

Approche expérimentale

3.1 Motivation

Afin de permettre la validation du modèle numérique proposé, des essais ont été réalisés en tunnel hydrodynamique, concernant la réponse d'une structure à une excitation de couche limite turbulente. Dans ce chapitre, le dispositif expérimental est présenté, ainsi que des considérations sur la couche limite turbulente se développant au sein de ce dispositif. Les moyens mis en œuvre pour obtenir expérimentalement certains paramètres du dispositif sont également présentés.

Etant donné que les structures industrielles ne se limitent pas à des plaques planes, une étude est en outre réalisée quant à l'influence de certains types de défauts sur la réponse du dispositif expérimental.

3.2 Description du dispositif expérimental

Le dispositif expérimental utilisé est décrit dans ce paragraphe afin de définir le modèle numérique de ce dernier, dans le cadre de la réalisation d'une analyse modale par la méthode des éléments finis.

3.2.1 Tunnel de hydrodynamique

Le tunnel hydrodynamique utilisé dans le cadre de l'étude expérimentale (Fig. 3.1), est une boucle de recirculation destinée à alimenter une veine de section carrée située dans la partie supérieure de l'installation. Cette boucle est elle-même constituée de la pompe ① du résorbeur ② du conduit vertical ③ de la section amont ④ du convergent ⑤ de la veine ⑥ du pré-divergent ⑦ du divergent ⑧ enfin de la cuve aval ⑨.

La veine d'essais du dispositif a une section carrée de 192 mm de côté et une longueur de 1 m. Le dispositif testé dans le cadre de cette étude est installé au centre de cette veine d'essai (Fig. 3.2).

Afin de réguler l'écoulement au sein du tunnel hydrodynamique, trois modes de régulation sont disponibles : Pression-vitesse, Pression-sigma, Vitesse-sigma. Dans le cadre de l'étude réalisée, le choix d'une régulation en pression et en vitesse a été effectué, en effet les caractéristiques de la couche limite turbulente se développant sur le dispositif expérimental sont liées à la vitesse de l'écoulement autour de ce dernier. La pression au sein de l'écoulement a quant à elle été fixée à la pression atmosphérique, ($\sim 1013hPa$) pour les différents cas de vitesse étudiés, les phénomènes de cavitation ne faisant pas partie du spectre de l'étude.

La plage de vitesse disponible au sein du dispositif est comprise entre 3 et 15m/s avec une précision d'environ 1%. Trois différentes vitesses d'écoulement ont été réalisées au sein de cette plage, dans le cadre de différentes campagnes expérimentales, 5, 8 et 10m/s.

3.2.2 Dispositif expérimental

La configuration expérimentale considérée afin d'étudier le comportement d'une structure excitée par une couche limite turbulente est constituée d'une plaque encastrée en amont et laissée libre sur ses trois autres côtés, fermant une cavité remplie de fluide. En effet, des mesure antérieures réalisées avec une configuration encastrée sur les deux largeurs de la structure, on montré une réponse de faible amplitude. Le choix de libérer le côté aval a été réalisé afin d'augmenter l'amplitude de la réponse vibratoire, dans le but de quantifier plus facilement des petites variations de la pression pariétale,

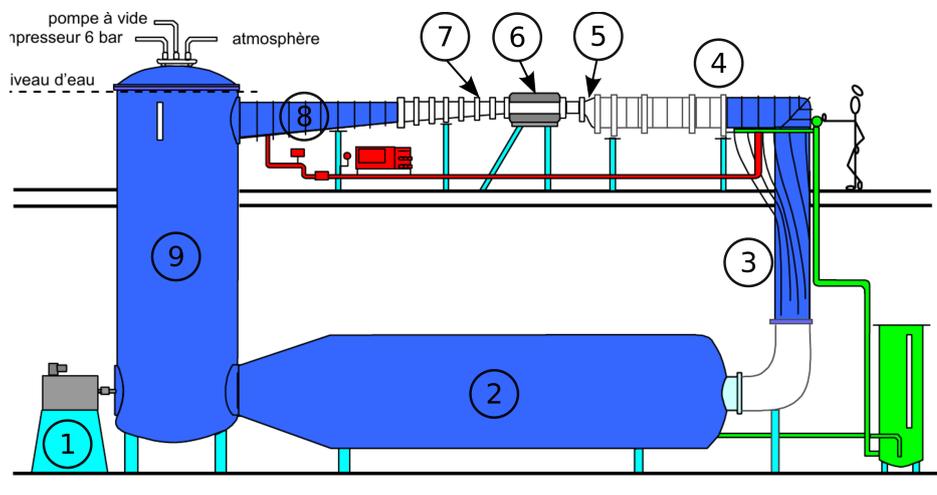


FIGURE 3.1 – Schéma du tunnel hydrodynamique

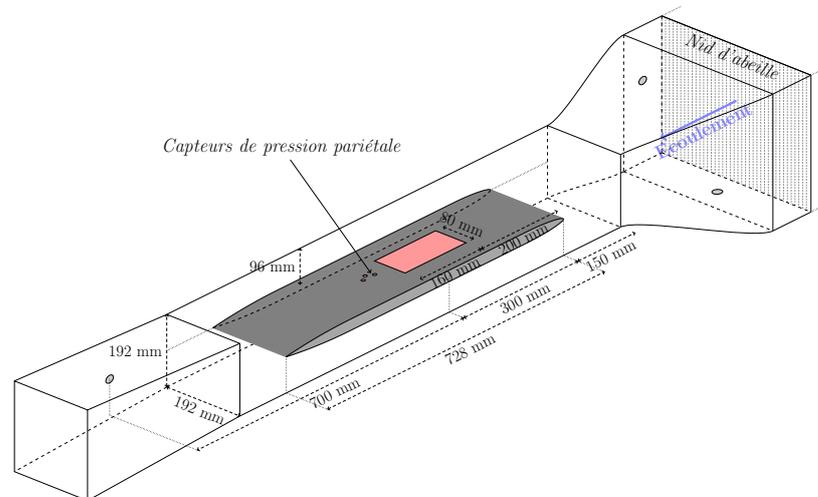


FIGURE 3.2 – Dispositif expérimental installé au sein de la veine d’essai

notamment en ce qui concerne la présence de défauts en amont de la structure.

Cette configuration expérimentale est réalisée à l’aide du dispositif (Fig. 3.3), installé dans le tunnel de cavitation de l’IREnav. Une descriptions de la conception de ce dispositif est donnée dans [Gobert, 2009]

3.2.2.1 Support rigide

Le module comportant la cavité a pour dimensions 728x190x30mm, il s’agit d’un élément massif profilé permettant le développement de la couche limite turbulente. Le support a été dimensionné afin de garantir une bonne rigidité de ce dernier, pour ne pas perturber les mesures vibratoires réalisés sur la structure vibrantes. La largeur du support est proche de la largeur de la veine d’essai, afin de réduire les effets de bords liés à l’entrefer entre ce dernier et la paroi latérale du tunnel hydrodynamique.

La présence du support au sein de la veine d’essai induit une modification de la section fluide de cette dernière. La vitesse de l’écoulement, observée au droit de la structure vibrante est donc différente de la vitesse de consigne du tunnel hydrodynamique. En effet la mesure de vitesse utilisée afin de réaliser la consigne est mesurée à l’aide de capteurs de pression situés en amont et en aval de la veine d’essai. La vitesse de consigne ne prend donc pas en compte la réduction de section due à la présence du montage expérimental.

Des mesures LDV ayant été réalisées pour les différentes vitesses étudiées [Gobert, 2009], il est possible de calculer la vitesse réelle de l’écoulement au droit du dispositif

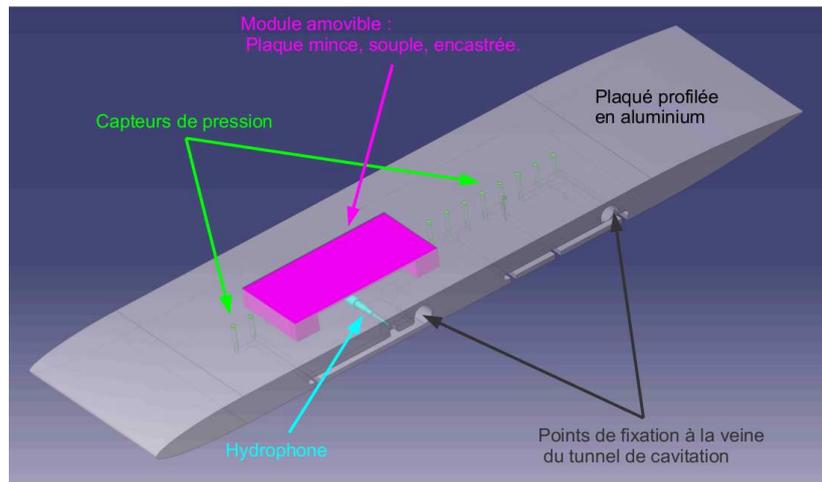


FIGURE 3.3 – Schéma du dispositif expérimental

support en fonction de la vitesse de consigne du tunnel hydrodynamique.

3.2.2.2 Structure vibrante

Une cavité de dimensions 160x80x20mm, est creusée dans le support massif, le début de la cavité se situant à 200mm du bord d'attaque de la structure support.

Cette cavité est fermée par une plaque encastrée libre de dimensions 160x80x1mm, réalisée en aluminium. L'encastrement considéré est réalisé sur le côté situé en amont de la plaque vibrante, les autres côtés sont quant à eux laissés libres. L'encastrement de la plaque est réalisé par collage de cette dernière sur un sabot de dimensions 20x80x(19 ± ε)mm, lui même fixé au fond de la cavité par vissage. La hauteur ε du sabot est réglable, afin de permettre la réalisation d'une marche montante ou descendante, entre le massif support et le bord amont de la structure vibrante.

La réalisation de la structure vibrante a été étudiée afin de faciliter la modélisation numérique du comportement vibratoire de cette dernière. Ainsi il a été choisi de réaliser l'encastrement de la structure vibrante par collage sur un sabot support, afin de ne pas introduire de contraintes résiduelles qui auraient pour effet de modifier le comportement modal de la structure.

