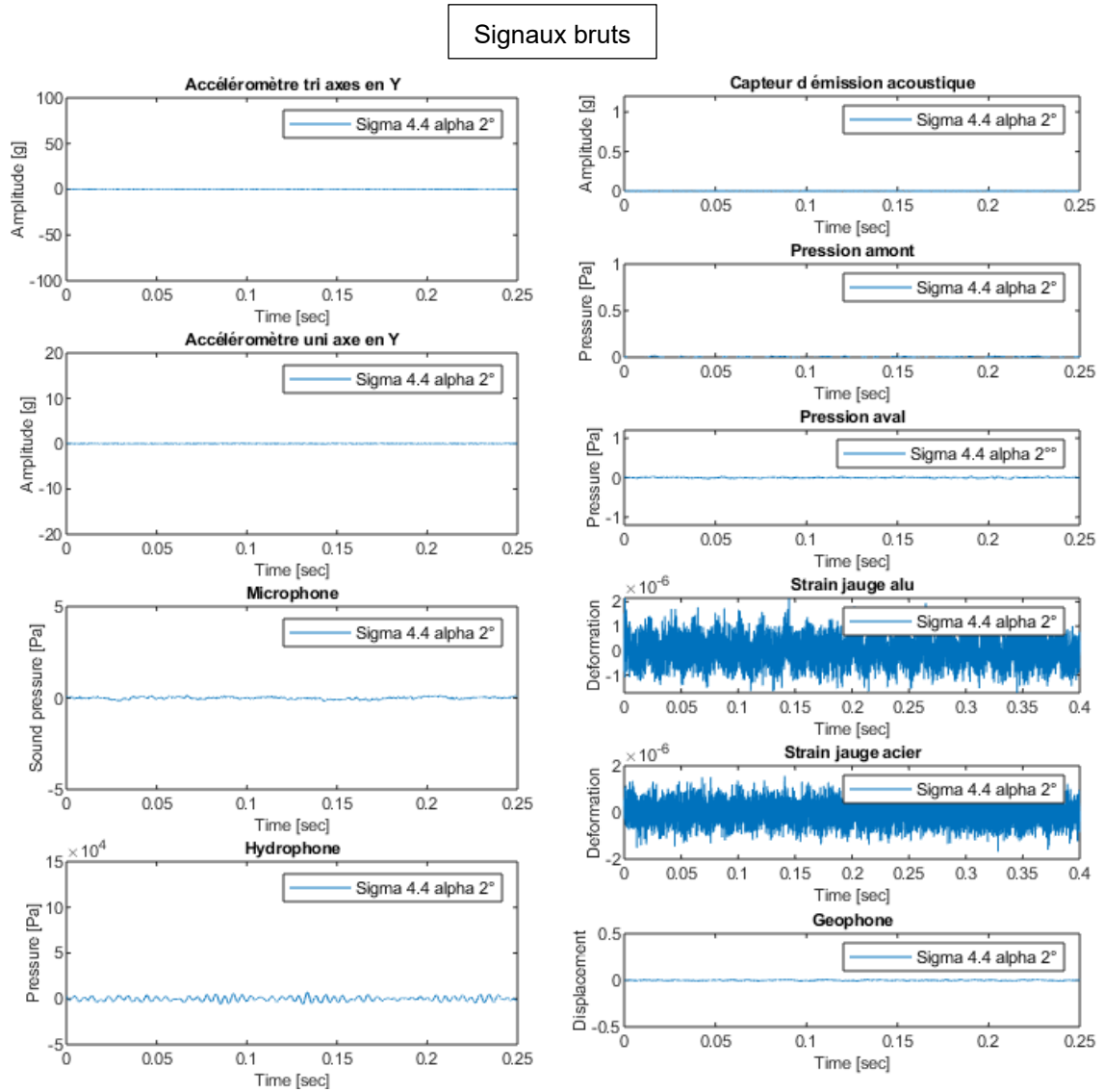


Figure 61 Signaux bruts pour un alpha de 2° et un sigma de 4.4.



Periodogrammes et FFT

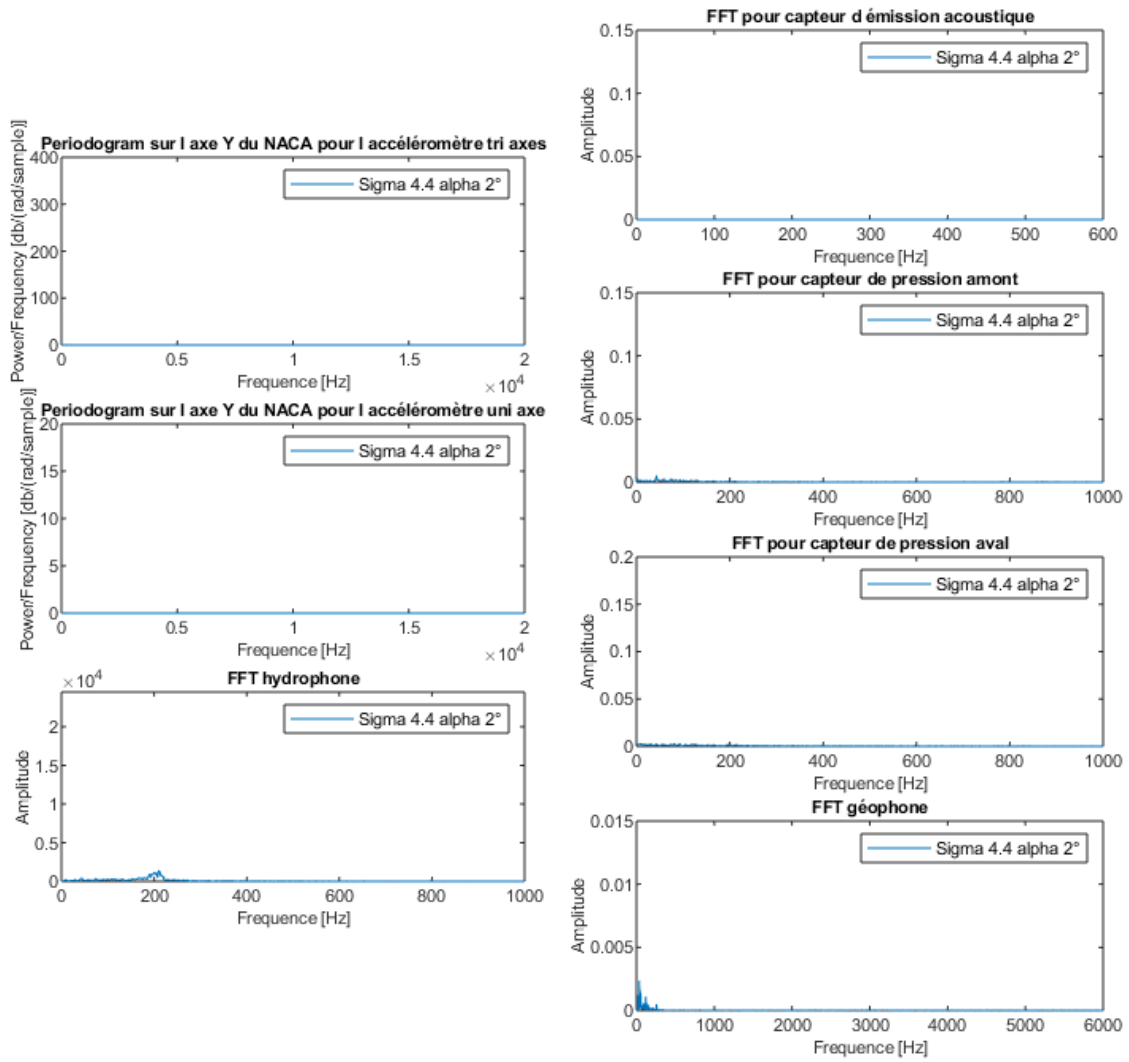


Figure 62 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 2° et un sigma de 4.4.



Spectrogrammes

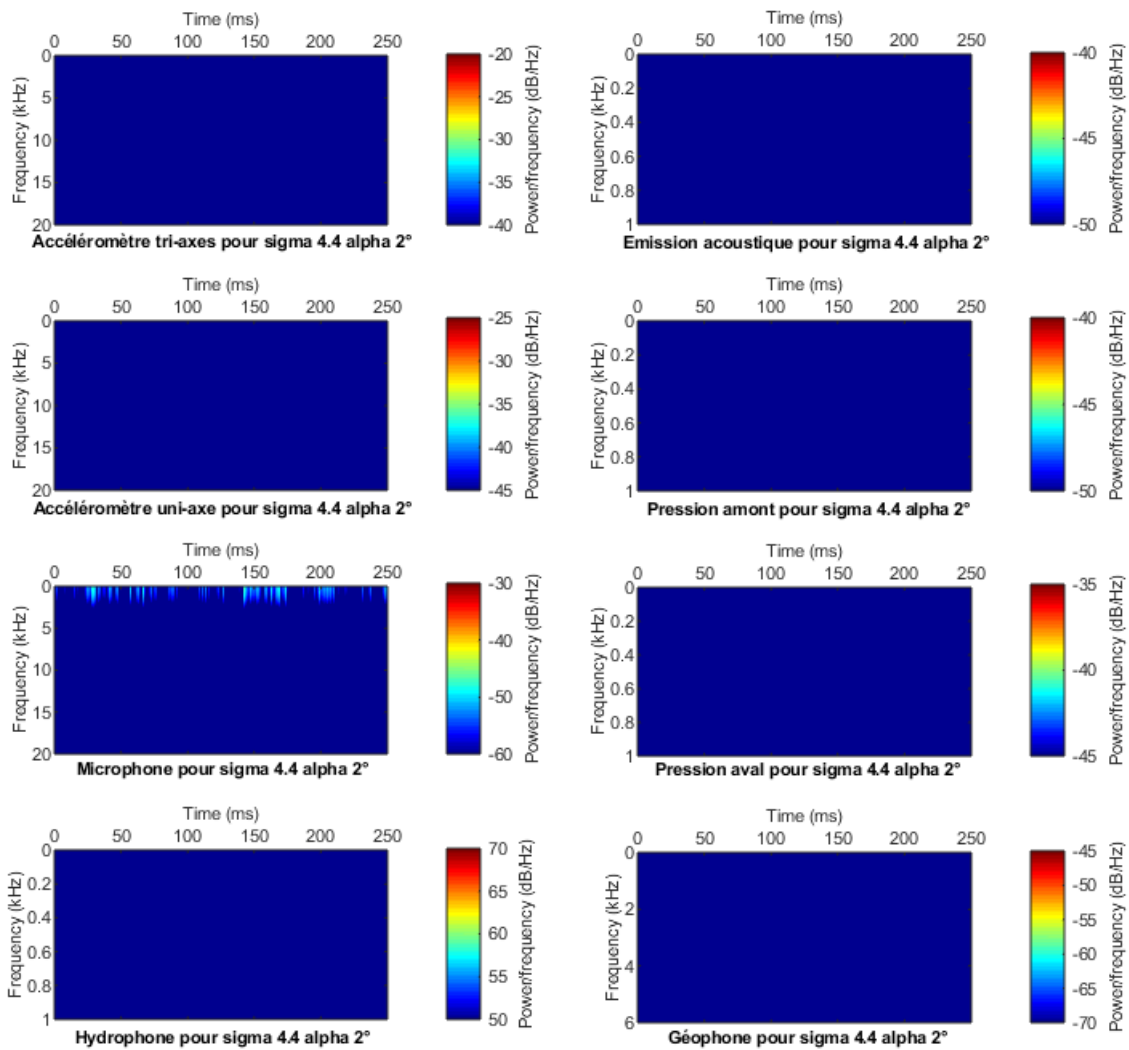


Figure 63 Spectrogrammes pour un alpha de 2° et un sigma de 4.4.



