



Rapport de stage M1
Avril 2024

ETUDE DE LA SENSIBILITE DES MESURES DE MOUVEMENT ET DE PRESSION AU NIVEAU DU FOND MARIN

J. Harmonie Auger

Résumé

L'étude a pour but d'explorer et de comprendre le comportement des ondes sismiques enregistrés par les instruments de pression et de mouvement installés au niveau du fond marin. Le rapport entre les amplitudes des mouvements verticaux et de la pression sera comparé avec des équations théoriques. En effet, les informations enregistrées présentent plusieurs anomalies telle qu'une différence d'énergie dans les signaux reçus entre les chaînes de pression et de mouvement verticale. Les équations établies sont confirmées pour les événements en-dessous de la fréquence de résonance toutefois le comportement de ces dernières est moins compris au niveau et après la fréquence de résonance. Les équations et courbes théoriques comparés à des événements réels enregistrés au-dessus de la fréquence de résonance corroborent les modèles établis. Des courbes théoriques sont réalisées dans le but de modéliser l'arrivée des ondes à la résonance. Elles montrent un déphasage des ondes et une annulation de la pression à basse fréquence. Ceci montre alors que plus l'onde reçue est à basse fréquence moins il y a de signal de pression au niveau du fond marin.

Mots clés : Sismomètre, Hydrophone, Pression, Accélération, Vitesse, Résonance, Fréquence

Année : 2023 - 2024

Tuteur : Wayne Crawford

Référent : Mikhail Karpytchev

Encadrant : Kevin Martins, Angèle Laurent, Valérie Ballu

Table des matières

Introduction	2
Observations et motivations initiales	2
Choix des sites dont sont issues les données	2
Anomalie du rapport pression/vitesse	3
Données & Méthodes	5
Les données sismiques	5
Rapport pression-vitesse	6
Expérimental	6
Théorique	8
Potential total des ondes transmises	8
Discussion	9
Données obtenues	9
Comparaison des rapport expérimentaux et théoriques	10
Conclusion & perspective	12
Références	12
Annexe	13

Introduction

Les capteurs de pression tel que les hydrophones et les jauges de pression différentielles et absolues ainsi que les capteurs de mouvement, c'est-à-dire les sismomètres et les géophones, permettent de surveiller, localiser et caractériser les phénomènes climatiques, biologiques et telluriques en milieu marin (Hildebrand, 2009). Par exemple, les jauges de pression sont installées sur le fond marin pour prévenir de l'arrivée d'un tsunami dans des régions à risques (Deng et al., 2022). Les capteurs de pression et plus récemment les sismomètres sont aussi utilisés pour suivre la migration des baleines (REFs) (Croll, 2002 ; Dréo et al. 2019). Lors des séismes, les capteurs de pression enregistrent un signal similaire à celui enregistré par la voie verticale du capteur de mouvement (Blackman et al., 1995 ; Deng et al., 2022). Ce type d'instrument peut être sensible à des fréquences assez basses pour enregistrer des séismes de basse fréquence, du « trémor » volcanique ou le mouvement du sol en réponse aux ondes océaniques. (Laurent (2023) ; Crawford et al., 1991).



Figure 1 : Sismographe sous-marin (OBS) lors de sa mise en mer

La complémentarité des capteurs de mouvement et de pression est souvent sous exploitée. Les sismographes sous-marins (OBS) installés aux quatre coins du globe sont équipés d'un capteur de mouvement à trois composantes et d'un capteur de pression. Toutefois ce dernier n'est utilisé qu'en situation de recourt, lorsqu'il y a un problème avec le capteur de mouvement. Mais une étude combinée des signaux de pression et de mouvement est plus exhaustive. Le rapport entre la pression et le mouvement dépend de l'épaisseur de la couche océanique, de l'angle d'arrivée de l'onde, des impédances acousto-élastiques de l'eau et du sous-sol, du type d'onde ainsi que de la compressibilité et densité de l'eau. Une analyse simultanée de ces composantes permettrait de séparer les différents types d'onde (de compression, de rotation...), de calibrer les capteurs entre eux, de caractériser le sous-sol et d'éliminer le bruit provenant des réverbérations dans la colonne d'eau.

L'étude présente a pour but d'effectuer les premières vérifications entre les données de pression et de mouvement en comparant des rapports pression/mouvement théoriques et expérimentaux. Les valeurs expérimentales sont issues de deux différents sites sismiques et les valeurs théoriques sont calculées en considérant le cas des ondes planaires dépendant de l'angle d'incidence de l'onde, de la profondeur de l'eau et de la fréquence de l'onde. Dans un premier temps, un répertoire de valeurs issues des signaux sismique sera établi à partir des données réelles enregistrées. Ensuite les rapports de pression/vitesse expérimentaux seront déduits des données obtenues et les rapports théoriques seront établis à partir des équations proposées par Deng et al. (2022). Enfin une comparaison des rapports pression/vitesse sera effectuée afin d'observer le comportement du rapport pression/vitesse.

Observations et motivations initiales

Choix des sites dont sont issues les données

Des données sismiques collectées à Mayotte et au niveau du volcan Lucky Strike sur la dorsale médio-atlantique lors d'expériences à long terme sont utilisées pour l'étude menée. Ces données ont été choisies car elles sont issues de zone à sismicité contrainte avec beaucoup de séismes locaux dont les réseaux sont équipés de capteur large bande. Le site de Mayotte permet d'obtenir des événements rares tels que les séismes basses fréquences liés au volcanisme. Des capteurs de pression absolus y sont aussi installés et permettent d'observer les séismes de plus basses fréquences. Ces derniers ne seront pas utilisés pendant l'étude.

Anomalie du rapport pression/vitesse

Un premier rapport pression/vitesse mis en avant par Filloux (1982) s'énonce comme suit :

Soit p la pression, ρ la densité, h la profondeur de l'eau et a l'accélération, on a :

$$\frac{p}{a} = \rho h \quad (1)$$

Ce rapport est constant et ne s'applique qu'aux basses fréquences c'est-à-dire en-dessous de la fréquence de résonance $f_r = \frac{c_0}{4h}$ pour que l'eau puisse être considéré comme incompressible. Les hautes fréquences sont considérées comme étant les fréquences supérieures ou égales à la fréquence de résonance f_r (Deng et al.,2022).