Des campagnes expérimentales préliminaires ont également permis de mettre en lumière un phénomène d'amortissement liée à la présence d'une lame de fluide entre les bords latéraux de la structure vibrante et les bords de la cavité. Cet amortissement a été modélisé, en utilisant le modèle proposé par [Bacabac et al., 2005](#), en fonction de l'épaisseur de la plaque et de l'entrefer entre cette dernière et les parois de la cavité. Il a été choisi de réduire la dimension transverse de la plaque afin d'augmenter l'entrefer et de supprimer ainsi l'amortissement local induit par la lame fluide.

La présence d'un amortissement fluide en aval de la plaque, lié à un entrefer a

également été étudié. L'écart entre le mur de la cavité et la plaque vibrante a été choisi suffisant pour éviter de faire apparaître un tel phénomène. Ceci a été confirmé par la comparaison des résultats numériques et expérimentaux. La quantité de fluide pouvant s'échapper par les différents entrefer est très faible et la vitesse de ce dernier est très petite, compte tenu de l'amplitude des déplacements de la structure, de l'ordre du micromètre. L'influence de ces écoulements est donc négligée en ce qui concerne la modélisation de la réponse de la structure.

La structure vibrante retenue a donc pour dimensions 160x78x1mm, la partie vibrante de cette structure a quant à elle une dimension de 140x78mm et se trouve située entre les abscisses $x = 0,22\text{m}$ et $x = 0,34\text{m}$ du dispositif support.

3.2.2.3 Instrumentation du dispositif

Dans le cadre de l'étude de la couche limite se développant sur la structure support et de la réponse vibratoire de la plaque vibrante, différents moyens de mesure sont mis en œuvre pour mesurer les paramètres de la couche limite, de champ de pression pariétale ainsi que le champ de déplacement de la structure vibrante et le champ acoustique généré par cette vibration au sein de la cavité inférieure.

- La cavité fermée par la structure vibrante est équipée d'un hydrophone de taille réduite, omnidirectionnel, Brüel & Kjaer 8103, de longueur 50mm et de diamètre 9,5mm.
- Le dispositif support est équipé de capteurs de pression pariétaux situés en aval de la structure vibrante. Il s'agit de capteurs piezorésistifs miniatures Keller (série 2Mi).

Afin de réduire le filtrage spatial du champ de pression pariétale, lié à la dimension des capteurs de pression, ces derniers sont montés au sein de la structure support et un perçage de dimension réduite permet la mesure du champ de pression pariétale.

3.2.3 Protocole de mesure

Le schéma complet du dispositif expérimental monté dans la veine d'essai est décrit (Fig. 3.4).

L'intégralité du dispositif de mesure est constitué de :

- Trois capteurs de pression
- Un hydrophone
- Un vibromètre laser à balayage
- Un vibromètre laser ponctuel

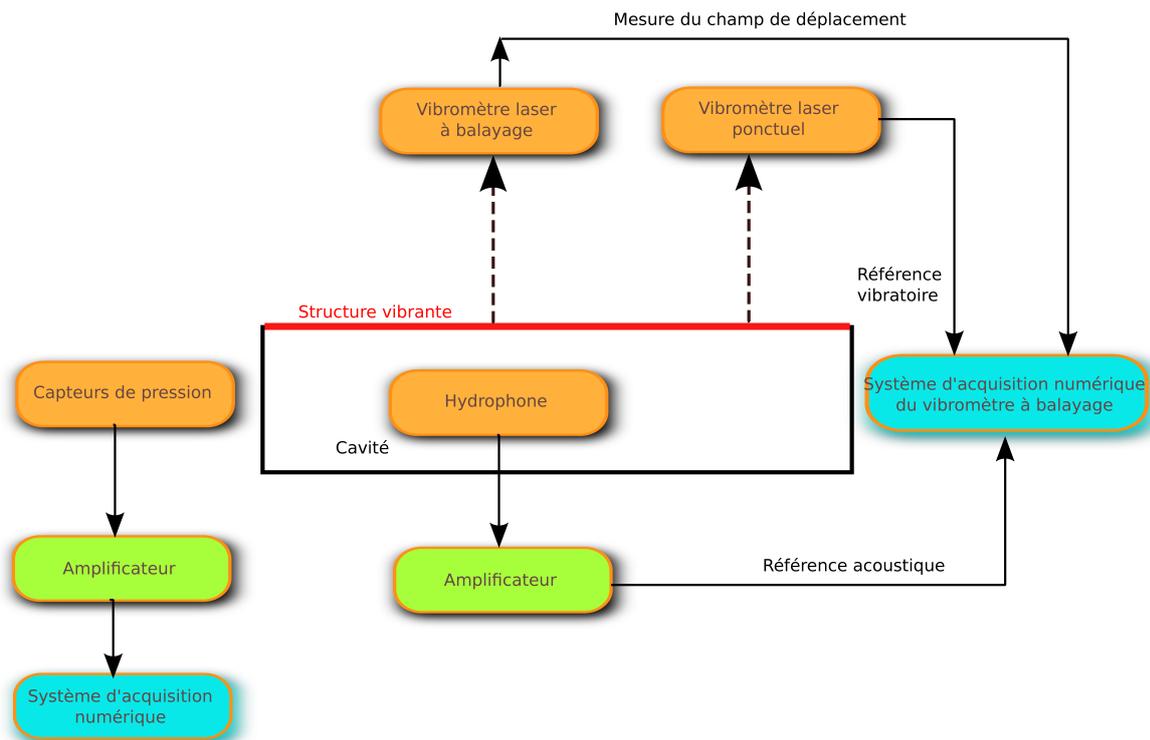


FIGURE 3.4 – Schéma du dispositif de mesure

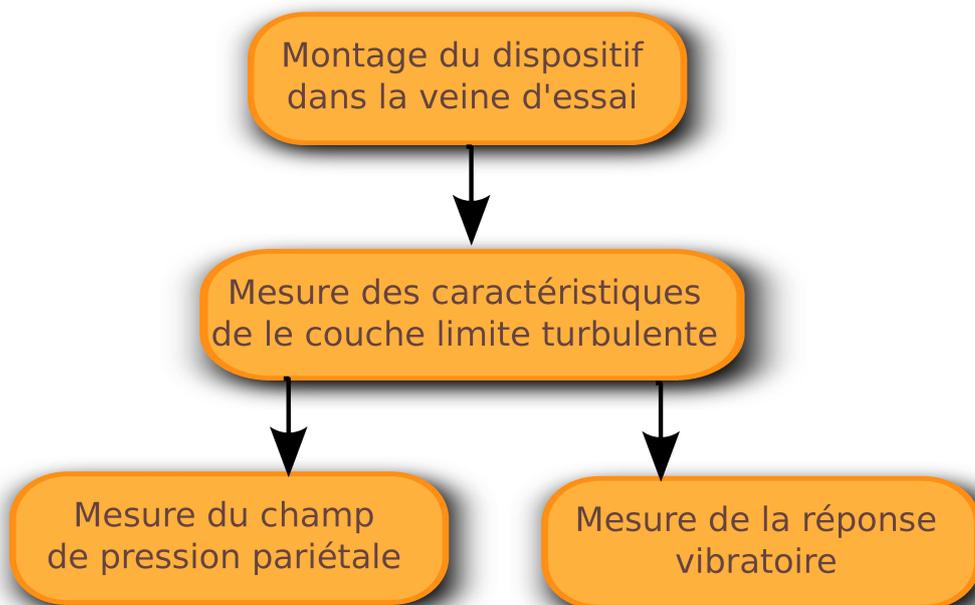


FIGURE 3.5 – Déroulement des mesures

Le protocole décrivant le déroulement des mesures est décrit (Fig. 3.5). Il se décompose en trois mesures différentes :

- Une mesure des caractéristiques de la couche limite
- Une mesure de la pression pariétale
- Une mesure du champ vibratoire de la structure

3.2.4 Couche limite turbulente

Afin de comparer les résultats expérimentaux aux résultats numériques il est nécessaire de définir intégralement les différents paramètres de l'écoulement et de la couche limite turbulente se développant au droit de la plaque vibrante.

Pour les différentes vitesses d'écoulement considérées, 5, 8 et 10 m/s, au sein du tunnel hydrodynamique, les vitesses réellement observées au sein de la veine d'essais sont légèrement différentes. Cette différence est liée à la modification de section fluide de la veine réalisée par la présence du dispositif expérimental, elle est donc obtenue en considérant le rapport des sections fluides en l'absence et en présence du dispositif monté dans la veine. Les vitesses d'écoulement considérées numériquement sont donc légèrement supérieures aux vitesses choisies pour la régulation du tunnel hydrodynamique.

Concernant les paramètres de la couche limite turbulente, différentes lois ont été présentées au chapitre (1), concernant l'obtention de ces paramètres en fonction de la position du point de mesure et des caractéristiques de l'écoulement.

Pour le système étudié, le bord d'attaque de la plaque vibrante est situé à 220mm du bord d'attaque du profil support (Fig. 3.2), cette distance correspond au début de la partie non encastrée de la structure.

Etant donné que des essais LDV ont été réalisés dans des travaux antérieurs [Gobert, 2009], différentes informations sont disponibles, concernant les épaisseurs de couches limites mesurées expérimentalement au droit du dispositif expérimental, à une distance de 220mm du bord d'attaque du profil support. Ces essais permettent de disposer d'un jeu de valeurs pour des vitesses d'écoulement différentes, de 5m/s, 8m/s et 10m/s (Tab. 3.1)

Les écarts observés entre les résultats théoriques, de l'épaisseur de déplacement (δ^*) et de l'épaisseur de quantité de mouvement (θ), obtenus par le modèle proposé par [Choi and Moin, 2012], pour un écoulement turbulent (Eq. 1.8; 1.9; 1.10) et les résultats expérimentaux, permettent de conclure à une bonne modélisation des paramètres de la couche limite par ce modèle.