10.7 Annexe 7 – Résultats pour sigma 4.4, alpha 6°

Signaux bruts

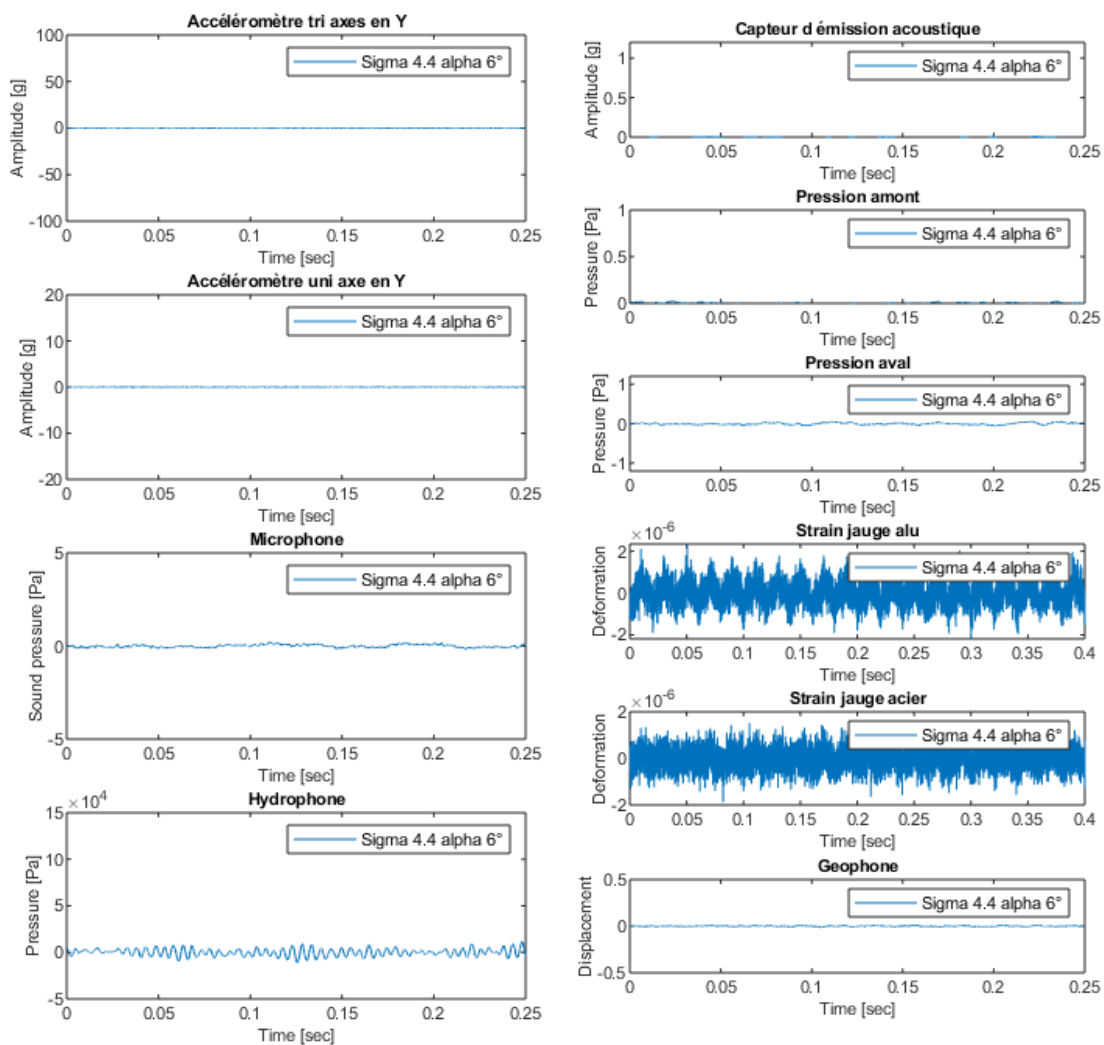


Figure 64 Signaux bruts pour un alpha de 6° et un sigma de 4.4.



Periodogrammes et FFT

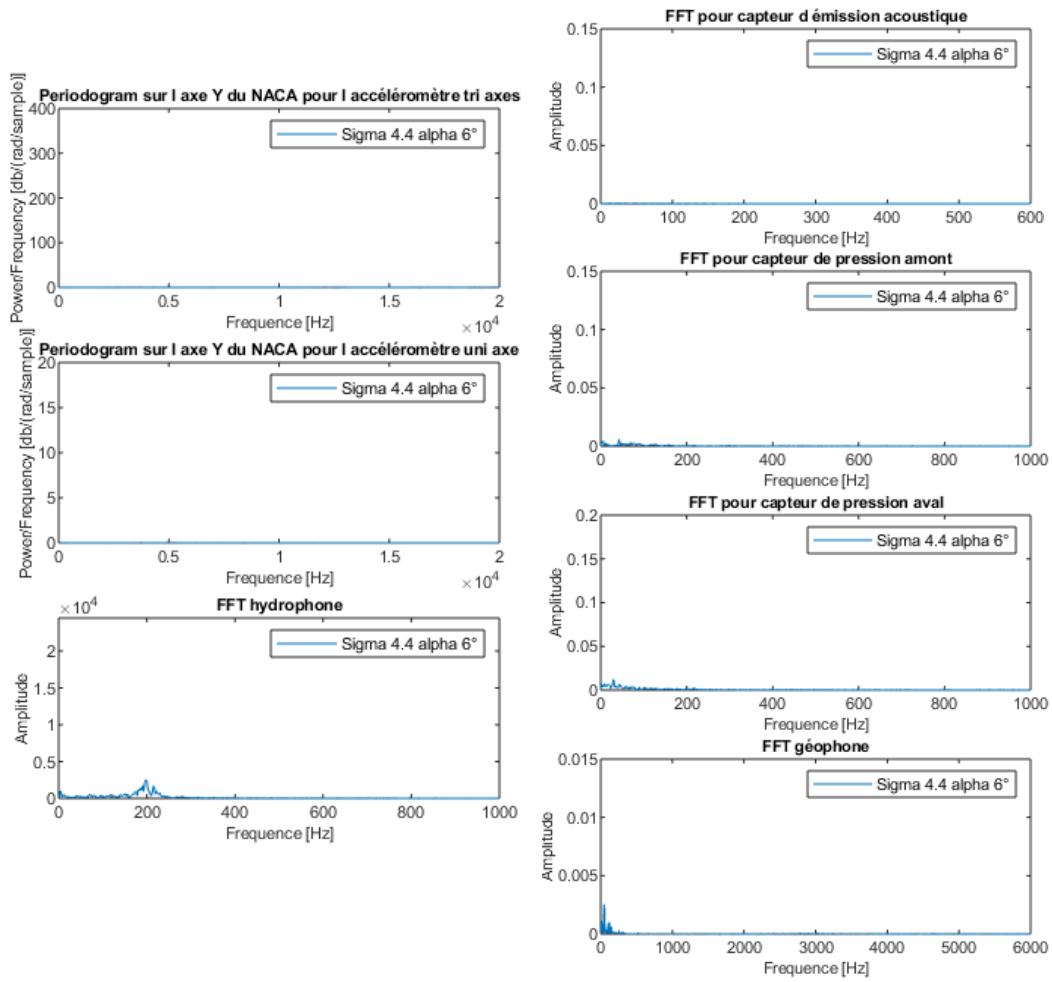


Figure 65 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 6° et un sigma de 4.4.



Spectrogrammes

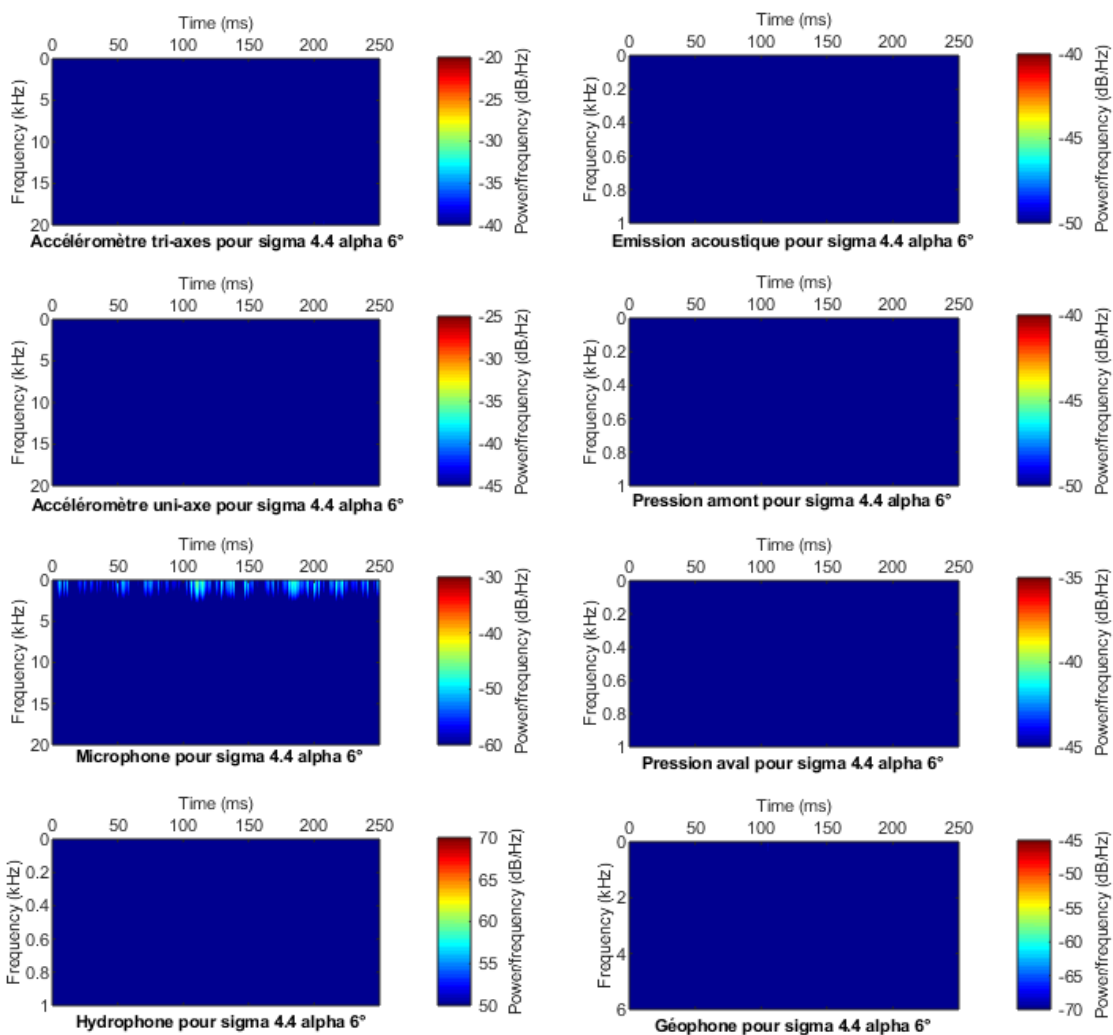


Figure 66 Spectrogrammes pour un alpha de 6° et un sigma de 4.4.



10.8 Annexe 8 – Résultats pour sigma 4.4, alpha 12°

Signaux bruts

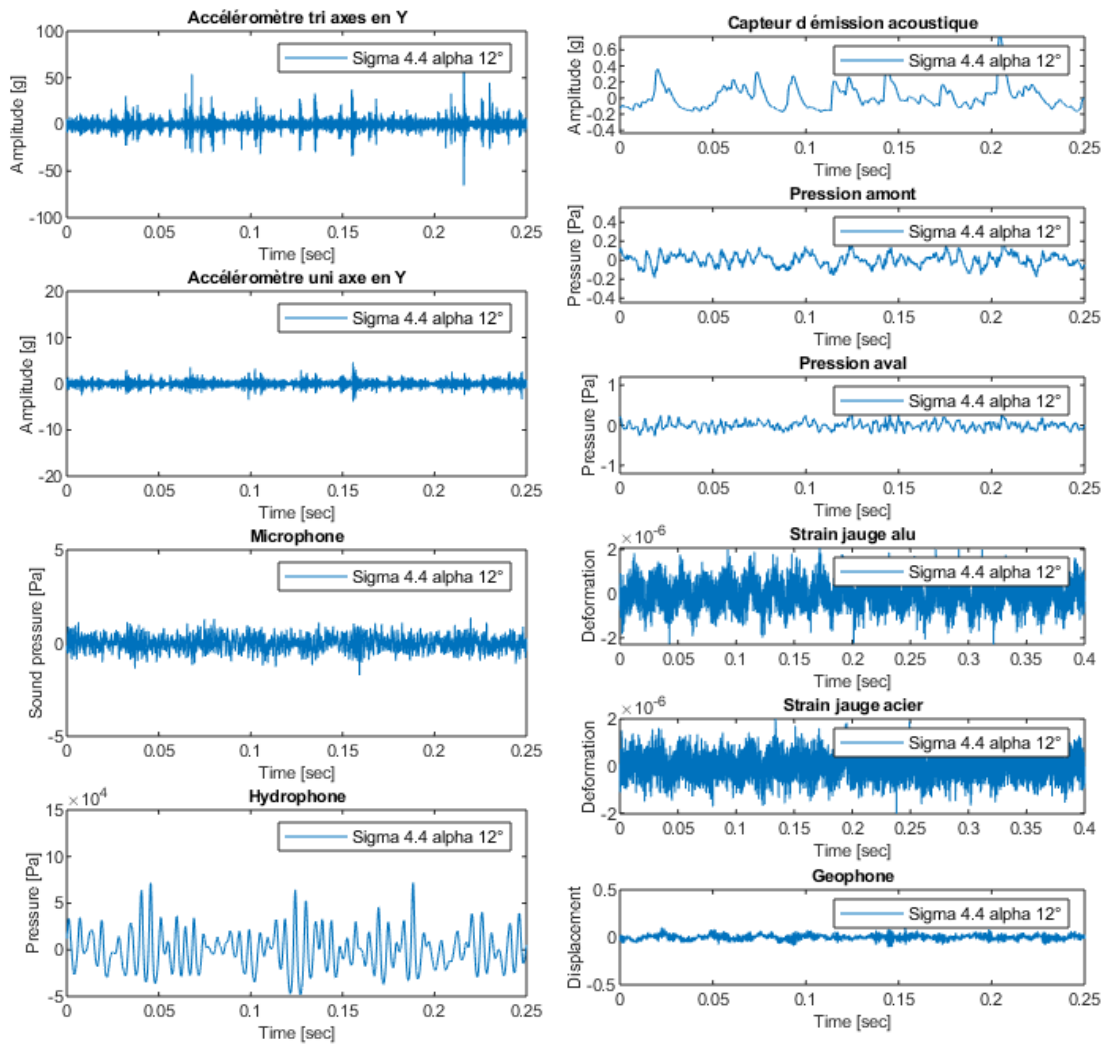


Figure 67 Signaux bruts pour un alpha de 12° et un sigma de 4.4.