En observant les arrivées des ondes sismiques, il est rapidement remarqué que les ondes ne s'expriment pas de la même manière selon l'instrument, qu'il soit de pression ou de mouvement. Par exemple, lors d'un séisme local enregistré à Mayotte (Figure 2), il est observé que l'onde P (première arrivée) est suivie de peu de perturbation sur le capteur pression alors qu'elle est suivie de beaucoup d'énergie sur le capteur de mouvement :

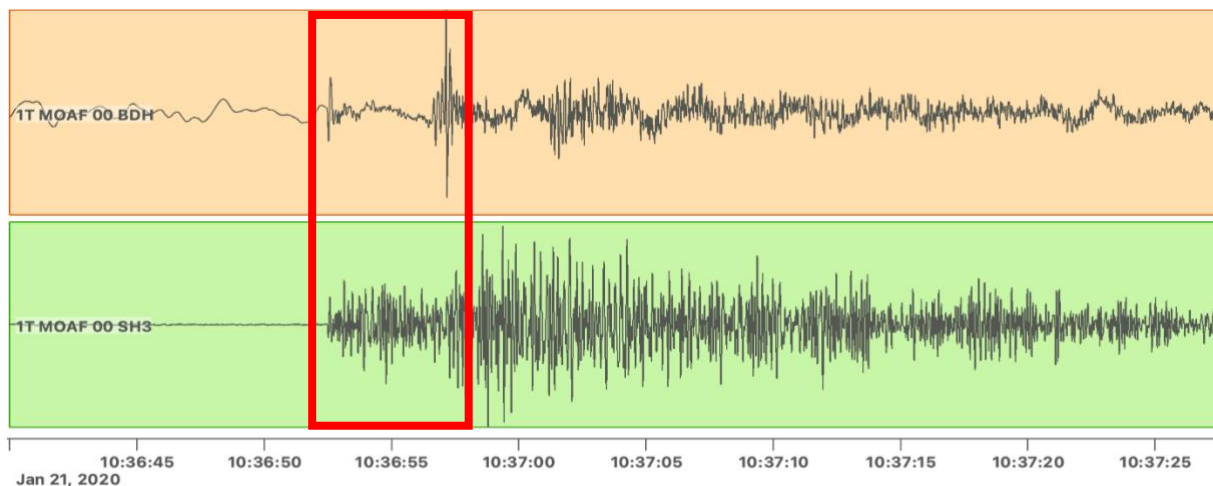


Figure 2 : Mise en avant de la différence de comportement des arrivées des premières ondes sur la station MOAF (au large de Mayotte). Le canal de pression est en haut et celui du mouvement vertical en bas.

Les équations théoriques indiquent pourtant un rapport pression/accélération constant au niveau du fond marin dans le cas le plus simple, c'est-à-dire une onde de compression plane. Cette observation devrait être visible sur la première arrivée de l'onde et sera alors possible de vérifier la théorie établie. Ainsi seuls les rapports de la première arrivée seront comparés à différents types de sols et fréquences pour établir sa justesse. Uniquement une bonne compréhension du rapport pression/mouvement permettra l'étude de la forme entière de l'onde.

L'équation (1) offre un domaine d'étude limité. Deng et al. (2022) propose un rapport pression/mouvement dépendant de la fréquence. Il prend en compte la transmission et la réflexion des ondes dans la colonne d'eau :

Soit ϕ le potentiel transmis de l'onde dans l'eau ; il est observé selon les trois comportements suivant au sein de la colonne d'eau :

- $\phi_1(x,z,t)$ l'onde initiale issues du sol transmise dans la colonne d'eau ;
- $\phi_2(x,z,t)$ l'onde réfléchi au niveau de la surface de l'eau qui redescend vers le fond marin ;
- $\phi_3(x,z,t)$ l'onde provenant de la surface de l'eau qui s'est réfléchi au niveau du fond marin et qui est reparti vers la surface de l'eau.

Le potentiel total de l'onde transmise dans le fluide Φ se déplace dans la colonne d'eau par réflexion successive et est défini de la manière suivante :

$$\Phi(x,z,t) = \sum_j^{\infty} \phi_j \quad (2)$$

Le rapport pression/accélération est alors défini comme suit :

Soit $\Phi(x, z, t)$ le potentiel total de l'onde, $p(x, t)$ la pression, $a(x, t)$ l'accélération, ρ la densité et c_0 la vitesse de l'onde dans l'eau :

$$\left. \frac{p}{a} \right|_{z=0} \equiv \frac{\rho c_0^2 \left(\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial z^2} \right)}{\frac{\partial^2}{\partial t^2} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial z} \right)} \quad (3)$$

Le rapport écrit sous cette forme permet de calculer sa valeur pour tous les domaines de fréquences.

Les représentations des résonances (Figure 3) ci-dessous confirment l'arrivée de la première onde correcte et de l'impact différent de la résonance sur les ondes de pression et de mouvement :

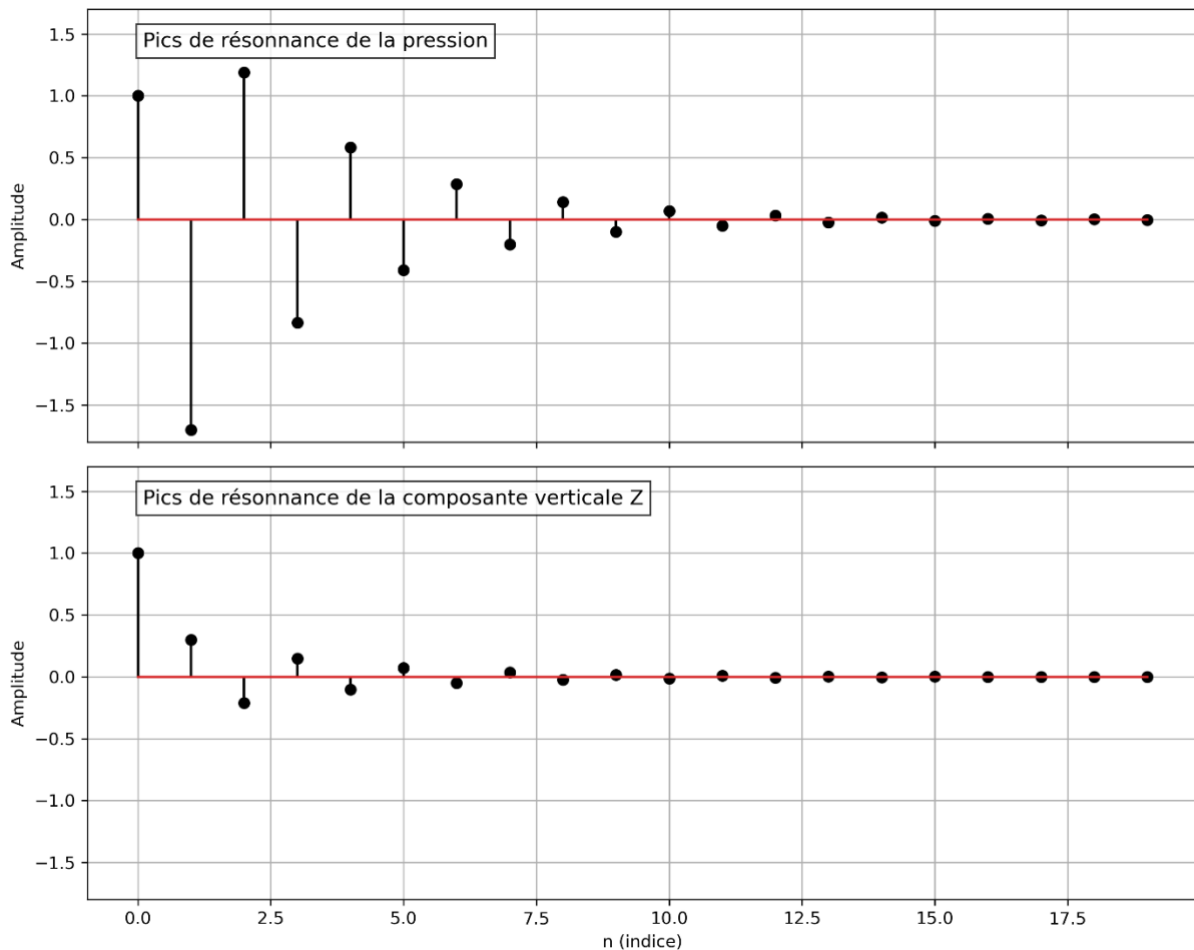


Figure 3 : Dirac représentant les pics de résonance des ondes sismiques selon l'amplitude de pression et l'amplitude de mouvement à la résonance

Il s'agit donc bien de vérifier que la théorie pour l'onde initiale est correcte et dans un deuxième temps le résonnement pourra être approfondi pour le comportement de l'onde après cette première arrivée.