Afin de modéliser le comportement vibratoire de la structure il est nécessaire de faire

U		Expérimental (mm)	Théorique (mm)	Rapport
5m/s	θ	0,478	0,485	0,985
	δ^*	0,666	0,620	1,073
8m/s	θ	0,430	0,442	0,972
	δ^*	0,577	0,564	1,023
10m/s	θ	0,413	0,422	0,977
	δ^*	0,565	0,540	1,046

TABLE 3.1 – Grandeurs de la couche limite ; $x=220\text{mm}$

Vitesse	Bord d'attaque ($x=220\text{mm}$)	Centre de la plaque ($x=290\text{mm}$)	Bord de fuite ($x=360\text{mm}$)
10m/s	5,1	6,3	7,5
8m/s	4,6	5,8	6,7
5m/s	4,4	5,5	6,5

TABLE 3.2 – Épaisseur de la couche limite $\delta(\text{mm})$ obtenue par la solution théorique

un choix quant aux points de mesure des paramètres de la couche limite turbulente. Et comme la résolution numérique est réalisée en considérant des modèles de spectre en nombre d'onde fréquence, les caractéristiques spatiales du champ de pression pariétale sont absentes de la modélisation.

Ainsi, si les formulations théoriques de [Choi and Moin, 2012] sont considérées, l'épaisseur de la couche limite turbulente, observée au droit de la plaque, varie entre 4,4mm et 7,5mm (Tab.3.2).

L'évolution de l'épaisseur de couche limite pour les différentes vitesses d'écoulement étudiées, présente donc des valeurs situées à $\pm 10\%$ de la valeur observée au centre de la structure. Dans le cadre de l'étude réalisée ici les valeurs des caractéristiques de la couche limite obtenues au centre de la structure seront considérées afin de modéliser les spectres de pression pariétale.

3.2.5 Pression pariétale

Des capteurs de pression sont installés sur le dispositif expérimental. La pression pariétale est mesurée en aval de la plaque vibrante. La mesure de ce cette pression permet de comparer cette dernière aux modèles décrivant l'évolution de la pression pariétale sous une couche limite turbulente afin de vérifier le comportement de l'écoulement au droit de la plaque vibrante.

La mesure de la pression pariétale générée par la couche limite turbulente est réalisée en suivant le protocole (Fig.3.6).

Dans un premier temps les capteurs de pression sont étalonnés. Cet étalonnage est réalisé en faisant varier la pression au sein de la veine en l'absence d'écoulement, ceci

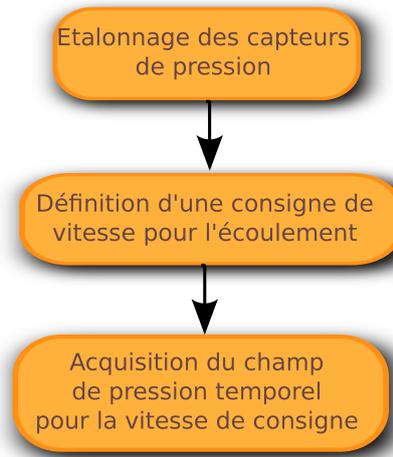


FIGURE 3.6 – Mesure de la pression pariétale

permet d'obtenir la sensibilité des différents capteurs en fonction de l'évolution de la pression.

Une fois les capteurs étalonnés, le tunnel hydrodynamique est mis en écoulement et la réponse temporelle des différents capteurs de pression est mesurée pour chaque consigne de vitesse. Une transformation de Fourier de ces données temporelles permet alors l'obtention des spectres de pression pariétale pour les différentes consignes de vitesse (Fig. 3.7).

Etant donné que les paramètres de la couche limite ont été mesurés par LDV, il est possible de tracer les spectres de pression pariétales en adimensionnalisant ces derniers grâce aux variables externes de la couche limite (Lee et al., 2005).

Ainsi pour des vitesses d'écoulement de 8m/s (Fig. 3.8) et 10m/s (Fig. 3.9), la pression mesurée par les capteurs est comparée à la pression calculée pour les mêmes conditions d'écoulement et la même distance au bord d'attaque de la structure support. Les modèles de spectres de pression utilisés sont différents modèles disponibles dans la littérature et présentés dans le chapitre (1).

Le comportement du spectre de pression pariétale au point de mesure est bien similaire au comportement décrit par les différents modèles. En basse fréquence, les descriptions faites par les modèles de Tkachenko et Goody présentent un comportement proche du comportement observé expérimentalement, tandis que pour des fréquences plus élevées, c'est la modélisation proposée par Chase qui présente une évolution proche de la couche limite turbulente observée expérimentale.

Comme les modèles de spectres de pression en un point peuvent être utilisés afin de réaliser la normalisation des spectres de pression pariétale définis dans le domaine des nombres d'onde fréquence, les deux modèles, proposés par Chase et par Goody

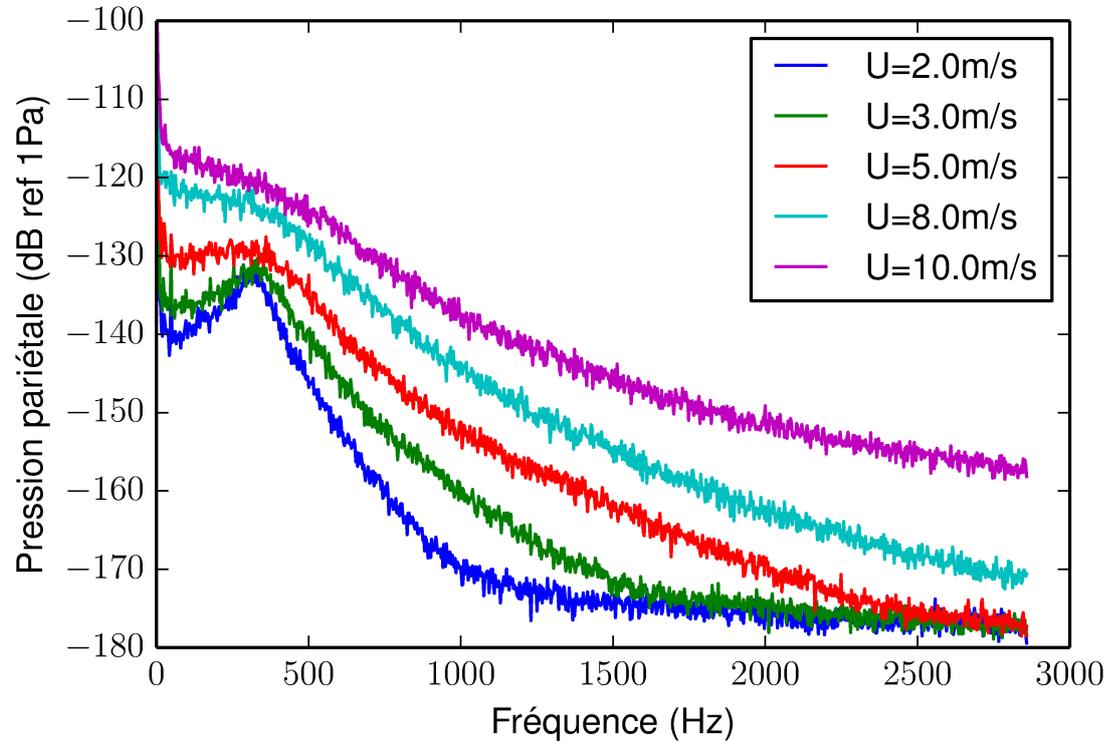


FIGURE 3.7 – Spectres de pression pariétale pour différentes consignes de vitesse

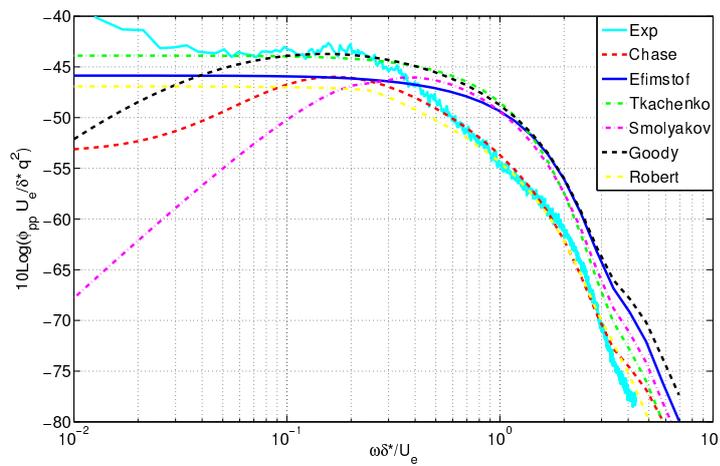


FIGURE 3.8 – Pression pariétale pour une vitesse d'écoulement de 8m/s

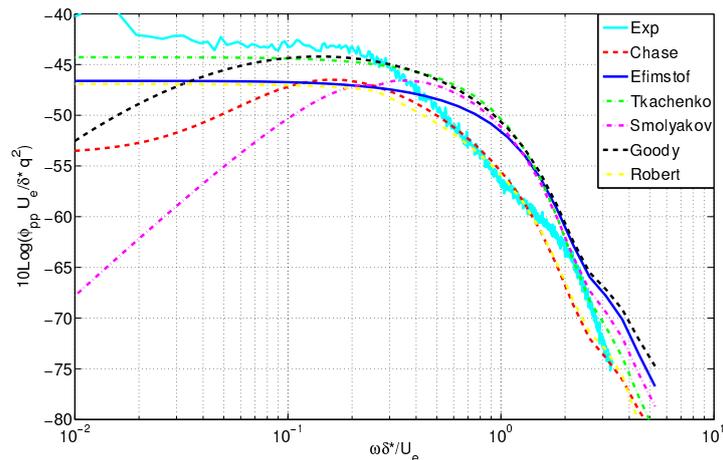


FIGURE 3.9 – Pression pariétale pour une vitesse d’écoulement de 10m/s

seront utilisés quant à cette normalisation afin de comparer l’influence de ces choix sur les comportements en basses et en hautes fréquences de la réponse vibratoire de la structure.