Periodogrammes et FFT

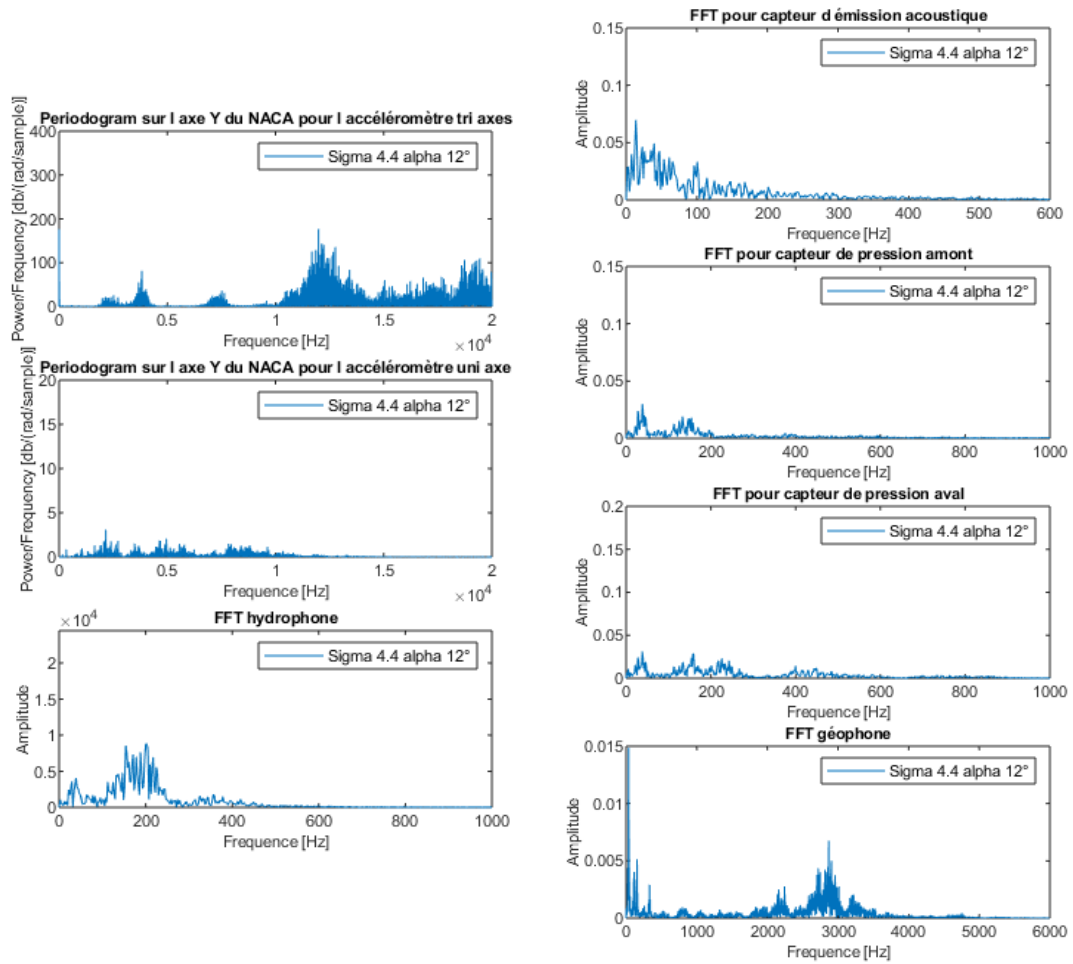


Figure 68 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 12° et un sigma de 4.4.



Spectrogrammes

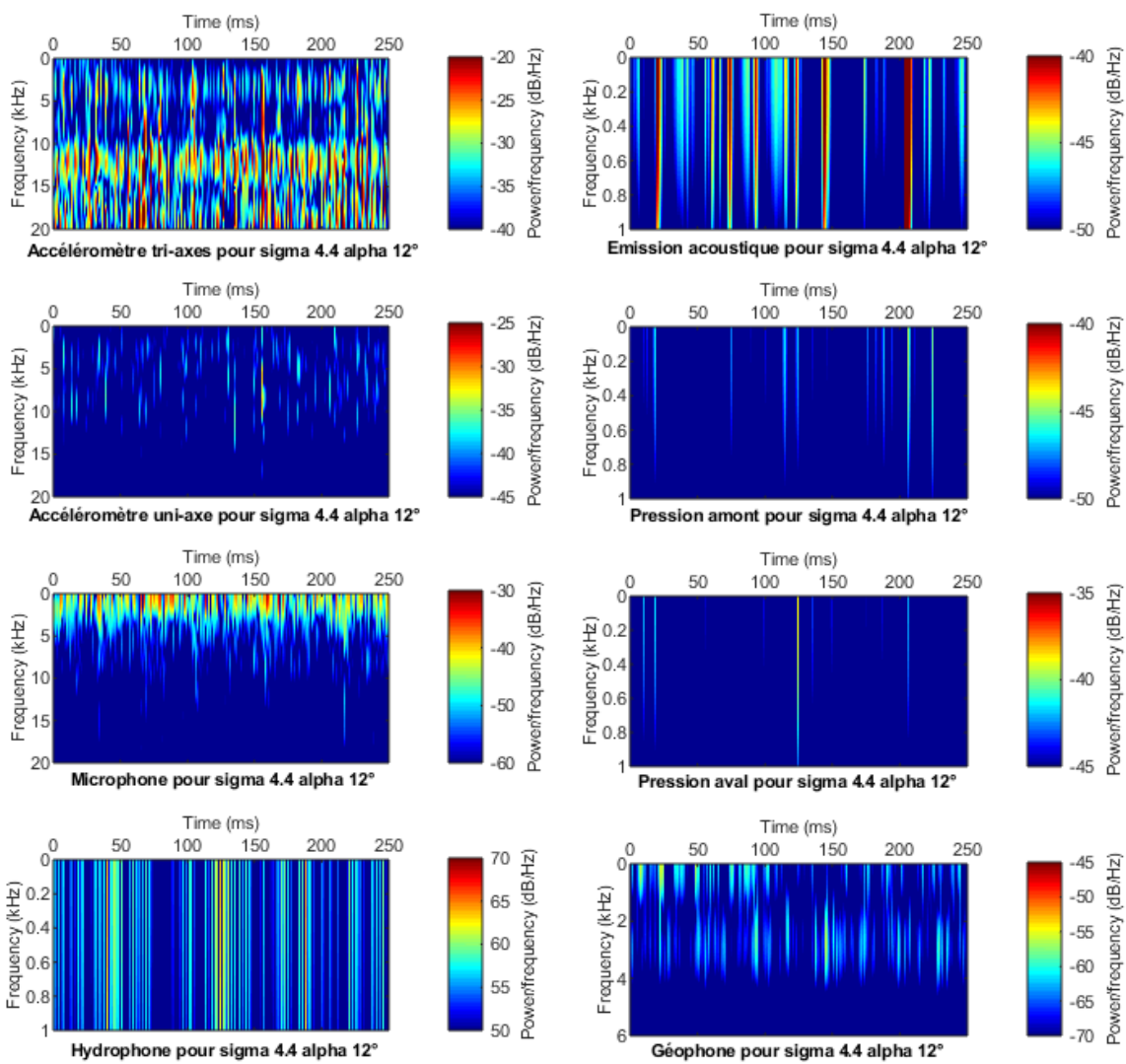


Figure 69 Spectrogrammes pour un alpha de 12° et un sigma de 4.4.



10.9 Annexe 9 – Résultats pour alpha 10°, sigma 2.9

Signaux bruts

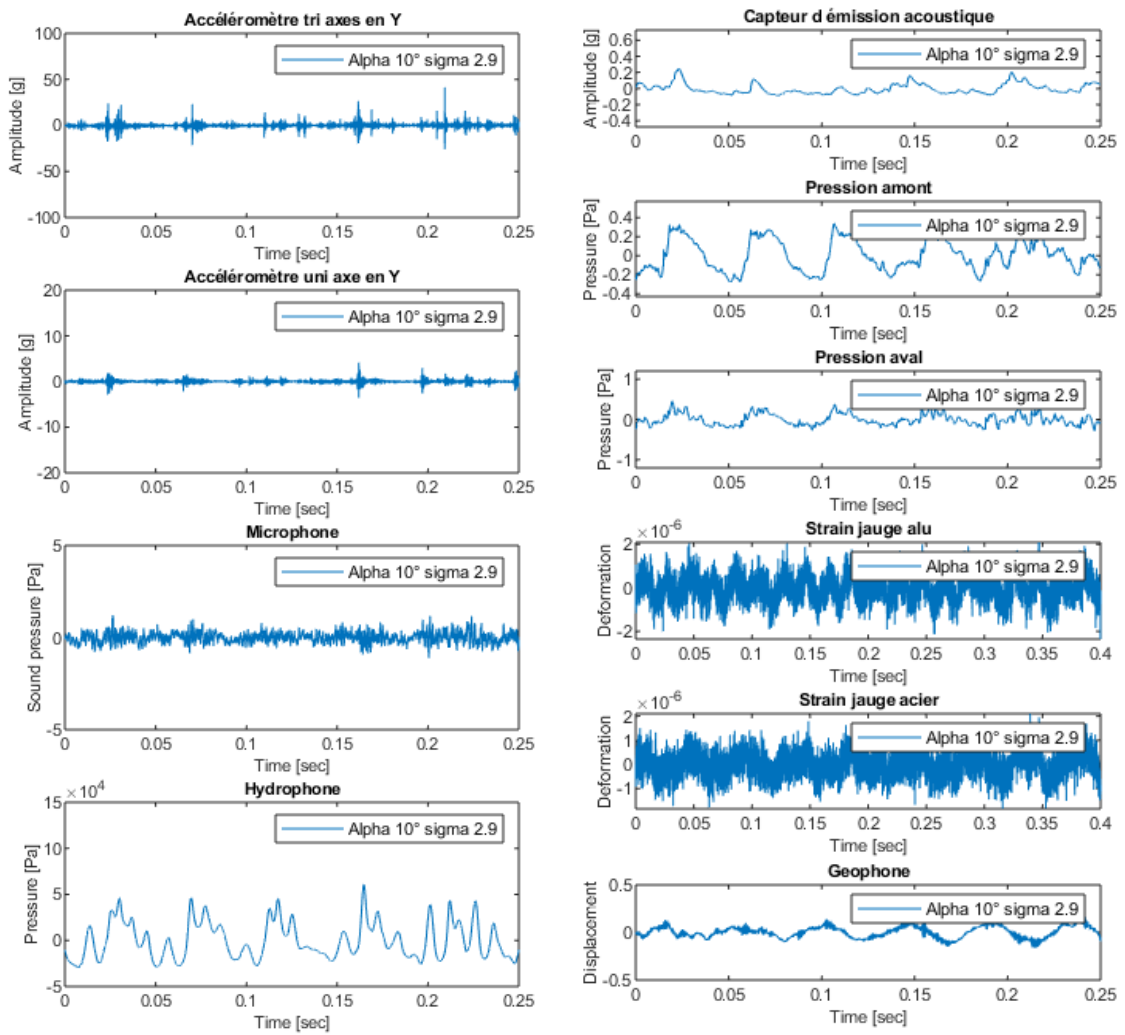


Figure 70 Signaux bruts pour un alpha de 10° et un sigma de 2.9.