Données & Méthodes

Les données sismiques

Cinq évènements hautes fréquences, trois basses fréquences et deux télé-séismes ont été enregistrés par le réseau 1T au large de Mayotte ainsi que trois évènements enregistrés par réseau 4G au niveau du volcan Lucky Strike sur la dorsale médio-Atlantique au large des Açores sont utilisés lors de l'étude. Ces données contiennent des informations telles que les traces sismiques des évènements ou la position des stations du réseau. Parmi les instruments, certains sont large bande (BBOBS) et d'autres courte bande (SBOBS). La réponse instrumentale, ainsi qu'un fichier contenant uniquement la position des stations, la sensibilité des hydrophones et celle verticale des sismomètres sont fournis pour faciliter le travail avec les données. Les traces sismiques sont classiques, elles contiennent des ondes P, S, de Rayleigh et Love. En ce qui concerne Mayotte, il a été conclu que les évènements sont volcano-tectoniques (VT). Aux Açores, les évènements sont issus de fractures dues à l'extraction de chaleur. L'une des différences entre les deux sites est que les signaux obtenus au large des Açores se situent à 40 km du sismomètre alors qu'à Mayotte ils ne sont qu'à 4 km. Ces évènements sont trop proches des capteurs pour que les ondes reçues puissent être considérées comme planes. Toutefois l'analyse va être faite en considérant le modèle le plus simple, c'est-à-dire celui des ondes planes. Cette différence peut-être la cause de l'écart entre ce qui est observé et la théorie. Les résultats finaux pourront donc être soumis à des ajustements selon les résultats obtenus en considérant ces conditions.

Les données sont lues grâce au logiciel Snuffler contenu dans l'environnement Pyrocko de Python. La visualisation se présente de la manière suivante :

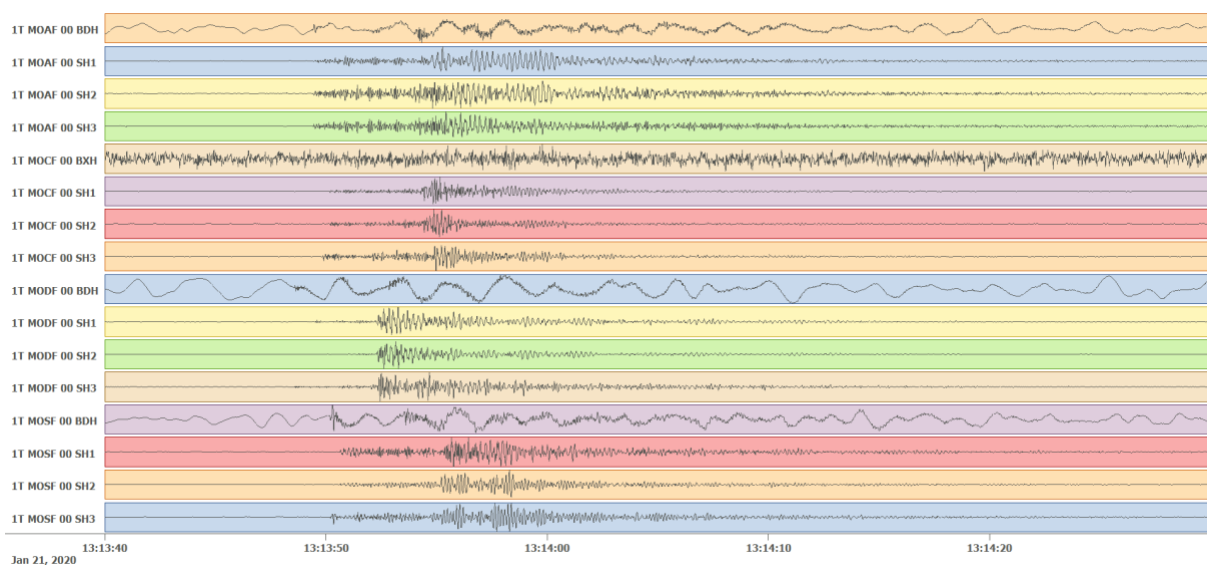


Figure 4 : Outils Snuffler utilisé pour la visualisation des traces sismiques enregistrées par les stations de Mayotte et des Açores. Exemple de l'évènement 1T.20200121T131340 enregistré par le réseau 1T.

Les seules traces qui nous intéressent sont celles de l'hydrophone et de la composante verticale du sismomètre (3 ou Z selon les instruments). En raison des courants au niveau du fond marin les composantes horizontales sont bruitées et donc ignorées.

À la suite de cette observation, le rapport pression-accélération et le rapport pression-vitesse sont calculés pour les évènements à disposition. Pour cela, la période d'arrivée des ondes a été sélectionnée grâce à l'outil marqueur et annotée dans un fichier Excel. Une fois tous les marqueurs positionnés, ils sont enregistrés et visualisés de la manière suivante :

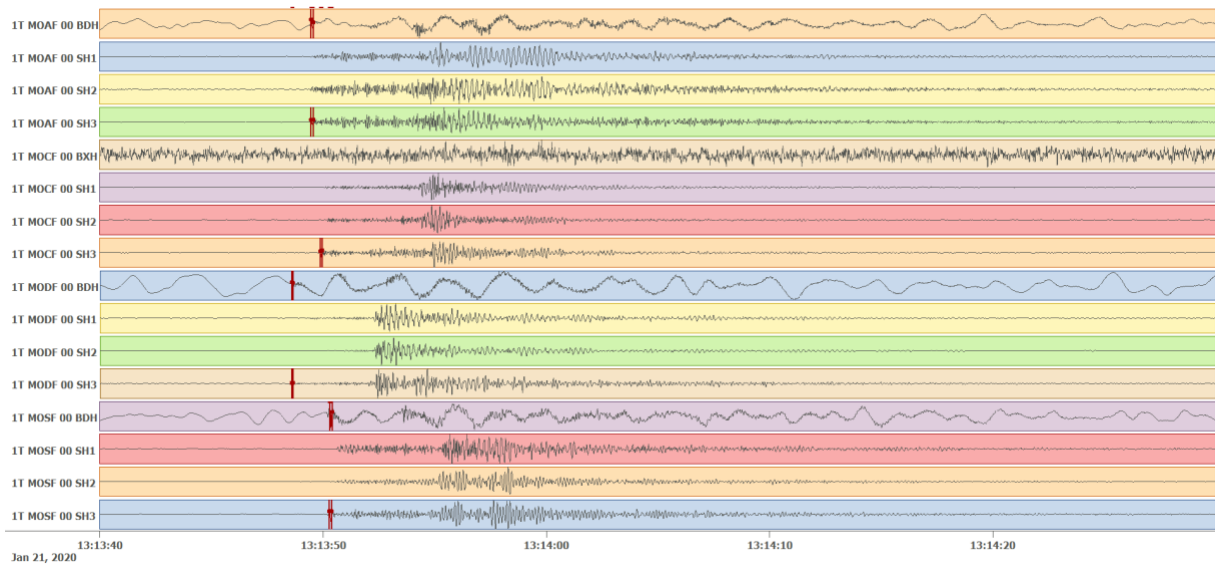


Figure 5 : Marqueurs enregistrés indiquant les premières périodes des traces sismiques des ondes arrivant sur l'hydrophone (canal BDH/BXH) et la composante verticale du sismomètre (canal SH3) visualisées sur l'outil Snuffler