3.3 Comportement dynamique de la structure

3.3.1 Vibrométrie laser à balayage

L’utilisation de vibromètres laser à effet Doppler est une technique éprouvée tant pour de mesures académiques que pour des mesures industrielles. Cette approche à été mise en œuvre pour la première fois par [Yeh and Cummins, 1964] il y a plus de quarante ans afin de mesurer la vitesse d’écoulement d’un fluide avec des précision de l’ordre de 70nm/sec [Salman, 2012]

Ce procédé est basé sur l’effet Doppler et il peut à ce titre être utilisé dans tout type de milieu tant que ce dernier permet la propagation des ondes électromagnétiques. Le déplacement relatif entre la source laser et l’objet mesuré induit une variation de la fréquence des ondes réfléchies liée à la vitesse de déplacement de la cible. La vitesse peut donc être facilement obtenu en mesurant cette modification de fréquence. Le principe de cette mesure est schématisé (Fig.3.10), la fréquence mesurée par effet Doppler pouvant alors s’exprimer sous la forme [Martarelli, 2001] :

$$\Delta f = \frac{2v \cos(\nu)}{\lambda} \quad (3.1)$$

Pour un système se déplaçant à la vitesse v avec un angle ν par rapport à la tête laser, de longueur d’onde λ .

L’utilisation d’un ensemble de mesures ponctuelles afin de reconstruire le champ

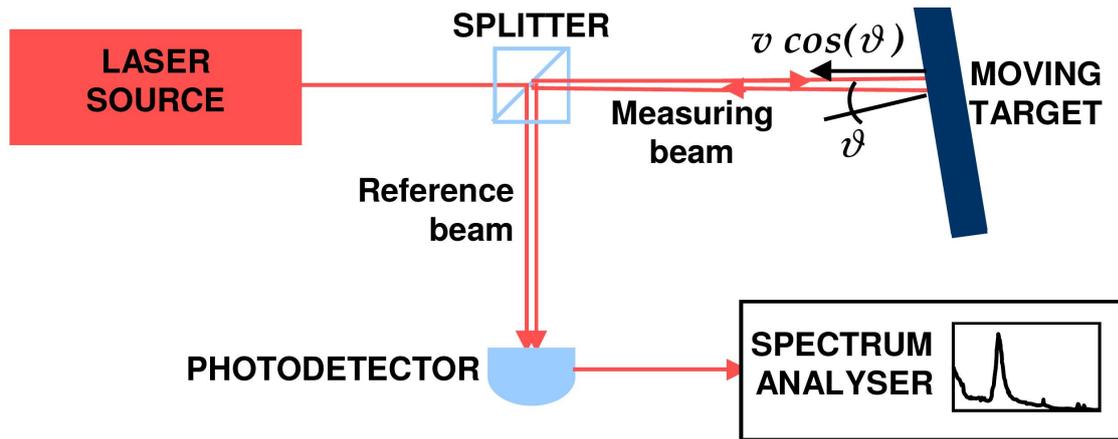


FIGURE 3.10 – Principe de la mesure laser par effet Doppler

vibratoire d'une structure a été mise en œuvre par [Ruzzene, 2007](#) dans le cadre de la détection de défauts dans une structure en aluminium. Dans le cas d'un balayage d'une structure à l'aide d'un vibromètre laser, un ensemble de points de mesure est défini sur la surface de l'échantillon et la vitesse de vibration est mesurée en chacun de ces points. Chaque mesure étant réalisée indépendamment, il est nécessaire de disposer d'une référence afin de pouvoir reconstituer la phase relative entre les différents points de mesure.

Pour une structure vibrant à une pulsation $\omega = 2\pi f$, la vitesse de la référence et la vitesse v_i d'un point de mesure peuvent s'exprimer sous la forme :

$$v_i(t) = A_i \sin(\omega t + \phi_i) \quad (3.2)$$

Pour chaque point, la phase ϕ_i est mesurée relativement à la phase ϕ_0 de la référence ce qui permet la reconstruction du champ de vibration de la structure

Cette approche nécessite de faire l'hypothèse d'un comportement stationnaire de la structure et de l'excitation tout au long de la mesure. Dans le cadre d'une structure excitée par un couche limite turbulente, cette hypothèse est vérifiée tant que les paramètres de l'écoulement sont stables sur la durée de l'essai.

3.3.2 Choix de la référence

Dans le cadre de la mesure du comportement vibratoire de la structure, deux solutions différentes ont été envisagées pour servir de référence au dispositif de mesure par Vibrométrie Doppler. Ces deux solutions étaient l'utilisation de l'hydrophone situé dans la cavité ou l'utilisation d'un second vibromètre laser pour une mesure ponctuelle.

Pour les différentes vitesses d'écoulement, la réponse de l'hydrophone est tracée (Fig. [3.11](#)). Le spectre de l'hydrophone fait apparaître une fréquence à 50Hz et un bon

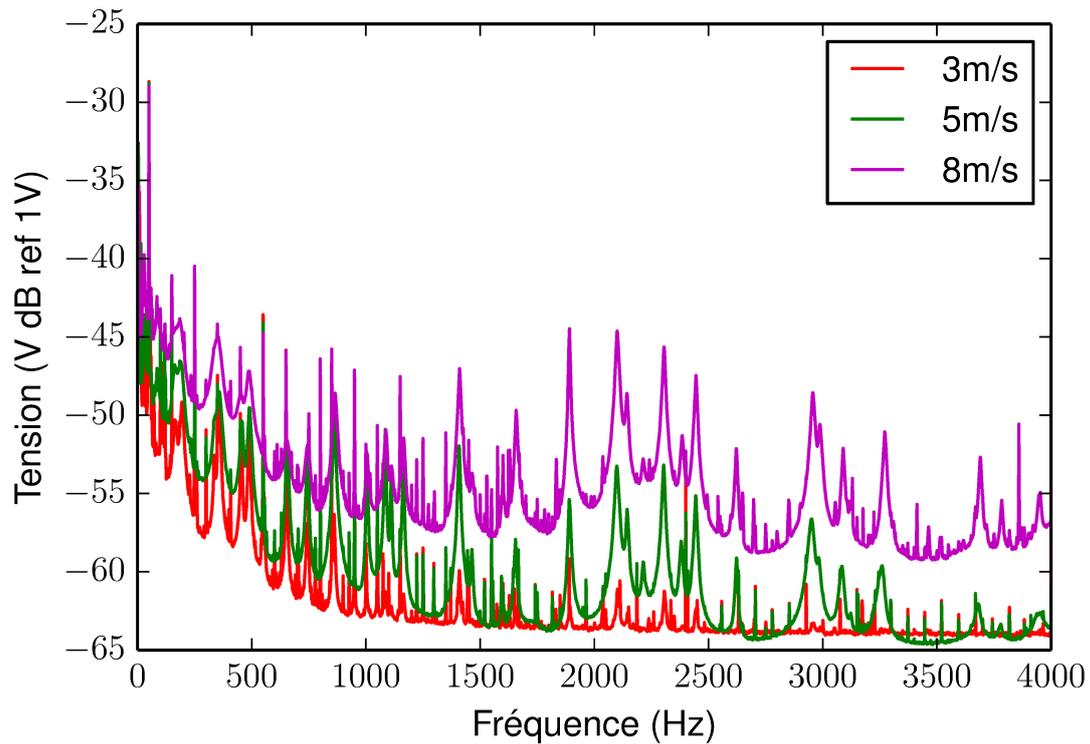


FIGURE 3.11 – Spectre de pression mesuré par l'hydrophone pour différentes vitesses d'écoulement

nombre des harmoniques de ce bruit. Cependant la présence de ces raies de fréquence n'impacte pas le calcul du déphasage à l'aide de l'hydrophone.

Une fois le signal de l'hydrophone filtré pour le débarrasser des fréquences parasites, (Fig. 3.12), la réponse de ce dernier sur la bande de fréquence considérée fait apparaître l'ensemble des fréquences propres de la structure étudiée.

L'utilisation du second vibromètre laser à notre disposition afin de réaliser la référence de phase n'a pas été retenue pour les mesures au sein du tunnel de cavitation. En effet le vibromètre laser considéré ne possède pas une sensibilité suffisante pour des fréquences élevées et il ne permet donc pas, de mesurer la réponse de la structure sur l'ensemble de la bande de fréquence considérée.

Le second vibromètre nous a cependant servi lors de la réalisation d'essais en air. Pour ces essais, la sensibilité de l'hydrophone étant assez faible, l'utilisation d'une mesure directe de la vibration en un point de la structure s'est avérée une meilleure référence.