Periodogrammes et FFT

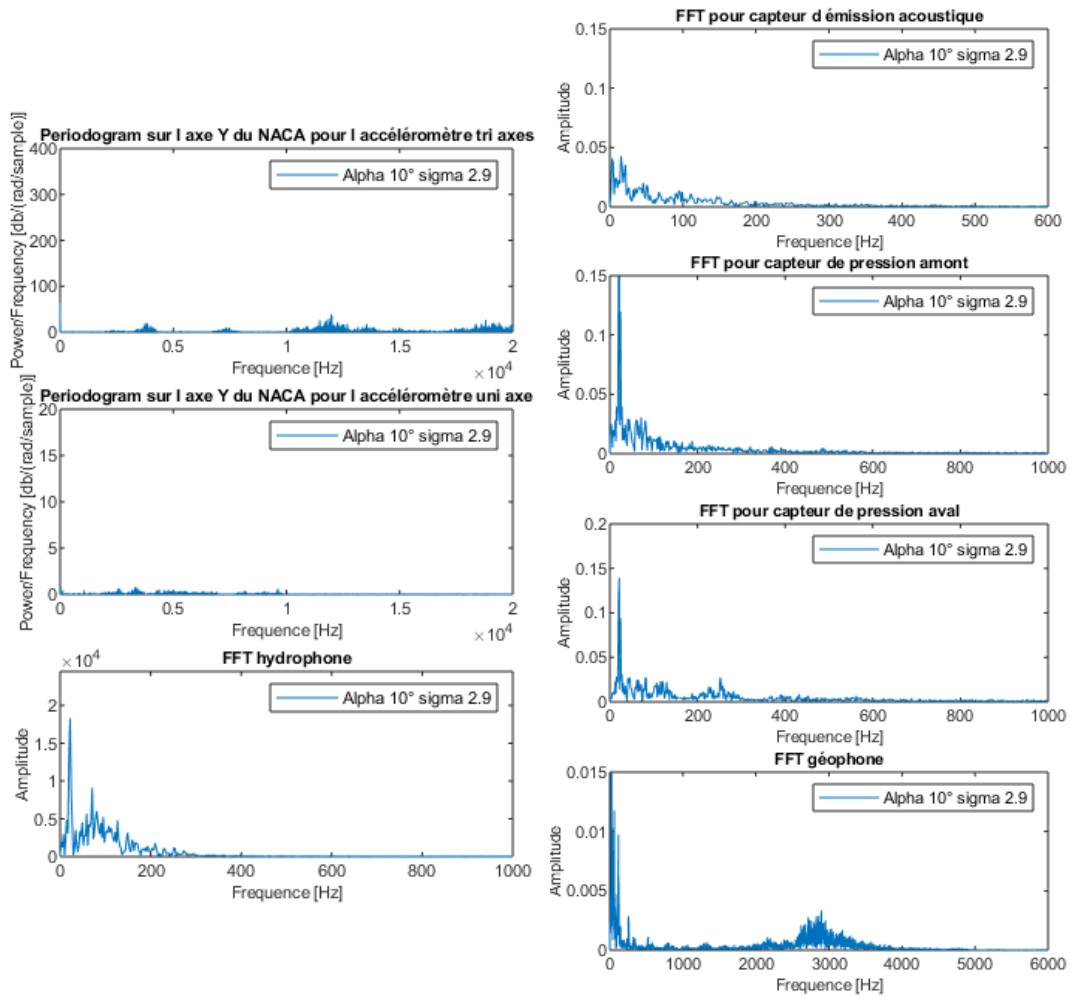


Figure 71 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 10° et un sigma de 2.9.



Spectrogrammes

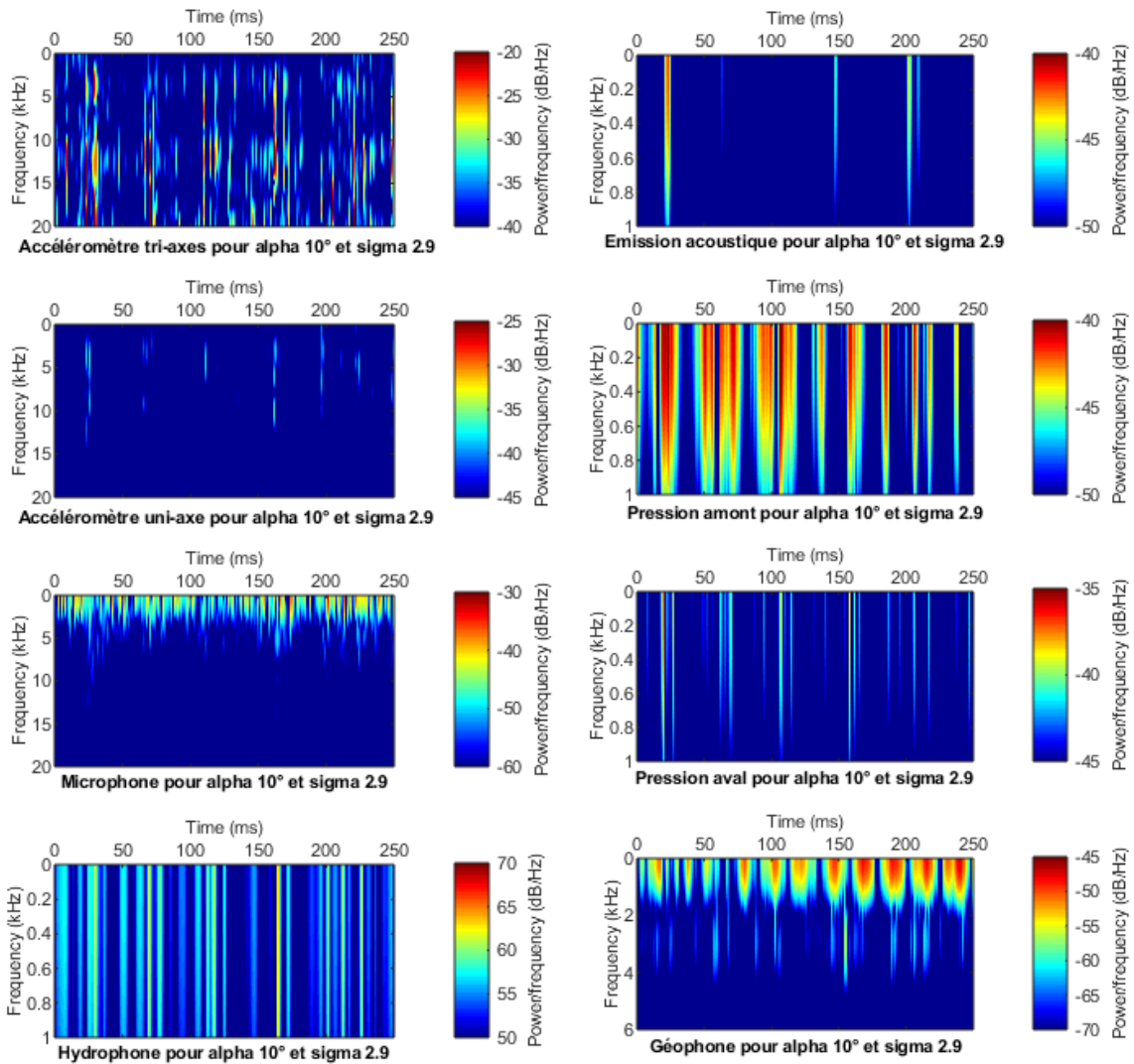


Figure 72 Spectrogrammes pour un alpha de 10° et un sigma de 2.9.



10.10 Annexe 10 – Résultats pour alpha 10°, sigma 7.2

Signaux bruts

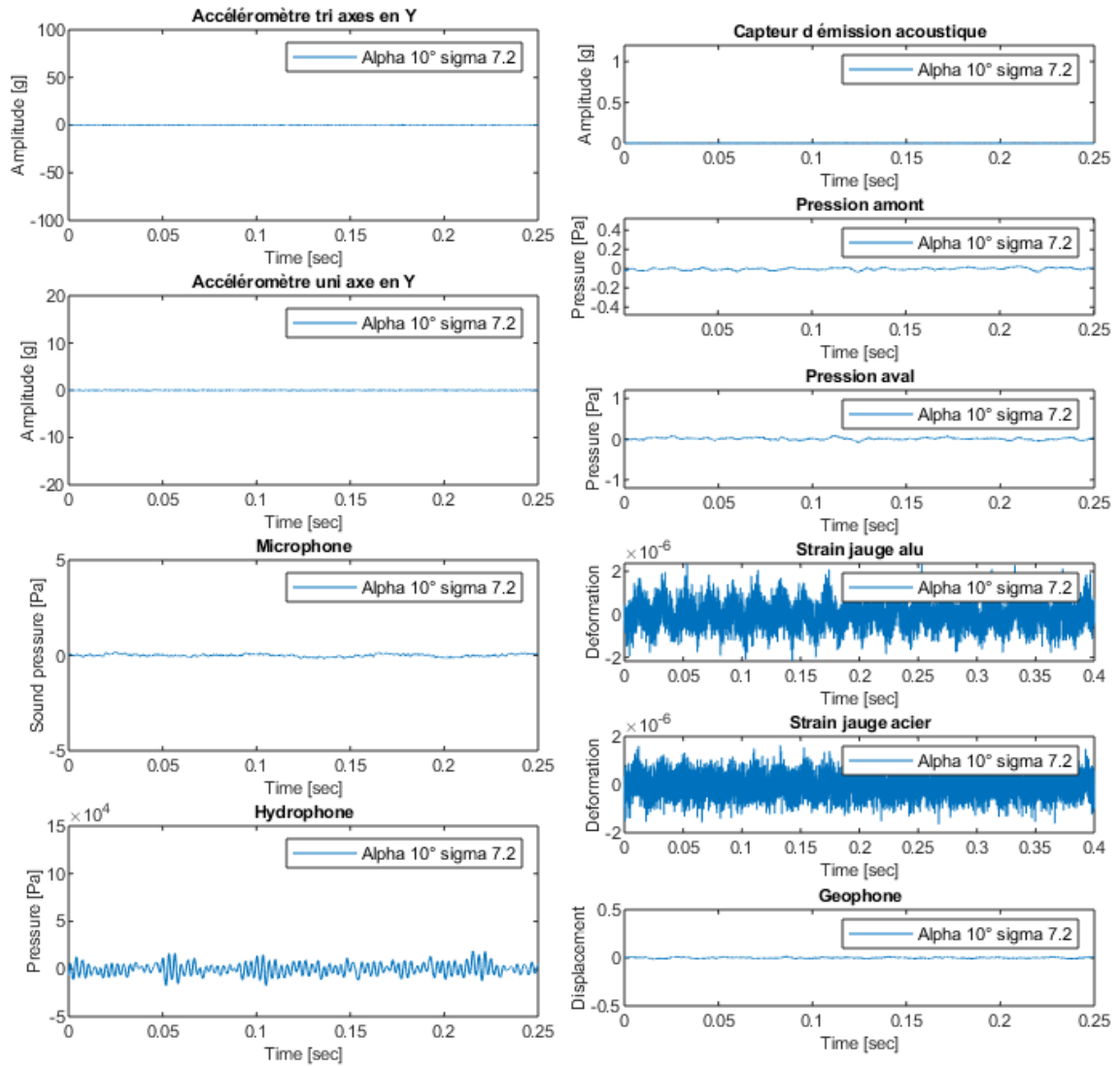


Figure 73 Signaux bruts pour un alpha de 10° et un sigma de 7.2.



Periodogrammes et FFT

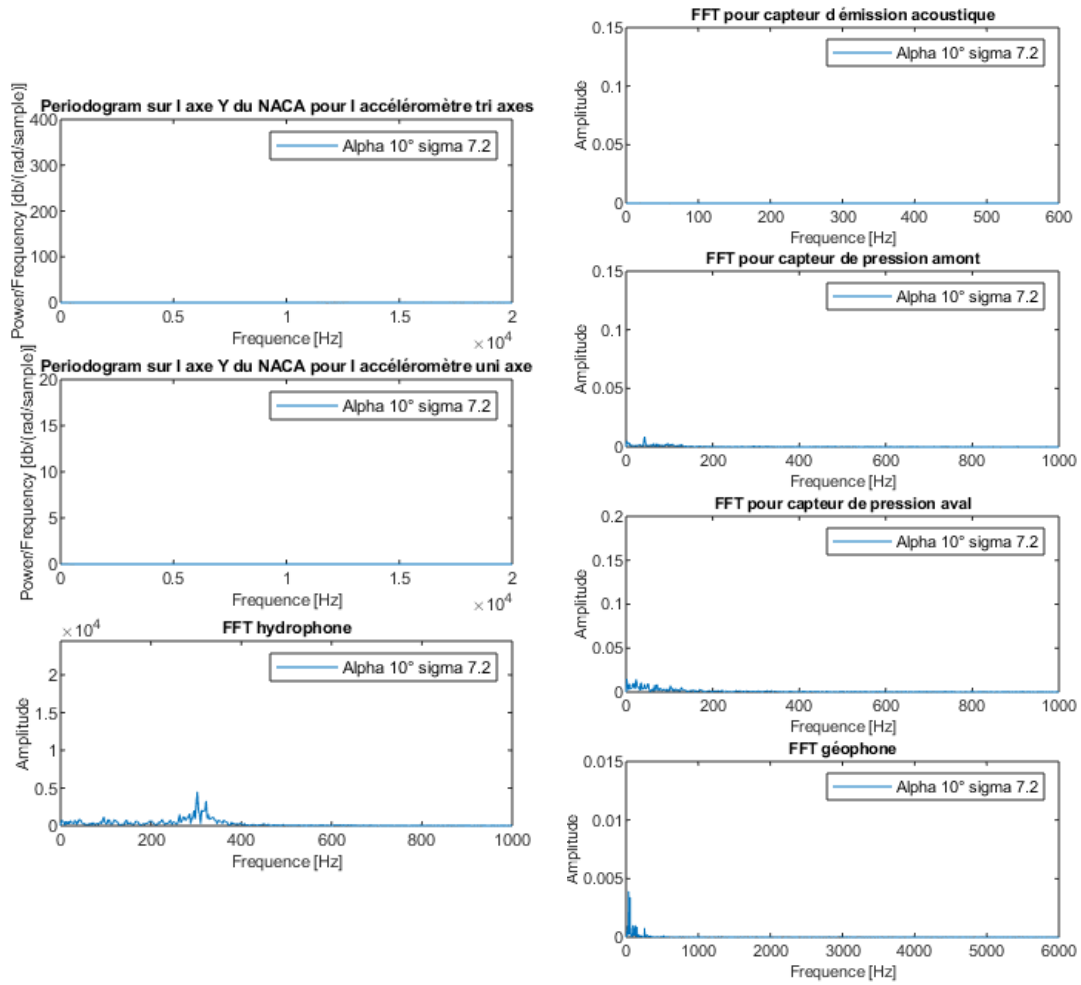


Figure 74 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 10° et un sigma de 7.2.