Ensuite le minimum, le maximum et la distance entre le maximum et le minimum appelée la distance peak-à-peak sont calculés à l'aide de l'outil Minimum Maximum Peak-To-Peak. Ces valeurs sont enregistrées dans le même fichier Excel évoqué précédemment. Un tableau par évènement a été réalisé. Ces données obtenues sont utilisées pour calculer le rapport pression/vitesse et pression/accélération expérimental qui sera comparé avec les résultats théoriques.

Pour obtenir la vitesse, l'amplitude calculée est divisée par la sensibilité. L'accélération est obtenue en multipliant la vitesse par la fréquence radiale soit $2\pi f$ avec f la fréquence. Grâce au langage de programmation python, des graphes et des courbes permettront de visualiser les calculs réalisés à partir des données et des équations. Pour tous les calculs effectués dans la suite de ce rapport, il sera convenu que le z est positif dans la direction du bas.

Résultats

Rapport pression-vitesse

Expérimental

Le rapport pression/accélération [A1] et le rapport pression-vitesse sont calculés pour chaque évènement haute fréquence au niveau de chaque station à partir des fréquences enregistrées. Le graphe du rapport pression/vitesse des résultats est le suivant :

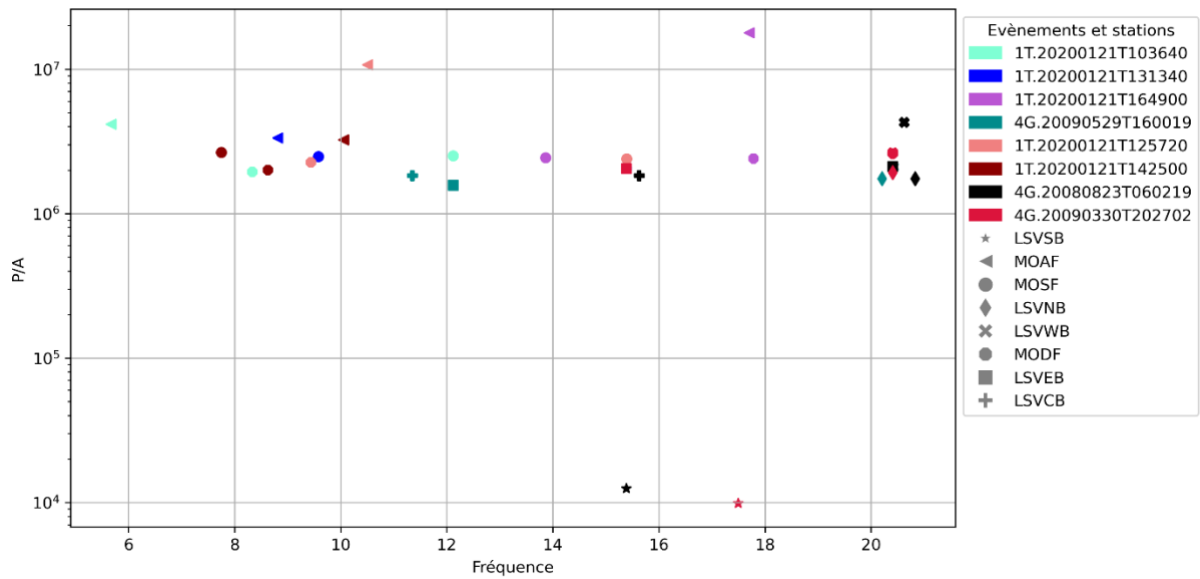


Figure 6 : Rapport pression/vitesse des ondes sismiques enregistrées au large des Açores (réseau 4G) et au large de Mayotte (réseau 1T) pour les 8 évènements hautes fréquences

Dans la suite de l'étude, seul le rapport pression/vitesse est utilisé. Par conséquent, pour les télé-séismes et les évènements basses fréquences le rapport pression/accélération n'est pas calculé.

Le graphe du rapport pression/vitesse des télé-séismes est le suivant :

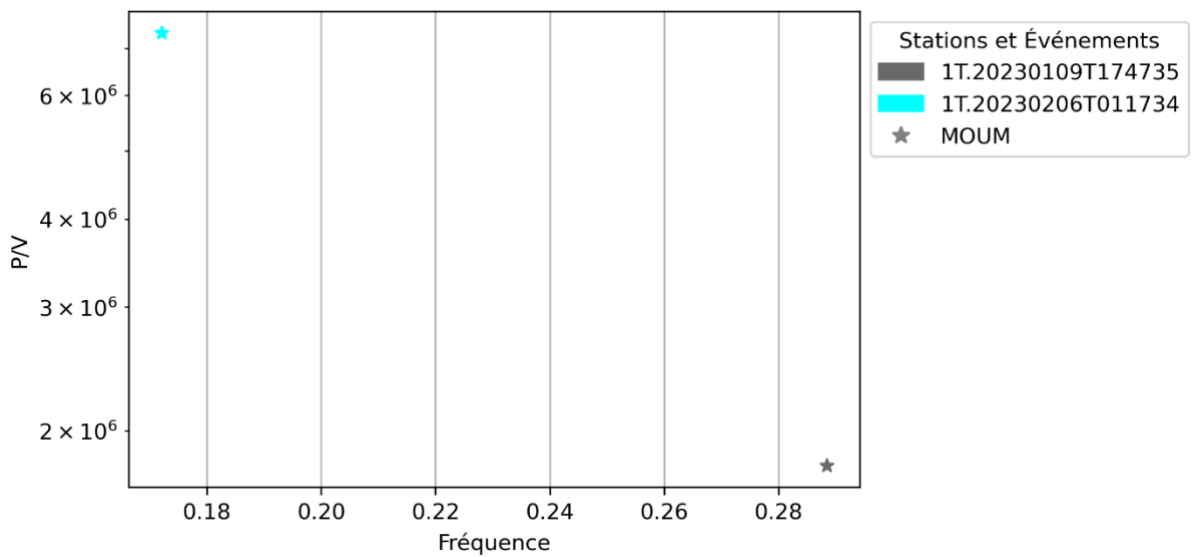


Figure 7 : Rapport pression/vitesse des ondes sismiques de 2 évènements télé-sismiques enregistrés par la station MOUM (réseau 1T)

Pour les évènements basses fréquences, le graphe du rapport pression/vitesse est le suivant :