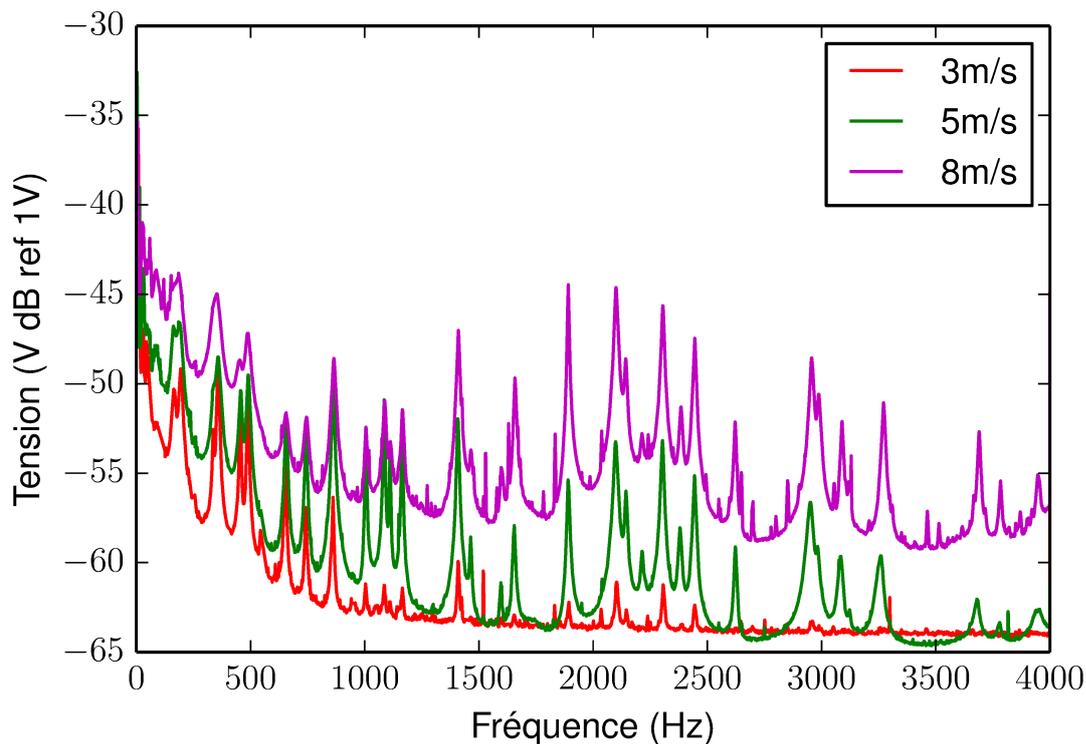


FIGURE 3.12 – Spectre de pression de l'hydrophone filtré numériquement

3.3.3 Principe de la mesure

Afin de mesurer le champ de vibration de la structure, la partie de celle-ci sensible au chargement de la couche limite est discrétisée en un maillage constitué d'environ 300 à 700 points, distribués de manière homogène sur la surface (Fig. 3.13).

Pour chaque point de la structure la réponse vibratoire est mesurée et la transformée de Fourier de cette réponse est calculée. Afin de stabiliser les résultats et de diminuer les écart liés aux fluctuations des conditions expérimentales, plusieurs spectres de réponse sont calculés pour chaque point de mesure et le spectre moyen en chaque point est obtenu à partir de l'ensemble de ces mesures. Une analyse de la sensibilité de la réponse spectrale au nombre de moyennes réalisées a amené à considérer une réponse moyenne constituée de 64 mesures de spectre, pour chaque point.

Comme une résolution de l'ordre du Hertz est souhaitée, chaque acquisition temporelle a une durée de l'ordre de la seconde. Le nombre important de moyennes réalisées et le nombre important de points de mesure considérés induit des durées de l'ordre de la demi-journée, pour une structure discrétisée par 300 points de mesure à la journée pour 700 points de mesure.

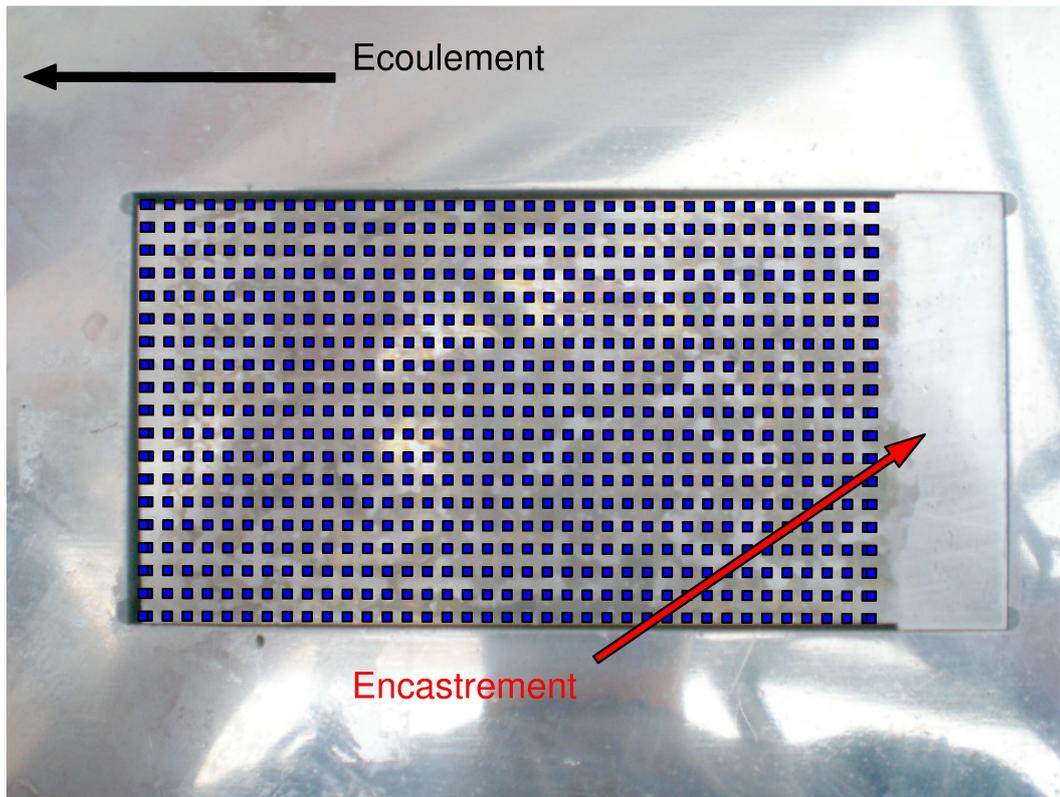


FIGURE 3.13 – Structure vibrante étudiée et maillage considéré pour la mesure vibratoire

3.4 Structure seule

Une étude de la structure seule, sans écoulement est réalisée en air et en eau. Cette étude est également réalisée numériquement. La comparaison des résultats numériques et expérimentaux permettent d'accéder à certaines grandeurs du problème physique, tels que la modélisation de l'amortissement de la structure. Cette étude permet également de valider le modèle dans le cadre d'une excitation simple représentée par un chargement ponctuel (impact).

3.4.1 Réponse de la structure en air

La structure complète constituée de la plaque vibrante et du support profilé de cette dernière (Fig. 3.3) est étudiée hors de la veine d'essai. Le profil support est maintenu encasté à un dispositif rigide et la plaque vibrante est excitée ponctuellement par l'intermédiaire d'un pot vibrant.

Les différents modes de flexions de la structure en air (Fig. 3.14) sont observés afin de permettre de comparer la base modale obtenue expérimentalement avec les calculs numériques réalisés en l'absence de couplage fluide structure ainsi qu'avec les modes propres obtenus expérimentalement en eau, afin de caractériser l'influence du couplage

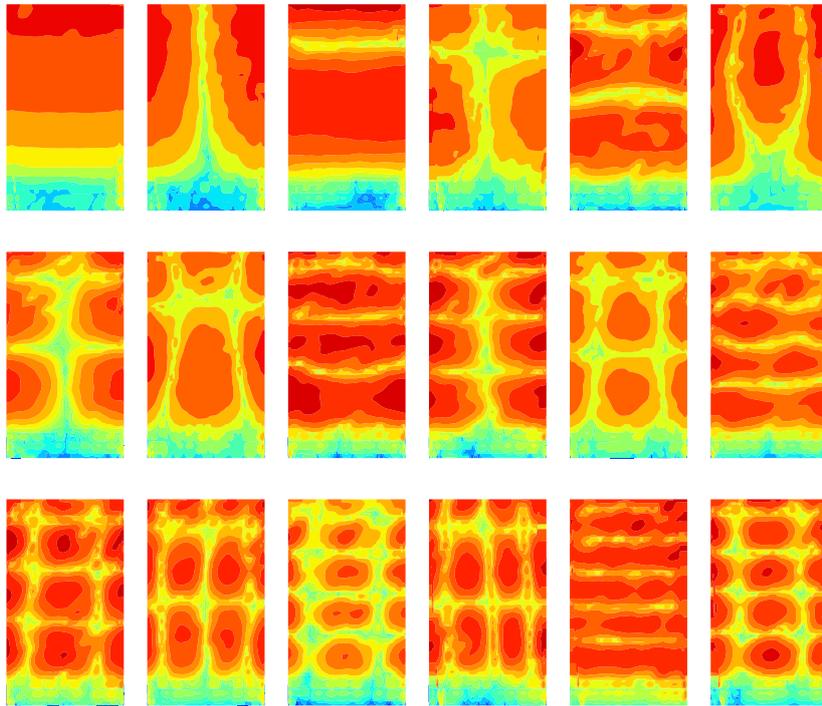


FIGURE 3.14 – Module des déformées modales du système en air, pour les 18 premiers modes. La structure est encastree en bas, les modes sont ordonnés de gauche à droite et de haut en bas

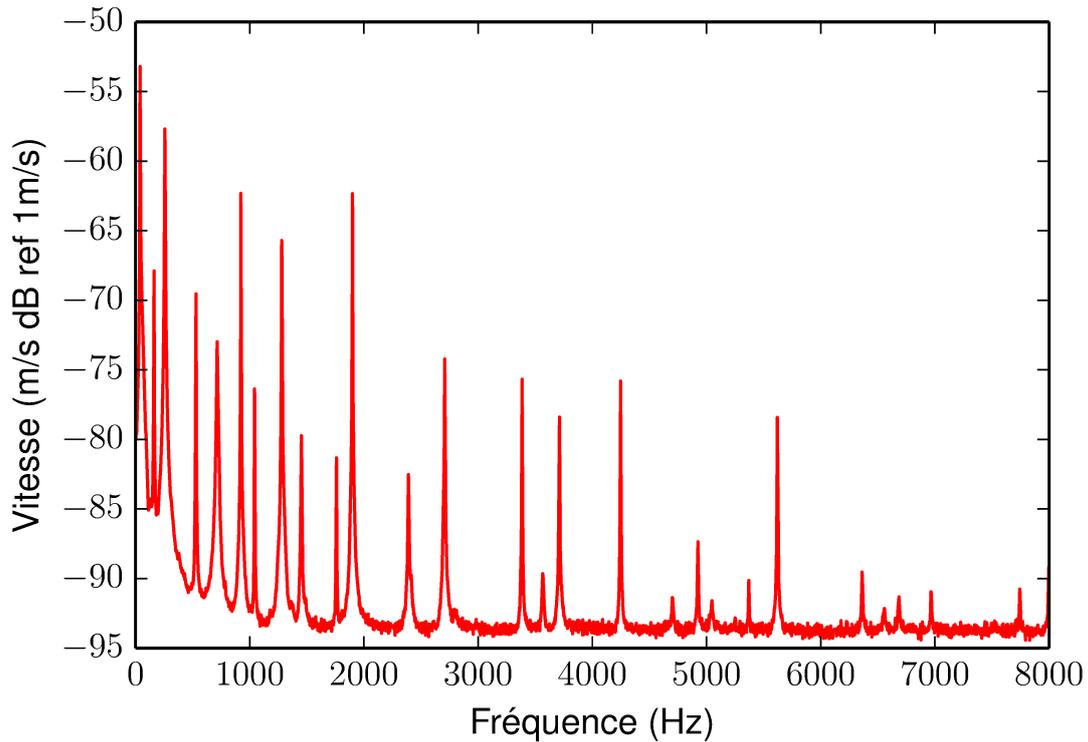


FIGURE 3.15 – Auto spectre moyen de vitesse en air

fluide-structure sur le comportement vibratoire.