Spectrogrammes

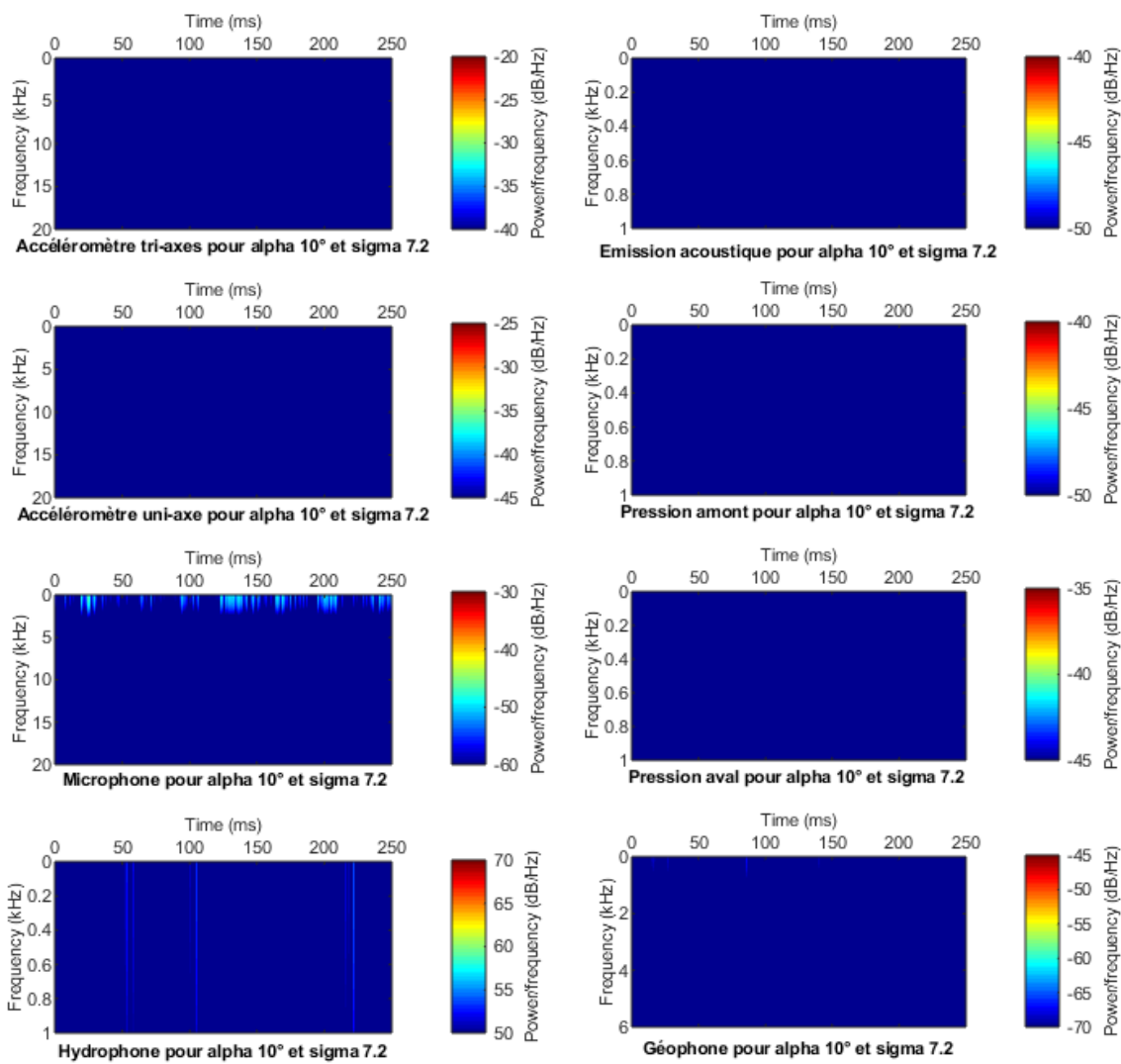


Figure 75 Spectrogrammes pour un alpha de 10° et un sigma de 7.2.



10.11 Annexe 11 – Résultats pour alpha 10°, sigma 11.6

Signaux bruts

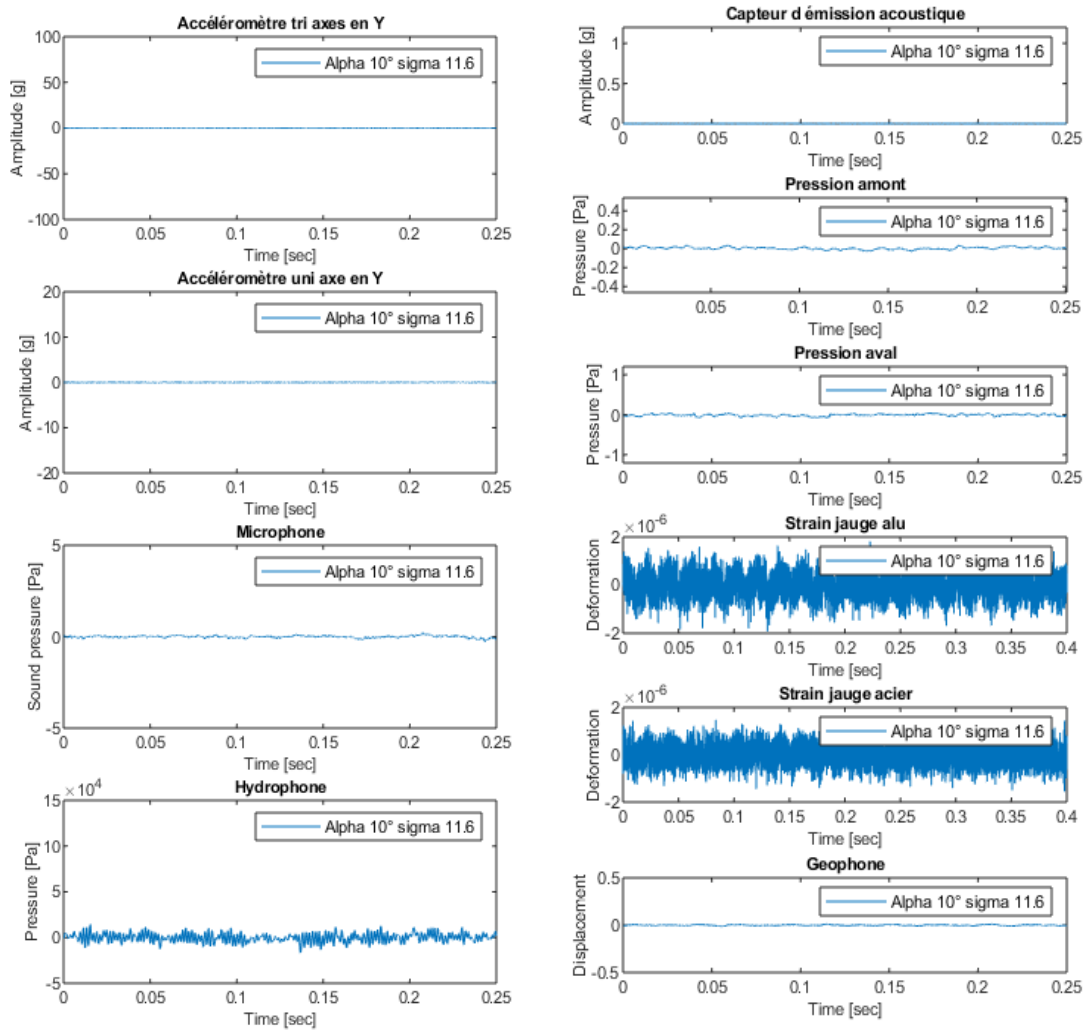


Figure 76 Signaux bruts pour un alpha de 10° et un sigma de 11.6.



Periodogrammes et FFT

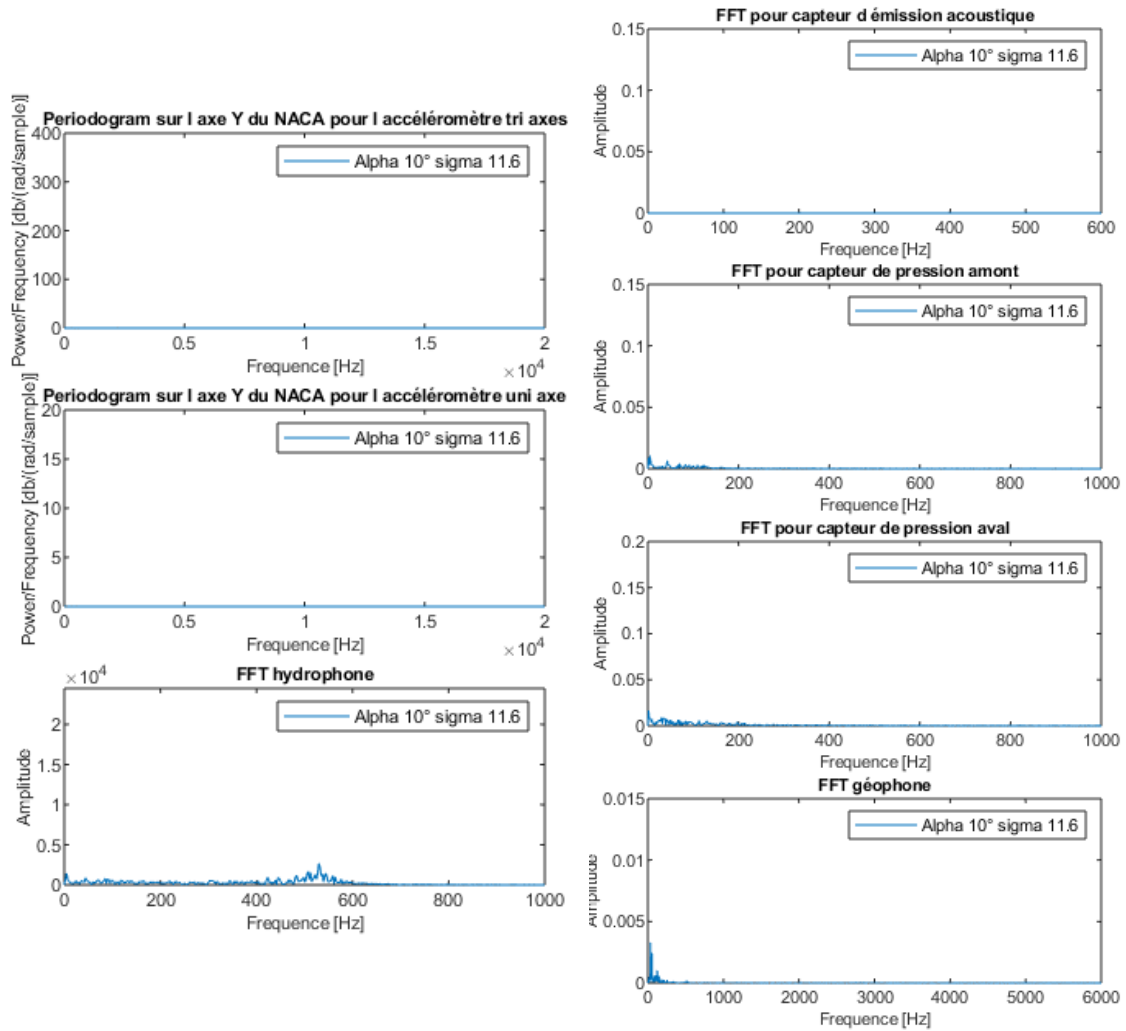


Figure 77 Periodogrammes et FFT pour un α de 10° et un σ de 11.6.