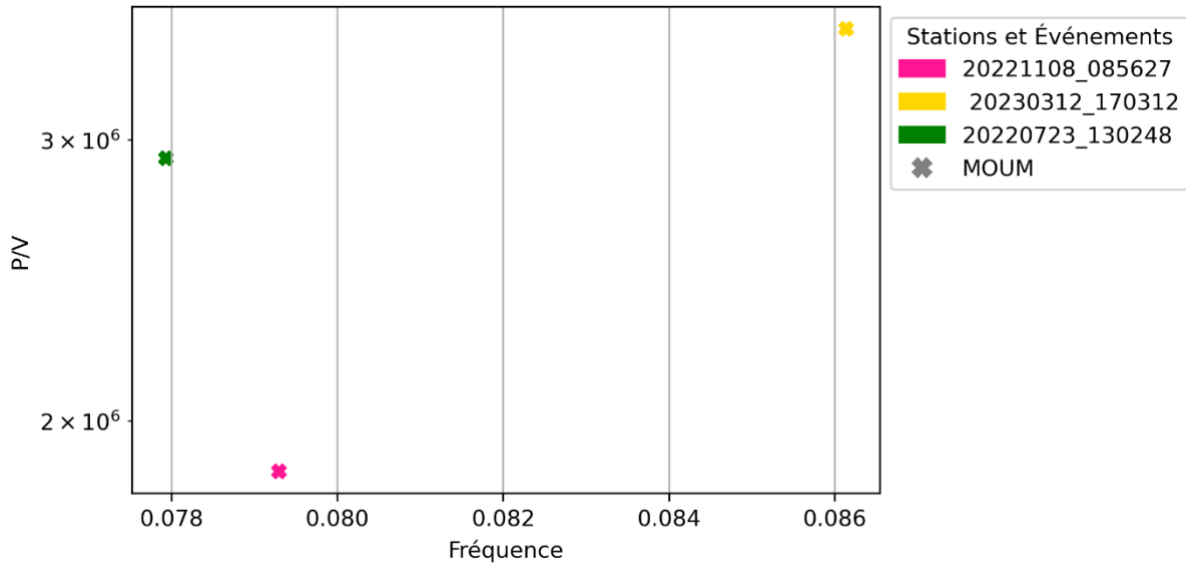


Figure 8 : Rapport pression/vitesse des ondes sismiques de 3 évènements basses fréquences enregistrées par la station MOUM (réseau IT)

Théorique

Potentiel total des ondes transmises

Par souci de simplification, les hypothèses suivantes sont admises :

- Les ondes sont considérées comme planes, c'est-à-dire que les évènements des stations qui ne permettent pas d'effectuer cette approximation ne seront pas pris en compte.
- Le fond de la mer est considéré comme étant plat.
- La vitesse de l'onde dans la couche d'eau est constante soit 1500 m.s⁻¹

Dans le cas des hautes fréquences la réverbération de l'onde apparaît après l'arrivée de la résonance, il faut considérer l'onde ϕ_1 séparément des ondes ϕ_2 et ϕ_3 . Cela permet d'observer son comportement sans les effets induits par la colonne d'eau. C'est pour cela que le calcul du rapport pression-accélération est réalisé pour l'onde unique $\Phi = \phi_1$. Le résultat obtenu est le suivant :

$$\left. \frac{p}{a} \right)_{z=0} = \frac{-i\rho c_0}{w \cos(i_2)} \quad (4)$$

Une rotation de $-\frac{\pi}{2}$ est notée. Le calcul a été effectué pour $\Phi = \phi_2 + \phi_3$ et une rotation de $\frac{\pi}{2}$ est notée [A2].

Le calcul pour $\Phi = \phi_1 + \phi_2 + \phi_3$ est effectué afin d'observer à partir de quel moment l'onde est impactée par la résonance et par conséquent à partir de quel moment le rapport est valable. Le résultat est le suivant :

$$\left. \frac{p}{a} \right)_{z=0} = \frac{-i\rho c_0}{w \cos(i_2)} \tan\left(\frac{-wh \cos(i_2)}{c_0}\right) \quad (6)$$

Le résultat obtenu pour ϕ_1 uniquement et pour $\Phi = \phi_2 + \phi_3$ sont identiques à un déphasage de π près. Dans le cas où les 3 ϕ_i sont associés la tangente apparaît. Un déphasage de $-\frac{\pi}{2}$ est réobtenu.

Le comportement théorique de l'onde avant et après la fréquence de résonance selon différents angles d'arrivée est visualisé graphiquement ci-dessous afin de pouvoir corroborer les équations théoriques. Il a été choisi de se concentrer sur le rapport pression/vitesse afin de s'affranchir de la décroissance du rapport pression/accélération induite par la division par w observée dans les équations (4), (5), (6). Pour afficher les graphes, les rotations de plus ou moins $\pm \frac{\pi}{2}$ ont été abolies. Les différentes profondeurs de chaque station [A3] ont été généralisées à 3 cas : celui de l'eau peu profonde (shallow water), en eau profonde (deep water) et le cas de la station MOUM se situant entre les deux. Voici les graphiques obtenus :

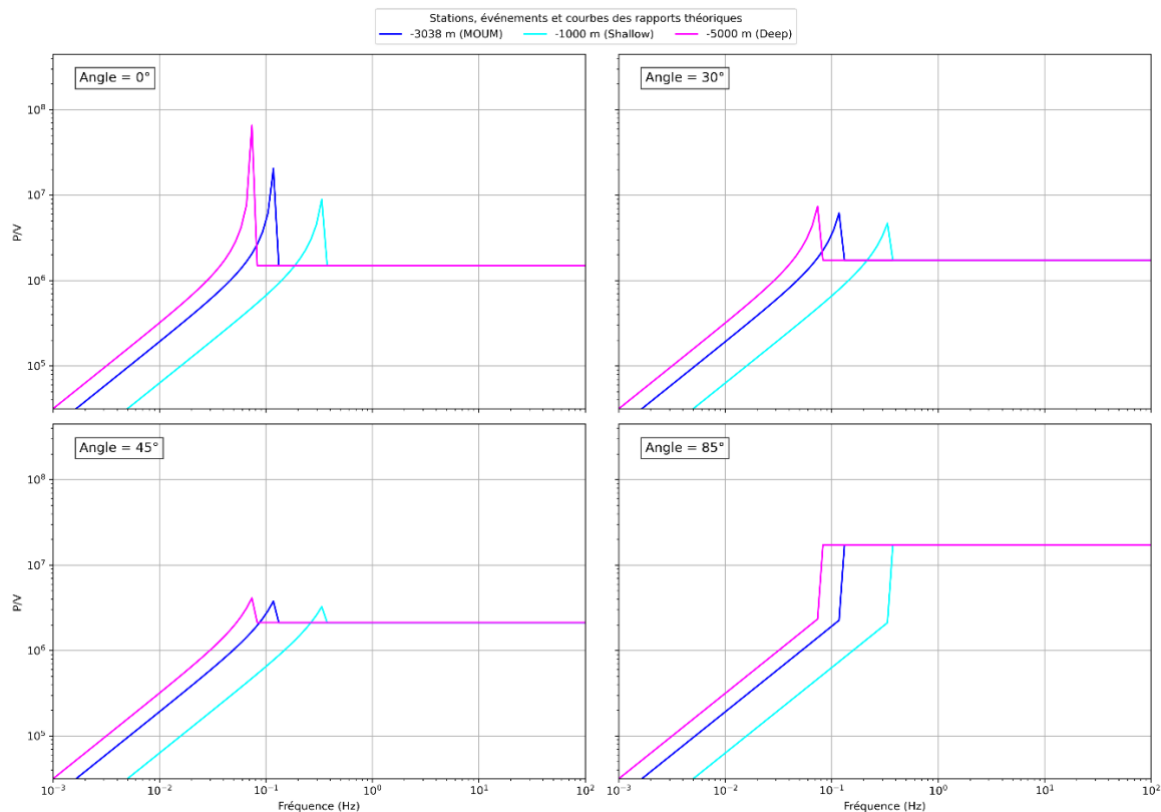


Figure 9 : Rapport pression/vitesse théorique selon les 4 différents angles d'arrivée de l'onde et de la profondeur d'eau