Le spectre moyen de la réponse en air (Fig. 3.15) est également étudié, afin d'obtenir les paramètres modaux permettant de décrire l'amortissement de la structure. Sur la bande de fréquence $0 - 4000\text{Hz}$, les modes propres de la structure sont fortement séparés, il y a donc peu de couplage entre les différents modes. Il est donc possible de réaliser une modélisation du comportement modal du système, en considérant un ensemble d'oscillateurs harmoniques avec amortissement visqueux, ne possédant qu'un seul degré de liberté.

Cette modélisation se formule sous la forme :

$$X(\omega) = \frac{1}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-r^2)^2 + (2dr)^2}} \quad (3.3)$$

Avec $r = \omega/\omega_n$ et d le coefficient d'amortissement du système. Ce coefficient peut également être estimé en considérant la bande passant à -3dB du spectre de la réponse, pour les différents modes propres.

Ainsi si nous voulons exprimer le comportement modal en vitesse de la plaque, l'expression décrivant le déplacement (Eq. 3.3) est reformulée sous la forme :

$$V(\omega) = \frac{1}{k^2} \frac{1}{(1-r^2)^2 + (2dr)^2} \quad (3.4)$$

Pour chaque fréquence propre, une minimisation de l'erreur par la méthode des moindres carrés est réalisée afin d'estimer le coefficient de raideur modal k et le coefficient d'amortissement modal d du système. Il est ainsi possible de tracer la réponse de chacun des oscillateurs harmoniques considérés ainsi que la réponse de la somme de ces oscillateurs (Fig. 3.16) et de comparer ces réponses à la réponse expérimentale. Nous pouvons observer que le modélisation par un ensemble d'oscillateurs harmonique permet une bonne représentation du comportement dynamique de la structure à proximité des fréquences propres, les spectres théoriques et expérimentaux étant quasiment confondus. Entre deux fréquences propres, l'apport des différents modes à la réponse globale est sous estimée, par rapport aux résultats expérimentaux.

Cependant, dans le cadre de l'étude réalisée, seule une estimation du coefficient d'amortissement modal de la structure est nécessaire à la mise en place du calcul numérique. Compte tenu de la forte séparation des modes propres, il ne semble donc pas nécessaire de mettre en œuvre de techniques plus compliquées de modélisation de structures possédant plusieurs degrés de liberté afin de mieux caractériser le coefficient d'amortissement modal.

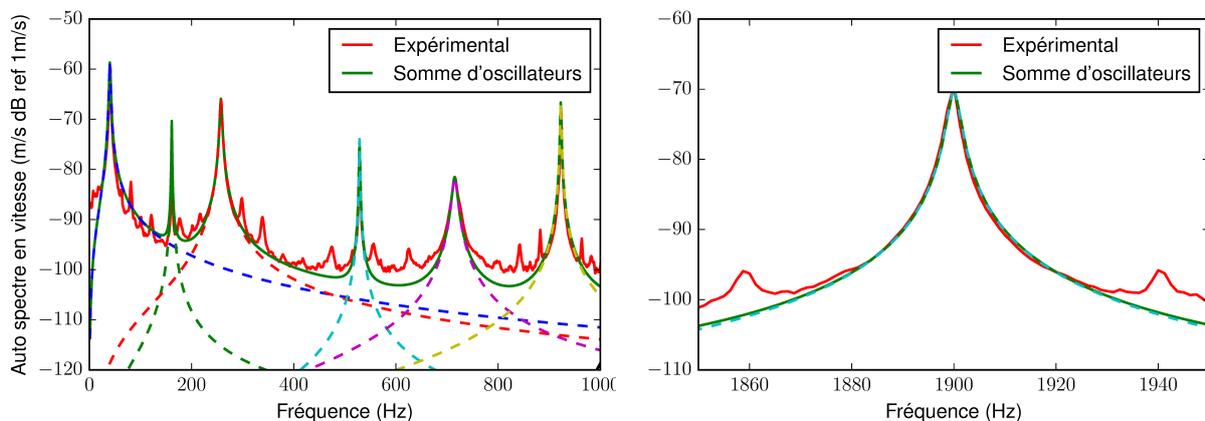


FIGURE 3.16 – Auto spectre moyen en vitesse et modélisation de l'amortissement modal

3.4.2 Réponse de la structure en eau

La réponse de la structure est également étudiée en considérant une excitation ponctuelle réalisée par un pot vibrant, dans le cadre d'une structure immergée. Cette étude est réalisée en plongeant l'ensemble du dispositif expérimental, plaque support et plaque vibrante dans un aquarium rempli d'eau.

Comme dans le cas de l'analyse du comportement vibratoire de la structure en air (Fig. 3.14), les modes propres du système couplé fluide-structure (Fig. 3.17) sont obtenus expérimentalement. L'influence du couplage fluide-structure sur la réponse

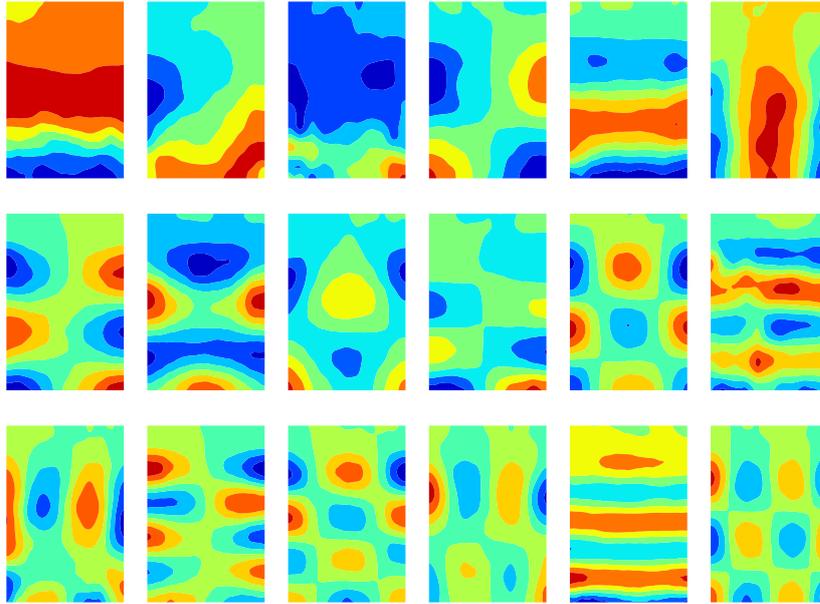


FIGURE 3.17 – Déformées modales du système en eau, pour les 18 premiers modes. La structure est encastree en haut, les modes sont ordonnées de gauche à droite et de haut en bas

vibratoire induit une modification de la base modale du système, certains modes propres observés en eau apparaissent dans un ordre différents de celui observé en l'absence de fluide. La présence d'eau a aussi une influence sur les fréquences propres (Fig. 3.18) du système couplé.

Comme pour l'analyse réalisée en air, les modes propres du système en eau semblent relativement bien séparés, il semble donc possible de réaliser une modélisation en considérant l'hypothèse formulée précédemment, d'une somme d'oscillateurs harmoniques avec amortissement visqueux. Si la réponse d'un tel système est tracé (Fig. 3.19), nous pouvons observer que cette modélisation ne permet pas une bonne représentation du comportement dynamique du système couplé. La réponse modale est surestimée

En effet, dans le coefficient d'amortissement de l'équation (Eq. 3.4), expérimentalement les termes liés au couplage fluide structure sont présents. Or ces termes ont pour effet de coupler les modes propres entre eux, la structure ne peut pas être modélisée par une somme de systèmes ne possédant qu'un seul degré de liberté.

Une modélisation plus fine d'un système à plusieurs degrés de libertés est nécessaire si l'on souhaite obtenir les paramètres modaux du système couplé de manière plus précise. Ces paramètres modaux n'étant pas nécessaires au calcul de la réponse vibratoire, ces derniers n'ont donc pas été calculé de manière plus précise.