Spectrogrammes

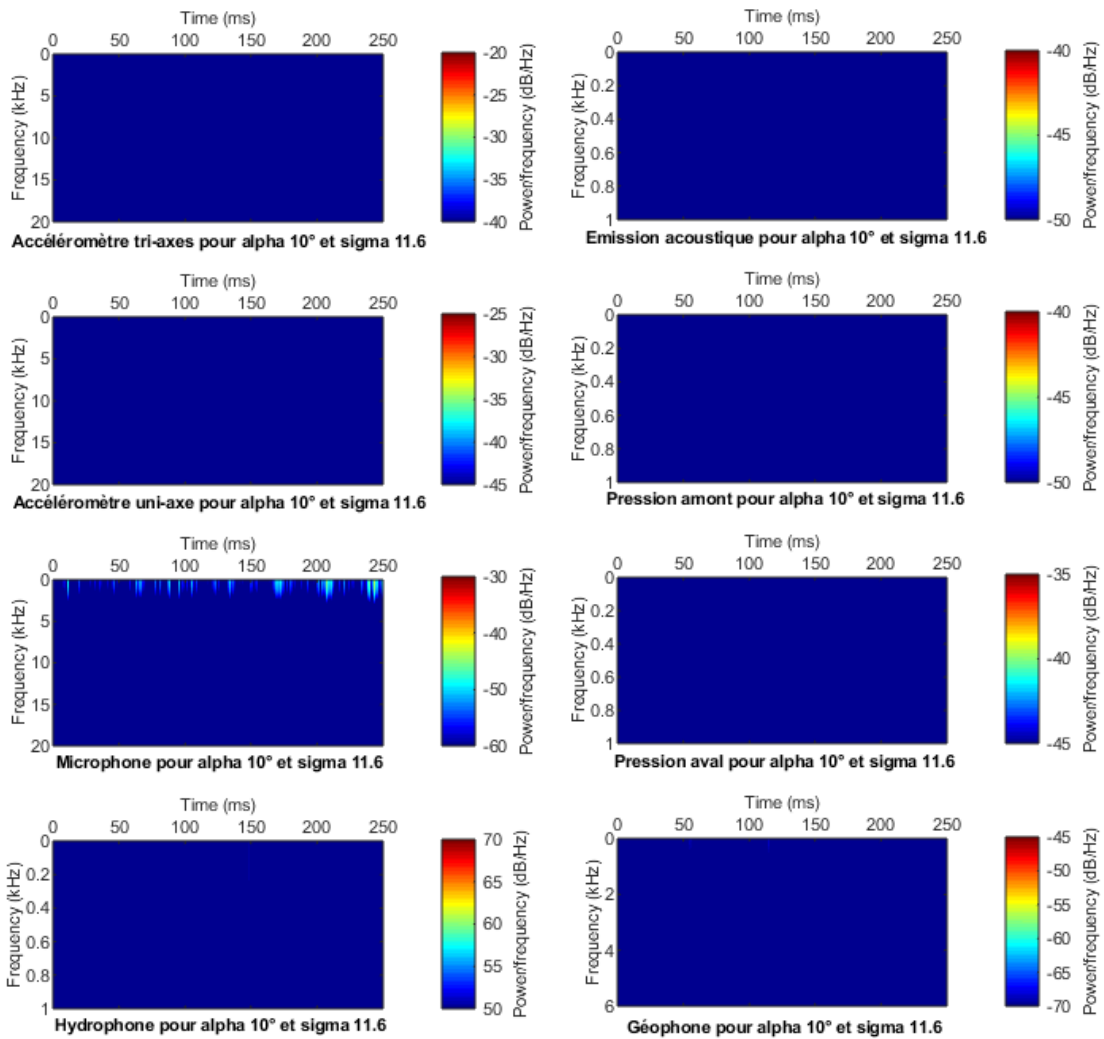


Figure 78 Spectrogrammes pour un α de 10° et un σ de 11.6 .



10.12 Annexe 12 – Résultats pour alpha 12°, sigma 2.9

Signaux bruts

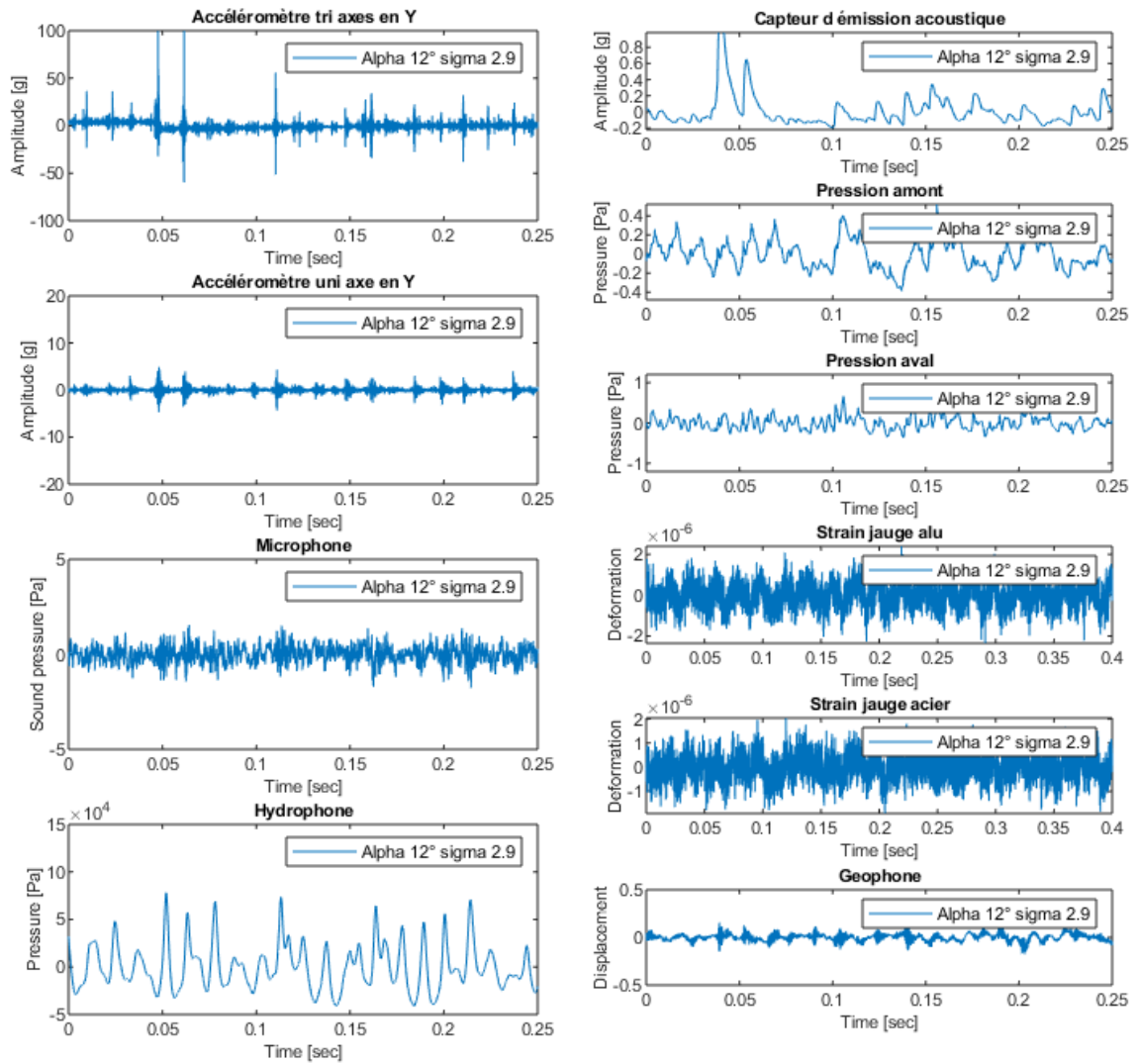


Figure 79 Signaux bruts pour un alpha de 12° et un sigma de 2.9.



Periodogrammes et FFT

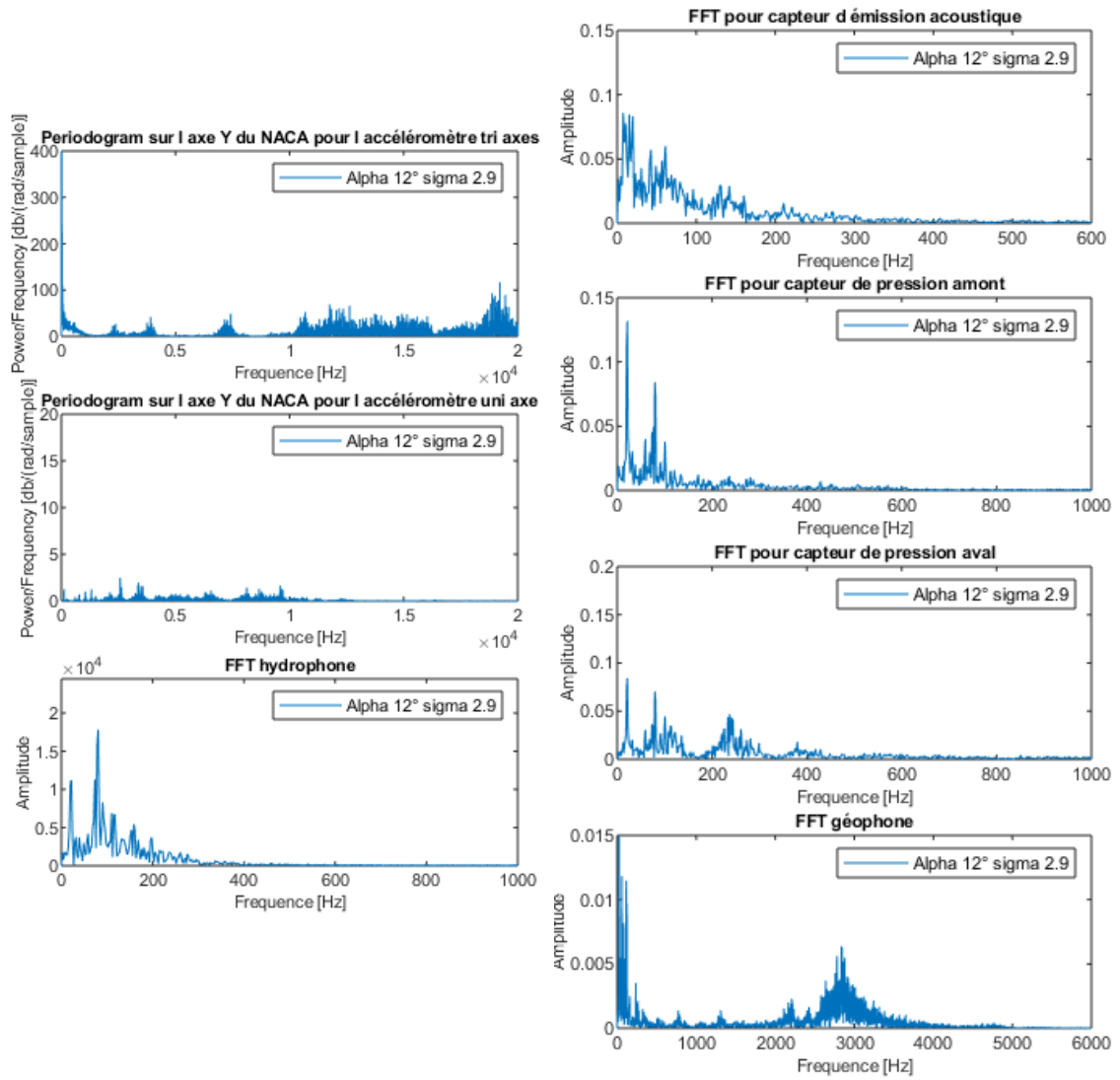
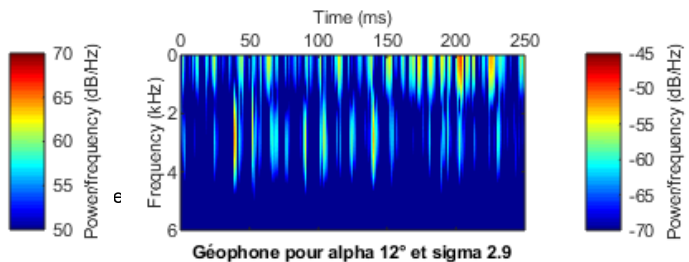
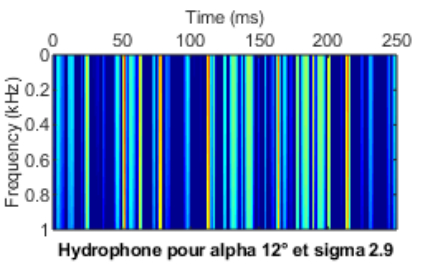
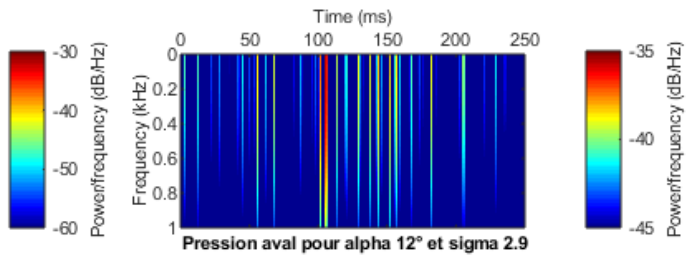
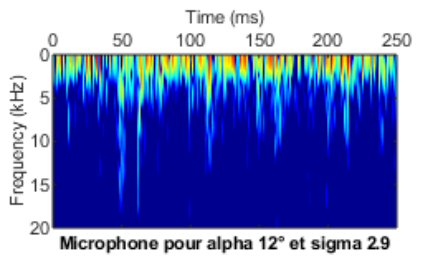
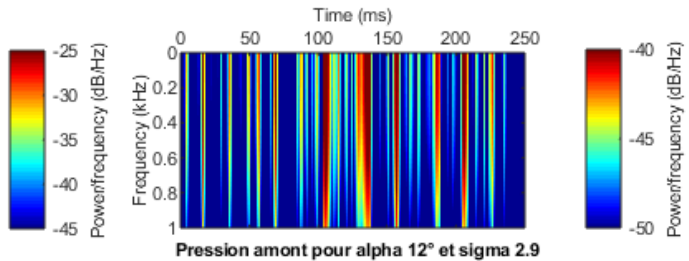
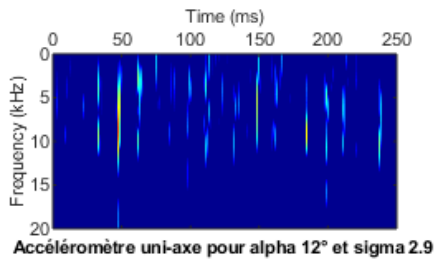
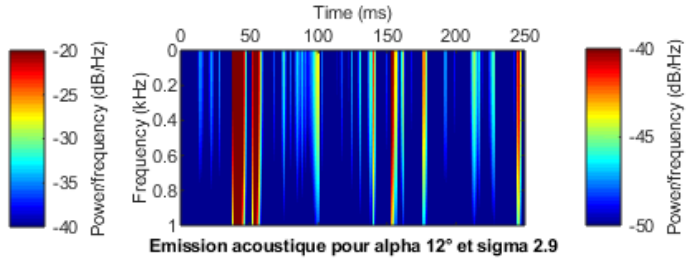
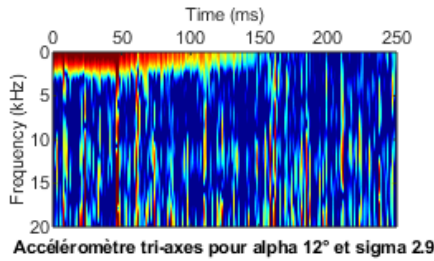