Discussion

Données obtenues

Les rapports pression/vitesse des événements hautes fréquences expérimentales enregistrés sont concentrés autour de la même valeur. Les deux événements excentrés de la station LSVSB ont été vérifiés et aucune anomalie n'a été remarquée. L'erreur peut résider dans un mauvais fonctionnement de l'instrument ou d'un aléa. Les téléseismes et les événements basses fréquences enregistrés sur la station MOUM semblent cohérents. Afin de vérifier l'hypothèse, une comparaison entre les événements expérimentaux et les résultats obtenus par la théorie est effectuée dans la suite de l'étude.

Au préalable de la comparaison des deux résultats, la raison du déphasage de π a essayé d'être corrélée avec la réponse instrumentale [A4]. Aucune corrélation n'a pu être établie. Les approximations préalablement établies telles que l'on considère les ondes comme planes peut être la cause du déphasage dans le calcul.

Les courbes du rapport pression/vitesse théorique pour les eaux profondes, peu profondes et de la station MOUM sont expliquées à travers le schéma explicatif suivant :

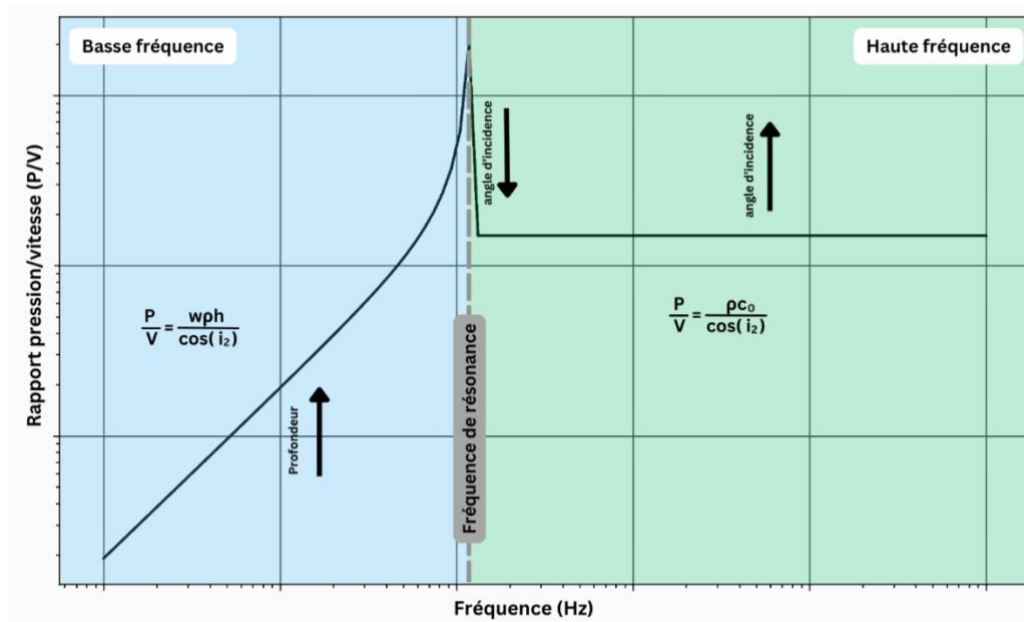


Figure 10 : Schéma explicatif du comportement du rapport pression vitesse pour la première arrivée de l'onde

Un changement de comportement radical est observé avant et après la fréquence de résonance. Les résultats montrent que plus la fréquence est basse, moins il y a de pression au niveau du fond marin. Pour les basses fréquences, l'angle d'arrivée des ondes n'a pas d'impact sur les rapports pression/vitesse.

Comparaison des rapport expérimentaux et théoriques

Le rapport pression/vitesse est comparé avec celui expérimental dans le graphe suivant :

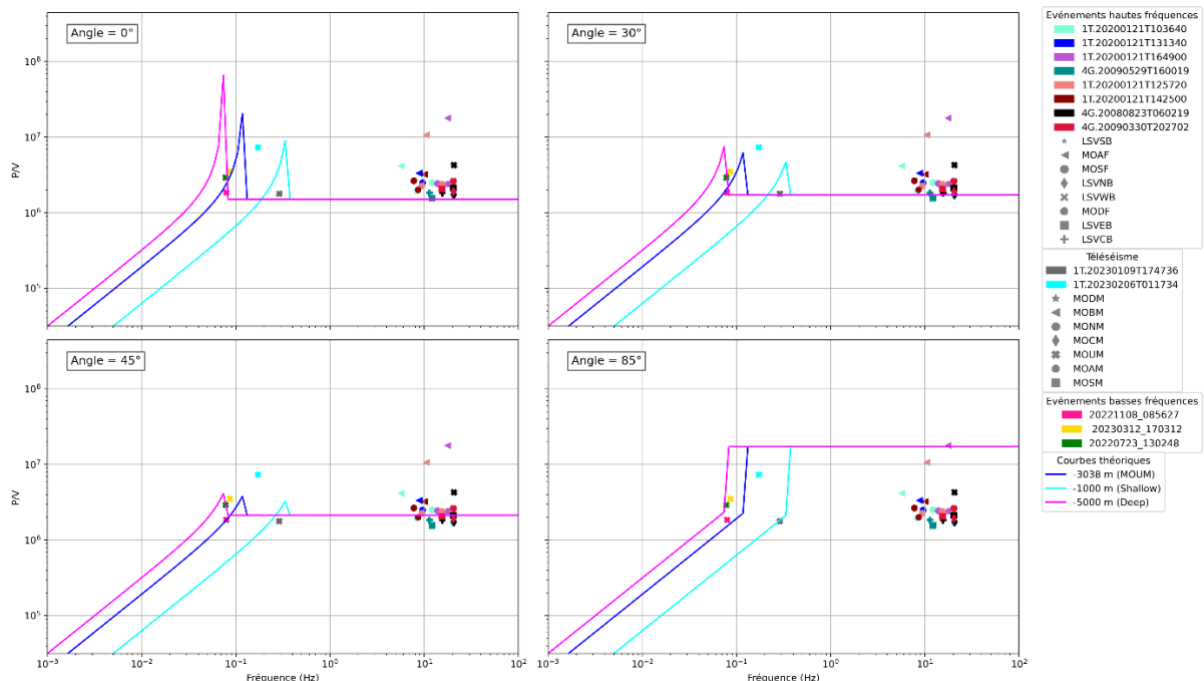


Figure 11 : Comparaison des rapports pression/vitesse théoriques et expérimentaux selon les 4 différents angles d'arrivée d'onde et de la profondeur de l'eau

La première observation des rapports pression/vitesse (Figure 6) des évènements hautes fréquences réels enregistrés est en accord avec les courbes théoriques. L'angle de 45° est celui qui fournit la courbe la

plus adaptée aux valeurs observées. Les résultats des événements basses fréquences ainsi que les téléseismes observés se corrèlent aussi correctement avec les rapports théoriques. L'angle d'arrivée des événements basses fréquences le mieux adapté est celui de 0° et pour les téléseismes c'est celui de 85° . On en conclut que selon les types d'événements, les angles d'arrivée d'onde changent mais cela n'empêche pas que les rapports pression/vitesse soient corrects par rapport à la théorie établie. Ils soulèvent toutefois des questions sur l'effet de résonance des ondes. Il est possible qu'il soit plus important que ce qu'il y apparait dans les équations. Aussi, il est démontré que non seulement, la profondeur et la fréquence sont des facteurs clés du comportement de l'onde mais aussi que son angle d'arrivée au niveau de la station est un élément primordial à prendre en considération.