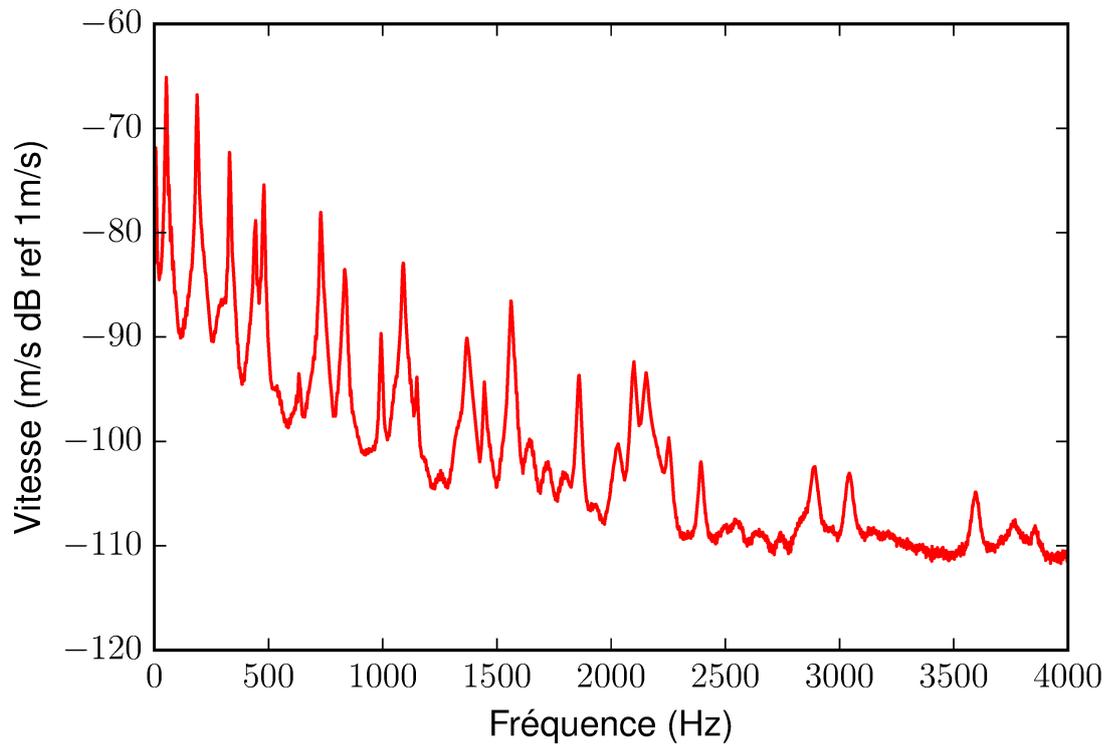


FIGURE 3.18 – Auto spectre moyen de vitesse en eau

En effet cette approche théorique fait apparaître un coefficient d'amortissement représentatif du système couplé fluide structure dans lequel les effets inertiels liés à la présence du fluide sont pris en compte. Il n'est donc pas envisageable d'utiliser l'amortissement obtenu par cette méthode pour le calcul numérique, étant donné que l'on souhaite réaliser un calcul numérique couplé-fluide structure pour lequel les effets inertiels liés au fluide sont obtenus numériquement.

3.4.3 Comparaison air/eau

Les essais réalisées en air peuvent être comparés aux essais réalisées en eau en l'absence d'écoulement. L'évolution des fréquences propres de la structures pour ces deux configurations est donnée dans le tableau (Tab. 3.3) et elle est également tracée (Fig. 3.21). L'influence de l'eau sur la réponse de la structure est liée aux effet inertiels et aux effets de masse ajoutée induit par la présence d'un fluide lourd. Ainsi les fréquences propres obtenus en eau sont plus faibles que les fréquence propres obtenues en air. Un réarrangement de l'ordre d'apparition des modes propres résulte aussi de la présence du fluide lourd, ce réarrangement est visible si les formes modales obtenues en air (Fig. 3.14) sont comparées aux formes modales obtenues en eau (Fig. 3.17). Le mode transversal (0, 2) apparaît en sixième position pour une réponse vibratoire en air alors

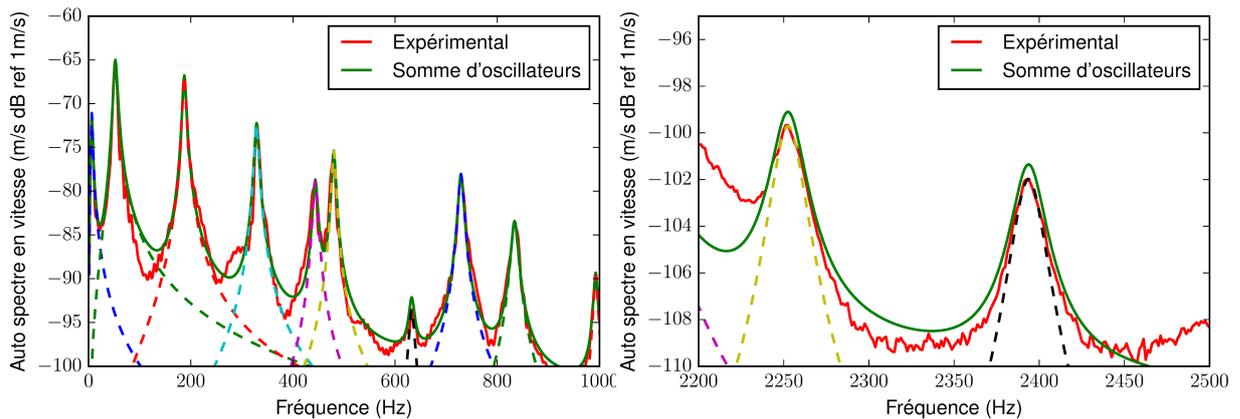


FIGURE 3.19 – Auto spectre moyen en vitesse et modélisation de l’amortissement modal en eau

que ce même mode apparaît en quatrième position en air. La présence du fluide semble globalement favoriser l’apparition de modes de flexion longitudinaux de la structure, ces derniers étant présents plus tôt, que pour les essais en air.

3.4.4 Amortissement

Si nous réalisons une moyenne de la réponse spectrale obtenue pour chaque point de mesure, nous pouvons tracer le spectre de réponse moyen de la structure, pour les différentes vitesses d’écoulement (Fig. 3.22). Ces spectres font apparaître le même contenu fréquentiel que ceux obtenus à l’aide de l’hydrophone. Ceci nous permet donc de valider le choix de l’hydrophone en tant que référence pour la reconstruction du champ vibratoire. La sensibilité du vibromètre laser est suffisante sur la bande de mesure considérée pour permettre l’étude de la structure, même pour une vitesse d’écoulement relativement faible, de 3m/s, l’ensemble de 35 fréquences propres situées dans la bande 0 – 4000Hz peuvent être identifiées.

Il est également possible de tracer le facteur d’amortissement global, aussi appelé facteur de perte, η_n du système couplé fluide structure (Fig. 3.23), en considérant les bandes passante à $-3dB$ des fréquences modales f_n :

$$\eta_n = \frac{\Delta f_n}{f_n} \quad (3.5)$$

L’étude de l’évolution de l’amortissement du système en fonction de la fréquence permet ainsi de définir le modèle d’amortissement décrivant le mieux le couplage fluide-structure. Si un amortissement de Rayleigh est considéré, sous la forme :