Figure 80 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 12° et un sigma de 2.9.



Spectrogrammes





10.13 Annexe 13 – Résultats pour alpha 12°, sigma 7.2

Signaux bruts

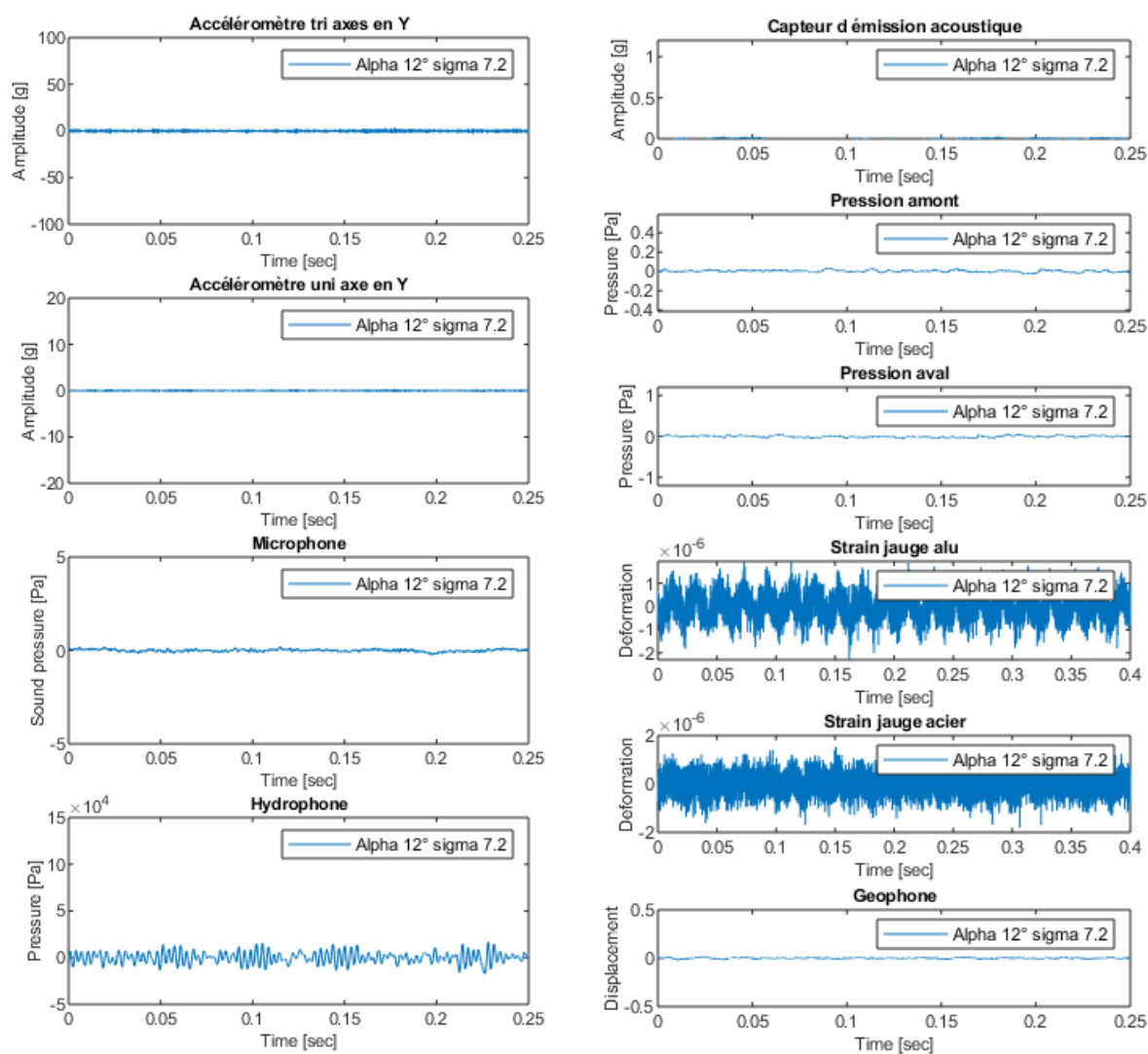


Figure 82 Signaux bruts pour un alpha de 12° et un sigma de 7.2.



Periodogrammes et FFT

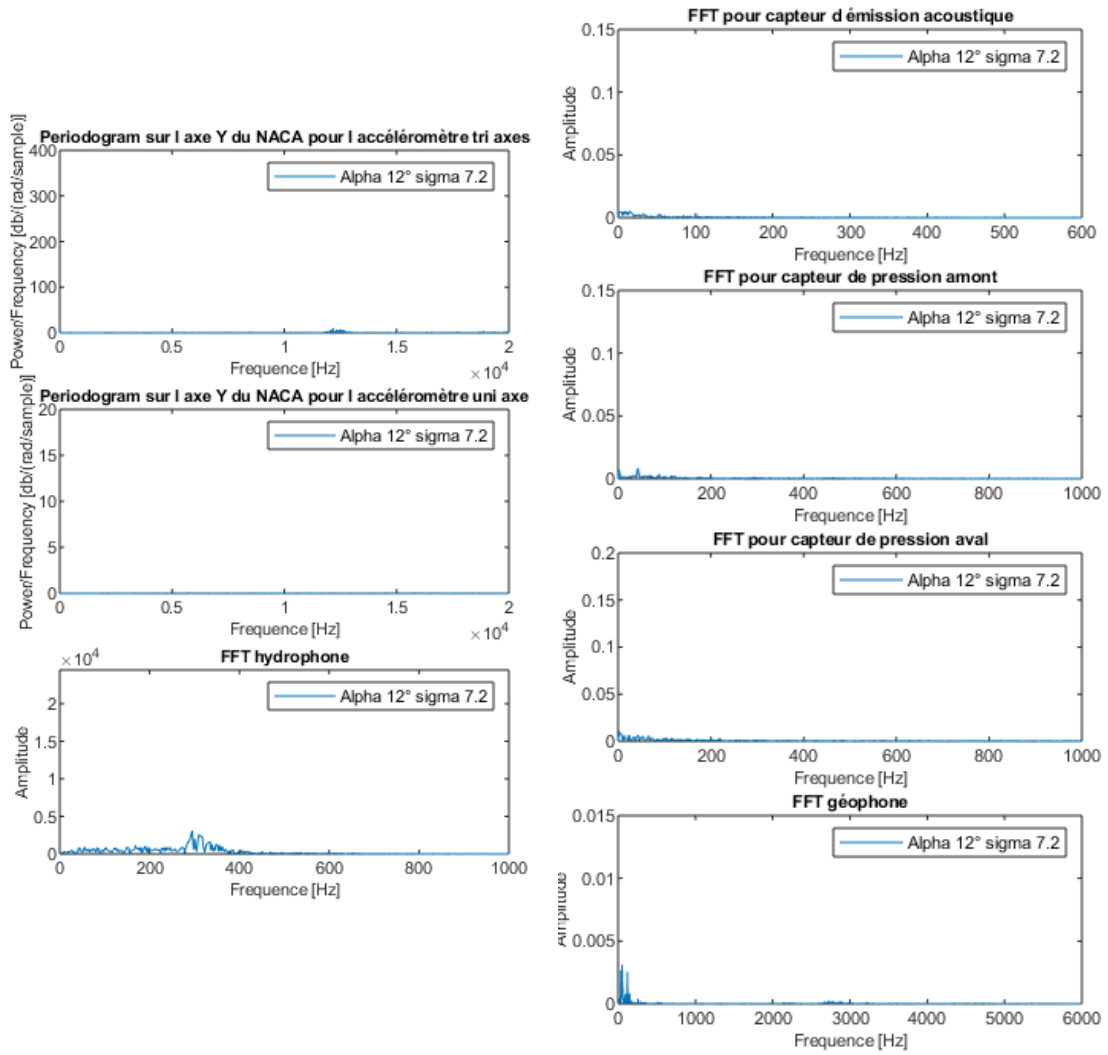


Figure 83 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 12° et un sigma de 7.2.



Spectrogrammes

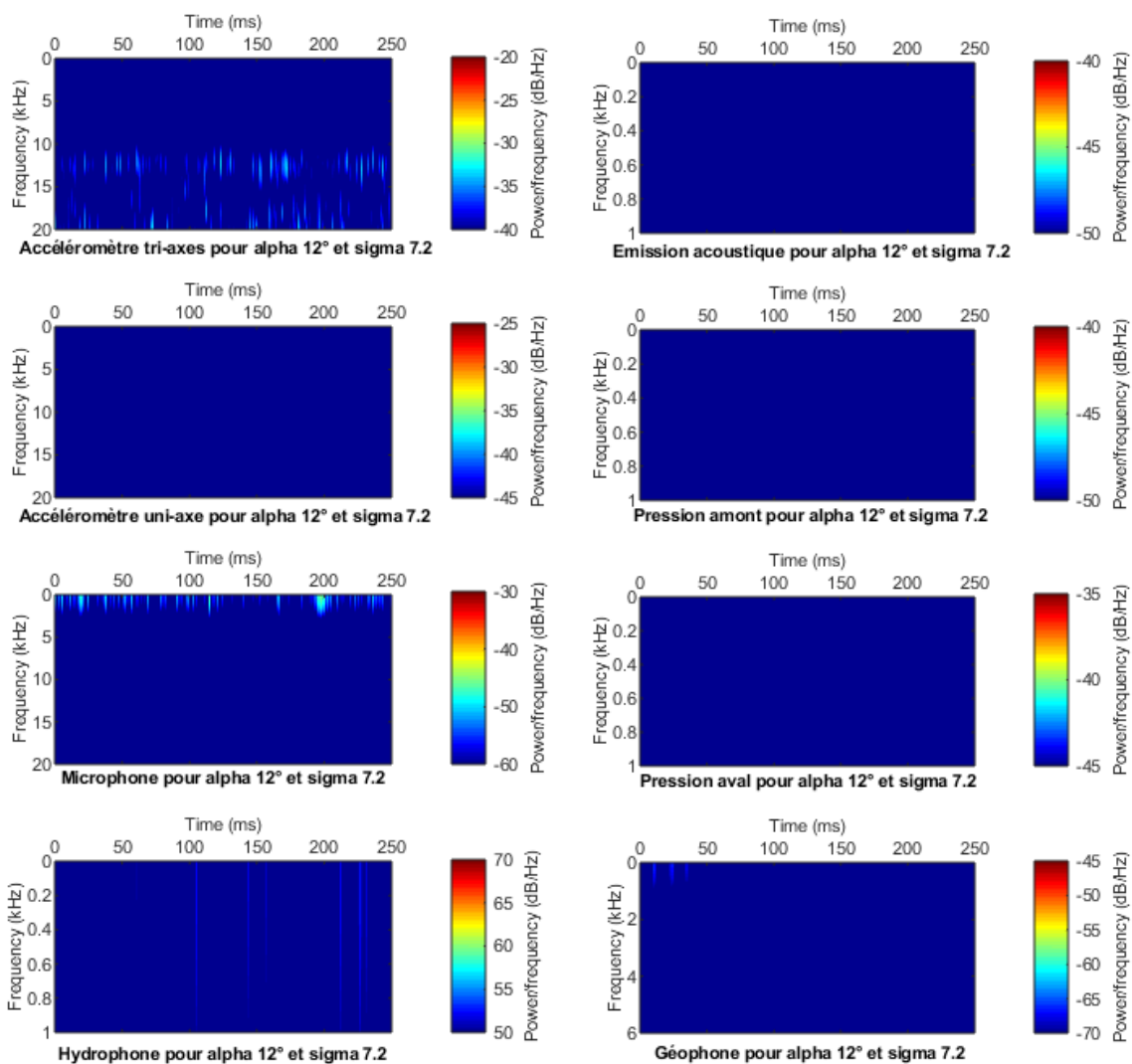


Figure 84 Spectrogrammes pour un alpha de 12° et un sigma de 7.2.