Il a donc pu être conclut que les équations théoriques sont bien vérifiées pour les premières arrivées des ondes. L'observation effectuée précédemment (Figure 2) permet de supposer qu'il y a un désaccord entre la théorie et ce qui est observé car le comportement rapporté par le sismomètre ne correspond pas à un rapport pression/vitesse constant après la première arrivée de l'onde. Afin d'entrevoir une réponse à l'interrogation, une visualisation de sinus à différentes fréquences est réalisée :

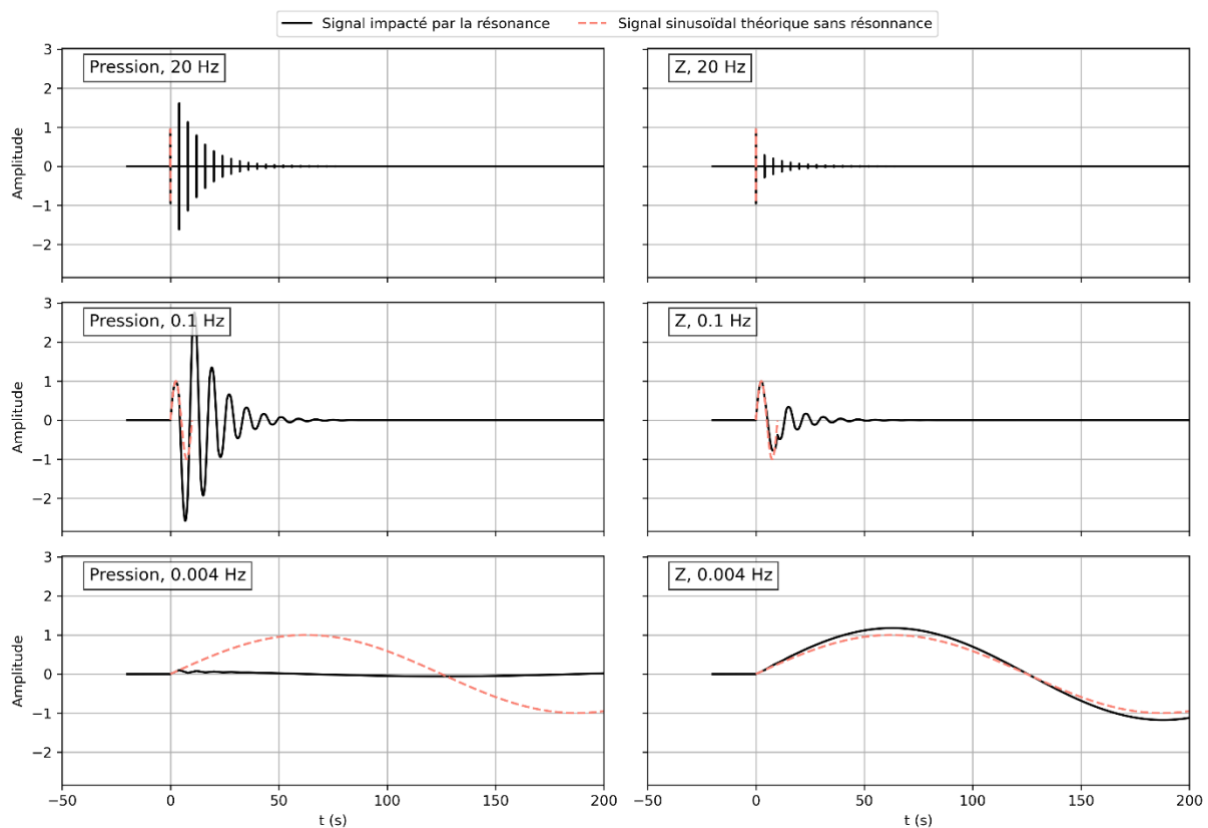


Figure 12 : Arrivées des ondes théoriques dans la chaîne de pression de l'hydrophone (à gauche) et la chaîne verticale du sismomètre (à droite)

Il est observé que les ondes de courtes périodes n'ont pas d'effet les unes sur les autres et ne subissent pas de déphasage autant pour le signal de pression que pour le signal du mouvement vertical. L'onde de longue période a un signal de pression qui diminue rapidement vers 0 et qui est déphasée alors que le signal de la composante verticale suit l'onde théorique. Au niveau des hautes fréquences, les ondes sont déphasées et s'interfèrent les unes avec les autres. Ces déphasages peuvent être interprétés comme la source de ceux obtenus dans les calculs théoriques effectués. Sachant que l'onde d'arrivée est correcte, il est supposé que les ondes soient impactées par un autre phénomène physique comme la rotation des ondes qui résulterait de la différence dans le rapport pression/vitesse.