$$\mathbf{C} = \alpha \mathbf{K} + \beta \mathbf{M} \quad (3.6)$$

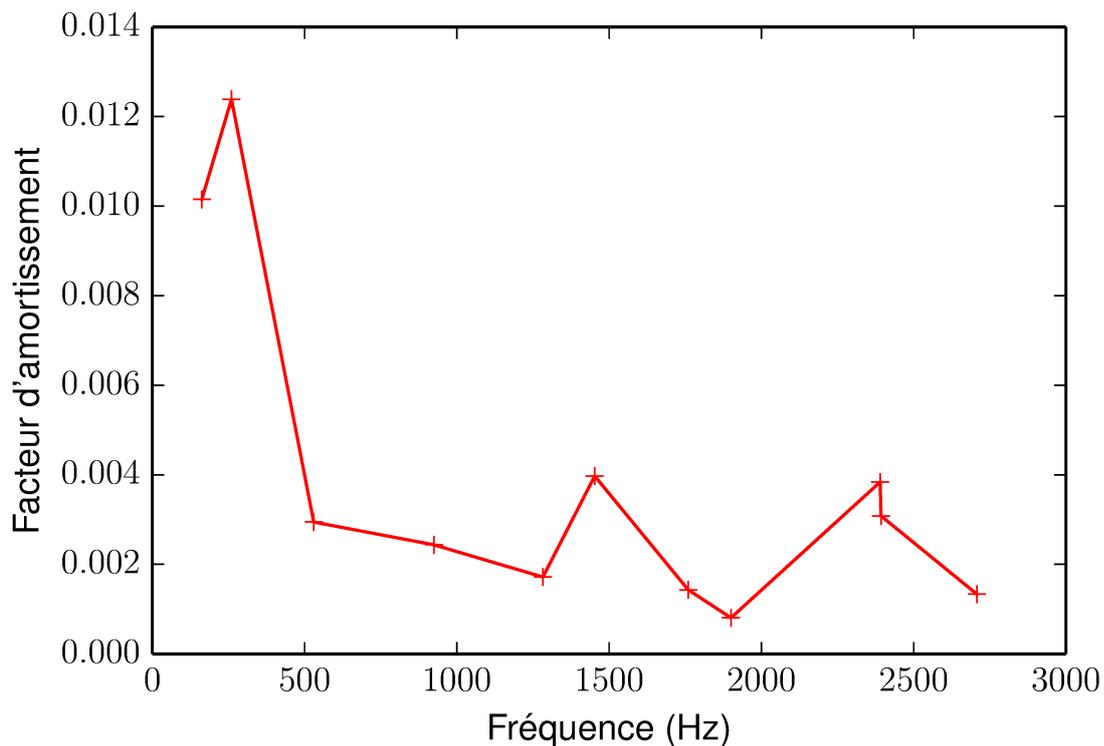


FIGURE 3.20 – Amortissement obtenu en air

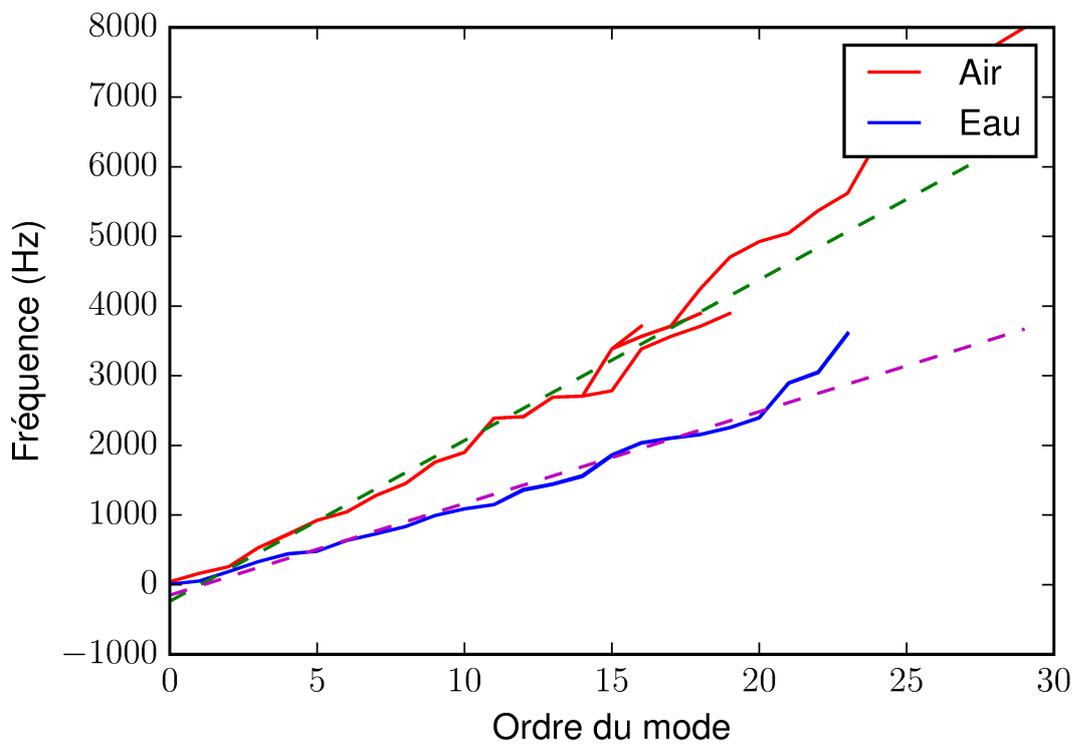


FIGURE 3.21 – Fréquence propres en fonction de l'ordre du mode en air et en eau

Ordre d'apparition du mode	Ordre en air	Ordre en eau	Fréquence en air (Hz)	Fréquence en eau (Hz)
1	(1,0)	(1,0)	32	8
2	(0,1) torsion	(0,1) torsion	128	45
3	(2,0)	(2,1)	205	163
4	(2,1)	(3,0)	422	188
5	(3,0)	(0,2)	571	336
6	(0,2)	(3,1)	738	357
7	(3,1)	(4,0)	834	458
8	(2,2) torsion	(2,2) torsion	1024	490
9	(4,0)	(4,1)	1161	656
10	(4,1)	(3,2)	1406	742
11	(3,2)	(5,0)	1519	861
12	(5,0)	(0,3)	1911	1003
13	(4,2)	(5,1)	1929	1085
14	(3,3) torsion	(4,2)	2153	1111
15	(5,2) torsion	(5,2)	2165	1163
16	(3,3) flexion	(2,2) flexion	2707	1400
17	(6,0)	(6,0)	2851	1463
18	(5,2) flexion	(3,3) flexion	2968	1595

TABLE 3.3 – Fréquence propre et ordre des modes propres en air et en eau en fonction triés par ordre d'apparition

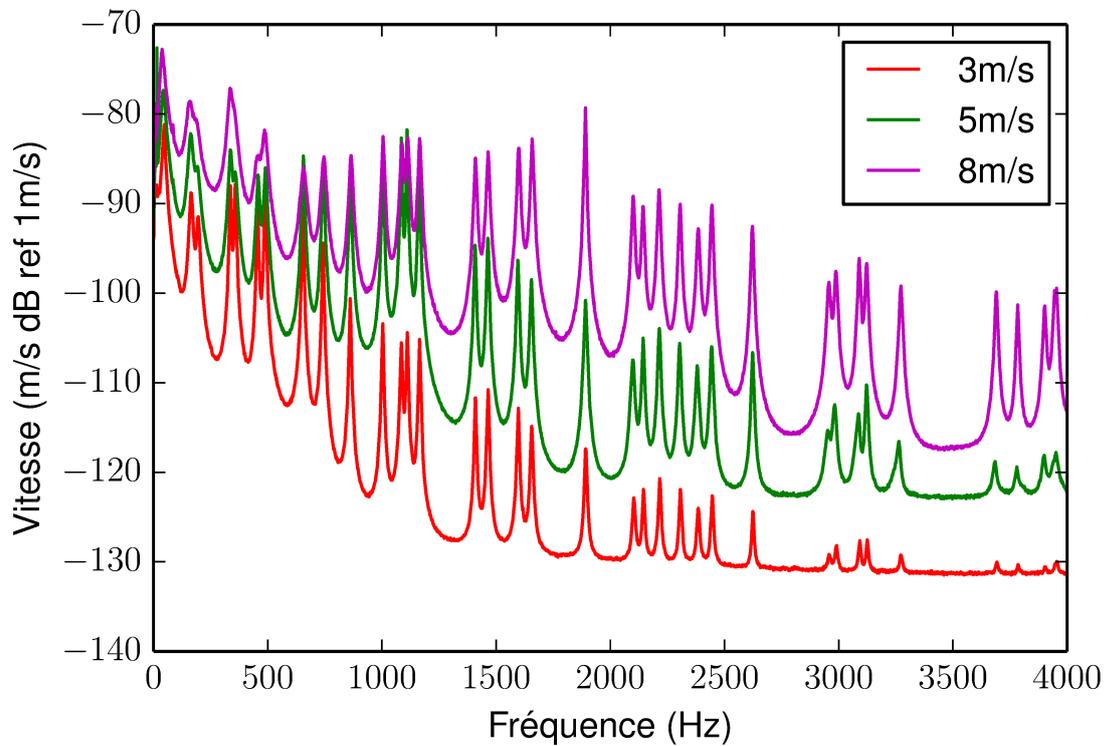


FIGURE 3.22 – Auto spectre en vitesse moyenné sur l'ensemble des point de mesure

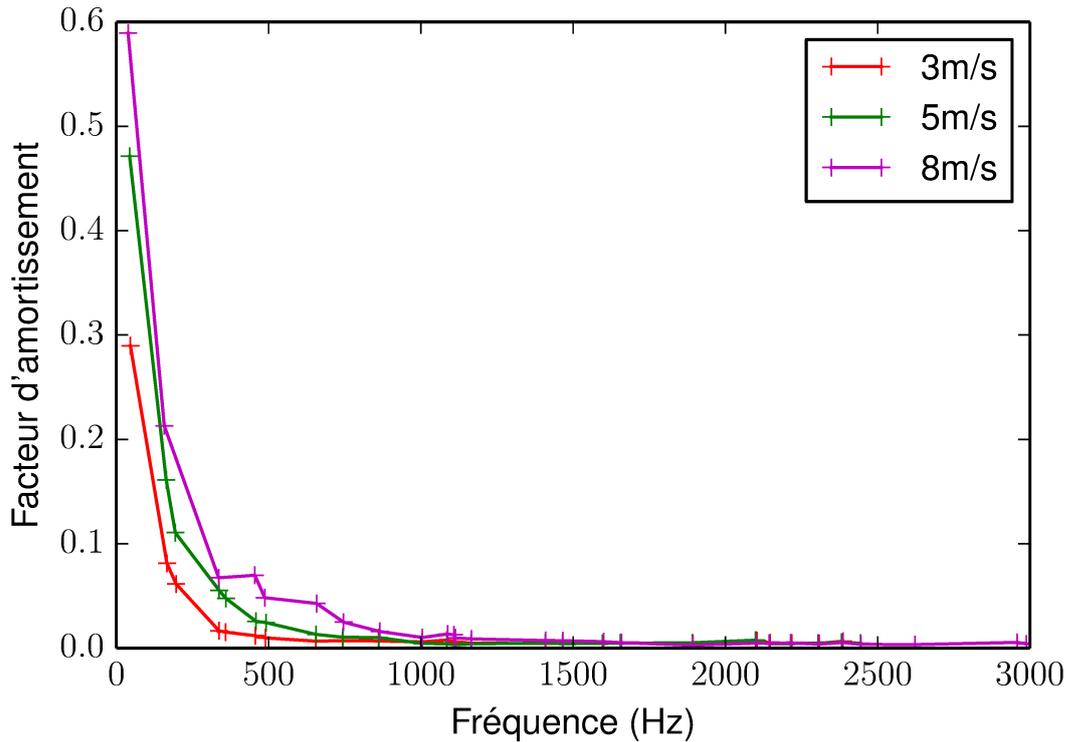


FIGURE 3.23 – Facteur d’amortissement global η_n , en eau, en fonction de la fréquence

Il est alors possible de définir un amortissement principalement influencé par les composantes inertielles, en posant $\alpha = 0$. Le coefficient d’amortissement β peut alors être exprimé sous la forme :

$$\beta_n = 2\eta_n\omega_n \quad (3.7)$$

Si l’amortissement du premier mode est considéré, ce mode étant celui qui participe le plus à la réponse du système, il est alors possible d’écrire $\beta = 2\eta_1\omega_1$, l’amortissement modal réduit devient donc $\eta(\omega) = \beta\frac{\omega_1}{\omega}$. Ce type de comportement est caractérisé par un fort amortissement de basses fréquences et un faible amortissement des modes d’ordre plus élevé.

De la même manière un amortissement principalement lié aux paramètres de rigidité de la structure peut être défini, en posant $\beta = 0$. Si le second mode de la structure est considéré, le coefficient α peut alors être identifié :

$$\alpha_n = 2\eta_2\omega_2 \quad (3.8)$$

L’amortissement global réduit s’exprime donc sous la forme $\eta(\omega) = \alpha\frac{\omega}{\omega_2}$, ce qui implique un fort amortissement de modes d’ordre élevé et un faible amortissement pour le premier mode.

L’allure du facteur de perte observé expérimentalement, semble donc mettre en