10.14 Annexe 14 – Résultats pour alpha 12°, sigma 11.6

Signaux bruts

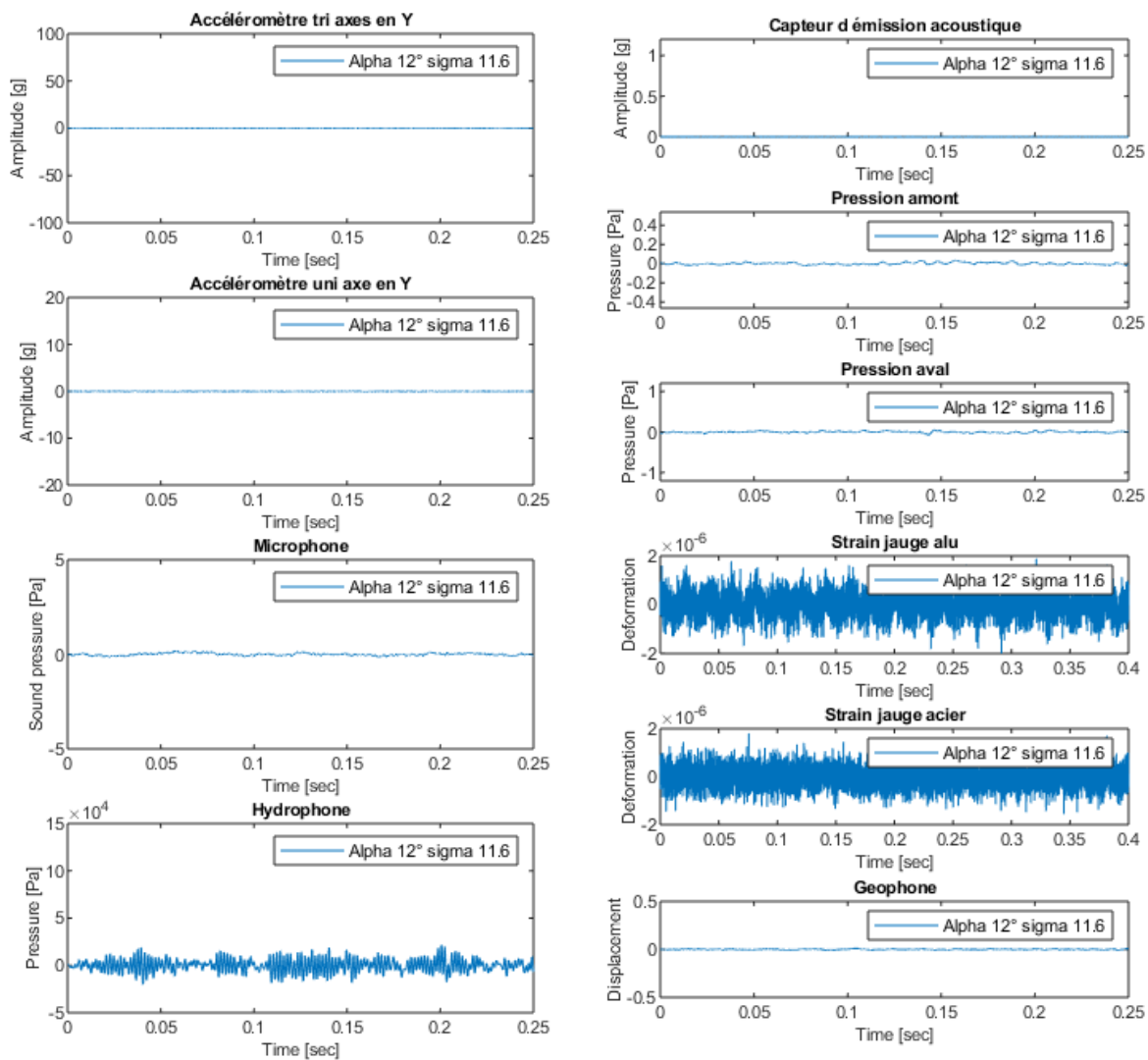


Figure 85 Signaux bruts pour un alpha de 12° et un sigma de 11.6.



Periodogrammes et FFT

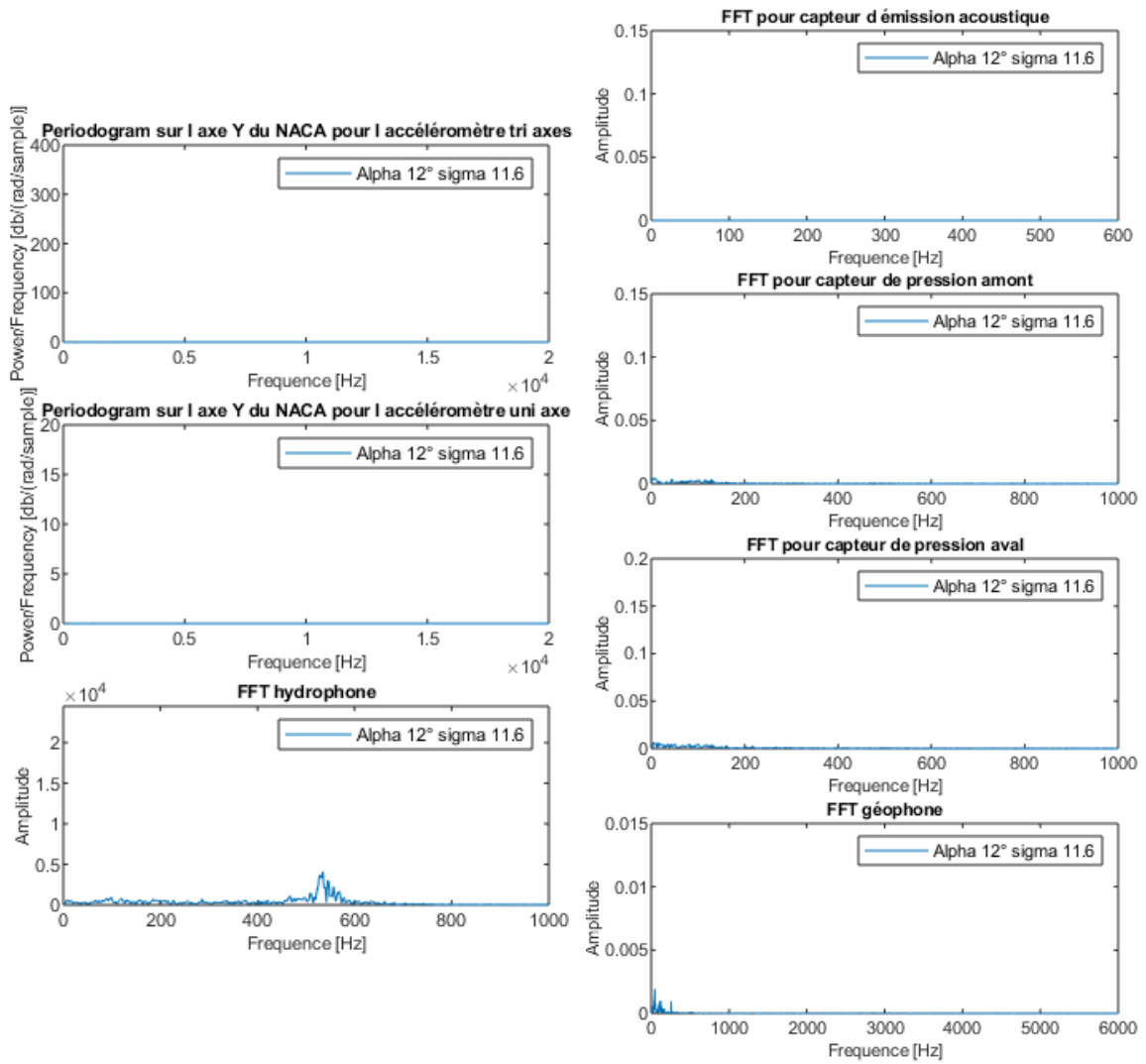


Figure 86 Periodogrammes et FFT pour un alpha de 12° et un sigma de 11.6.



Spectrogrammes

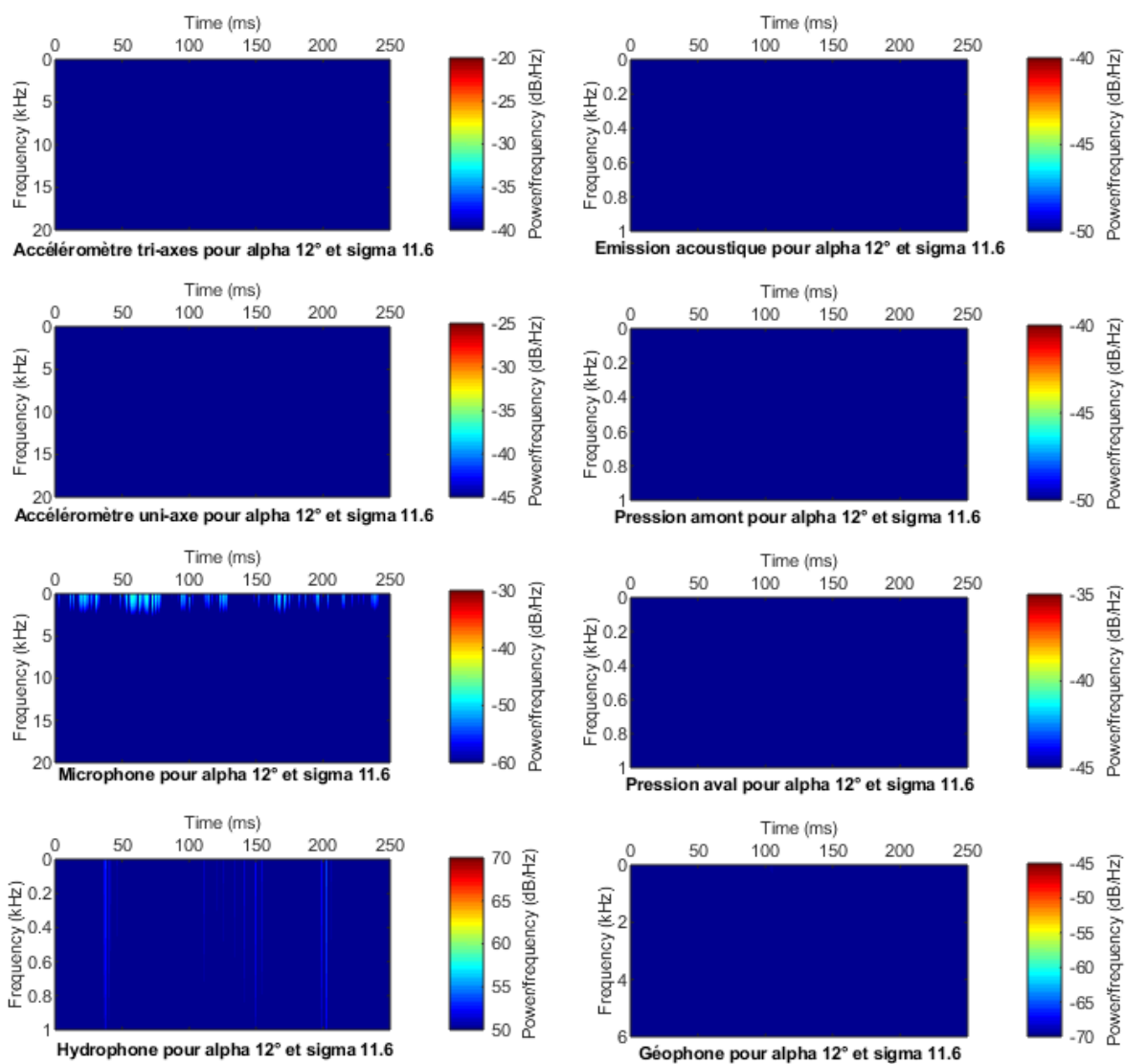


Figure 87 Spectrogrammes pour un alpha de 12° et un sigma de 11.6.