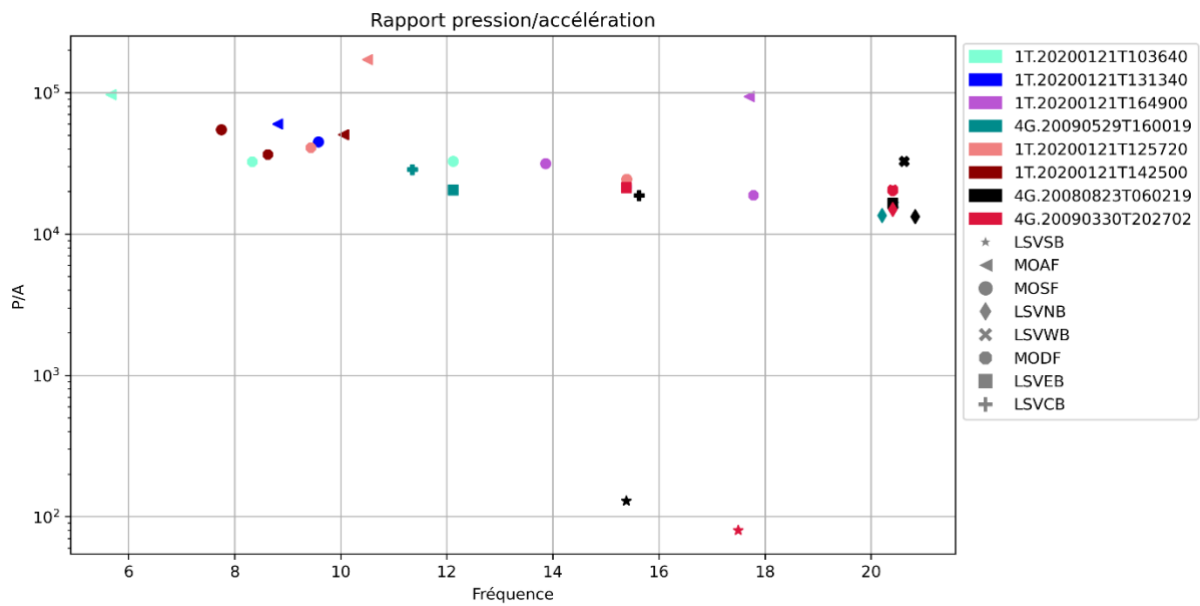
Conclusion & perspective

Les résultats obtenus permettent d'entrevoir une partie du comportement de l'onde au niveau du fond marin. Il a été vérifié et affirmé que la théorie était correcte et n'était pas responsable des anomalies observées sur le rapport pression/vitesse. Ainsi se dessine de manière plus précise ce vers quoi peut tendre une étude complémentaire à la suite de celle-ci. Il serait intéressant de porter l'attention sur le comportement des ondes après la première arrivée en se focalisant sur la rotation de l'onde. Faire une étude du rapport pression/vitesse en prenant en compte les trois composantes, c'est-à-dire les deux composantes horizontales ainsi que la composante verticale et recalculer le rapport serait pertinent. S'il est possible de démontrer que les composantes horizontales réduisent le rapport pression/vitesse alors la raison de cette anomalie pourra être établie.

Références

- Blackman D. K., Orcutt J. A. & Forsyth D. W. (1995). Recording Teleseismic Earthquakes Using Ocean-Bottom Seismographs at Mid-Ocean Ridges. *Bulletin of the Seismological Society of America*, Vol. 85, No. 6, pp. 1648-1664
- Crawford W.C., Hildebrand J.A. & Webb S.C. (1991). Seafloor compliance observed by long-period pressure and displacement measurements. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 96, No. B10, Pages 16,151-16,160. <https://doi.org/10.1029/91JB01577>
- Croll D. A., Clark C. W., Acevedo A., Tershy B., Flores S., Gedamke J. & Urban J. (2002). Only male fin whales sing loud songs. *NATURE*, VOL 417, Page 809
- Deng, H., An, C., Cai, C., & Ren, H. (2022). Theoretical solution and applications of ocean bottom pressure induced by seismic waves at high frequencies. *Geophysical Research Letters*, 49, e2021GL096952. <https://doi.org/10.1029/2021GL096952>
- Dréo R., Bouffauta L., Leroy E. , Barruol G. & Samaran F. (2019). Baleen whale distribution and seasonal occurrence revealed by an ocean bottom seismometer network in the Western Indian Ocean. *Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 161 , pp. 132-144. <https://doi.org/10.1016/j.dsr2.2018.04.005>
- Filloux, J. (1982). Tsunami recorded on the open ocean floor. *Geophysical Research Letters*, 9(1), 25–28. <https://doi.org/10.1029/gl009i001p00025>
- Hildebrand J.A. (2009). Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Marine Ecology Progress Series*, Vol. 395: 5–20, 2009 doi: [10.3354/meps08353](https://doi.org/10.3354/meps08353)
- Laurent A. (2023). Détection, Localisation et Caractérisation des évènements Very Low Frequency (VLF) dans la crise sismo-volcanique de Mayotte (2018-2022). Géophysique [physics.geo-ph]. Université Paris Cité, 2023. Français. 221 PP. [⟨NNT : 2023UNIP7123⟩](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-04574591). [⟨tel-04574591⟩](https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-04574591)

Annexe



Annexe A1 : Rapport pression/accélération des évènements hautes fréquences

[A2] :

Le résultat pour $\Phi = \phi_2 + \phi_3$ a été calculé pour observer les différences. Le résultat est le suivant :

$$\frac{p}{a} \Big|_{z=0} = \frac{i\rho c_0}{w \cos(i_2)} \quad (5)$$

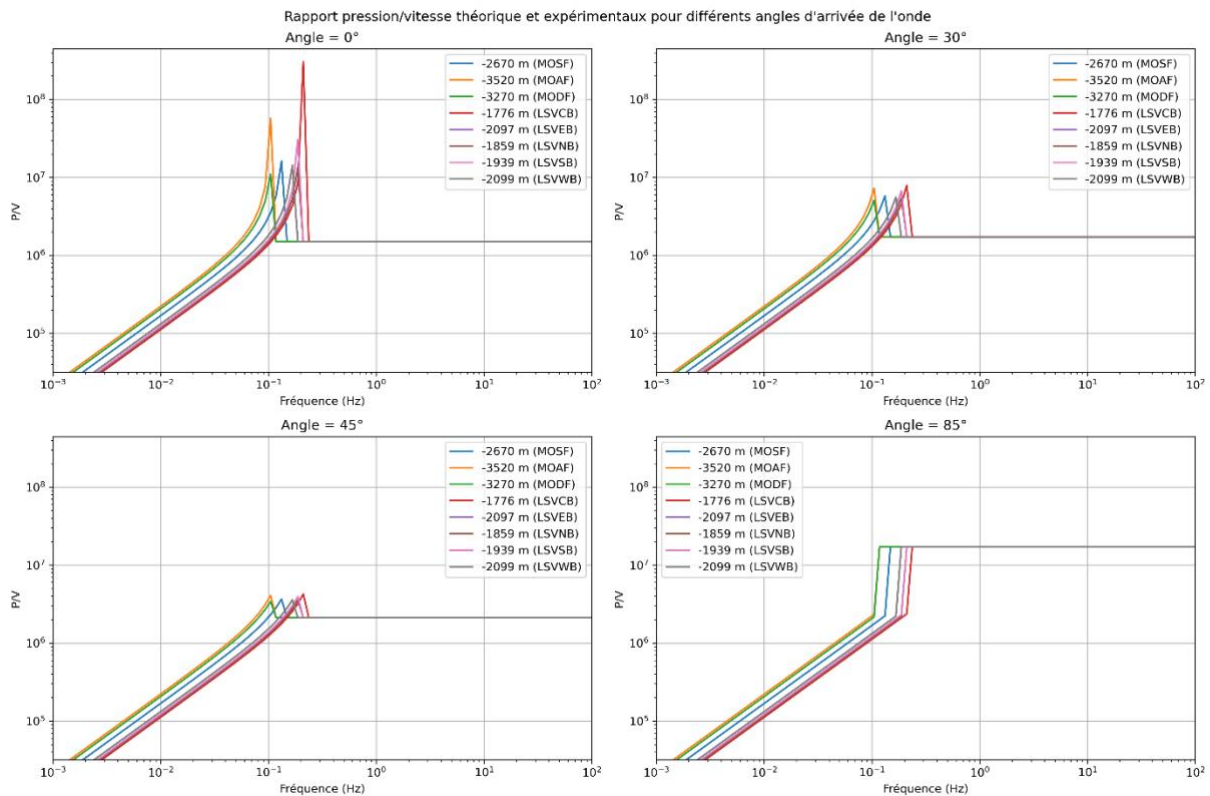
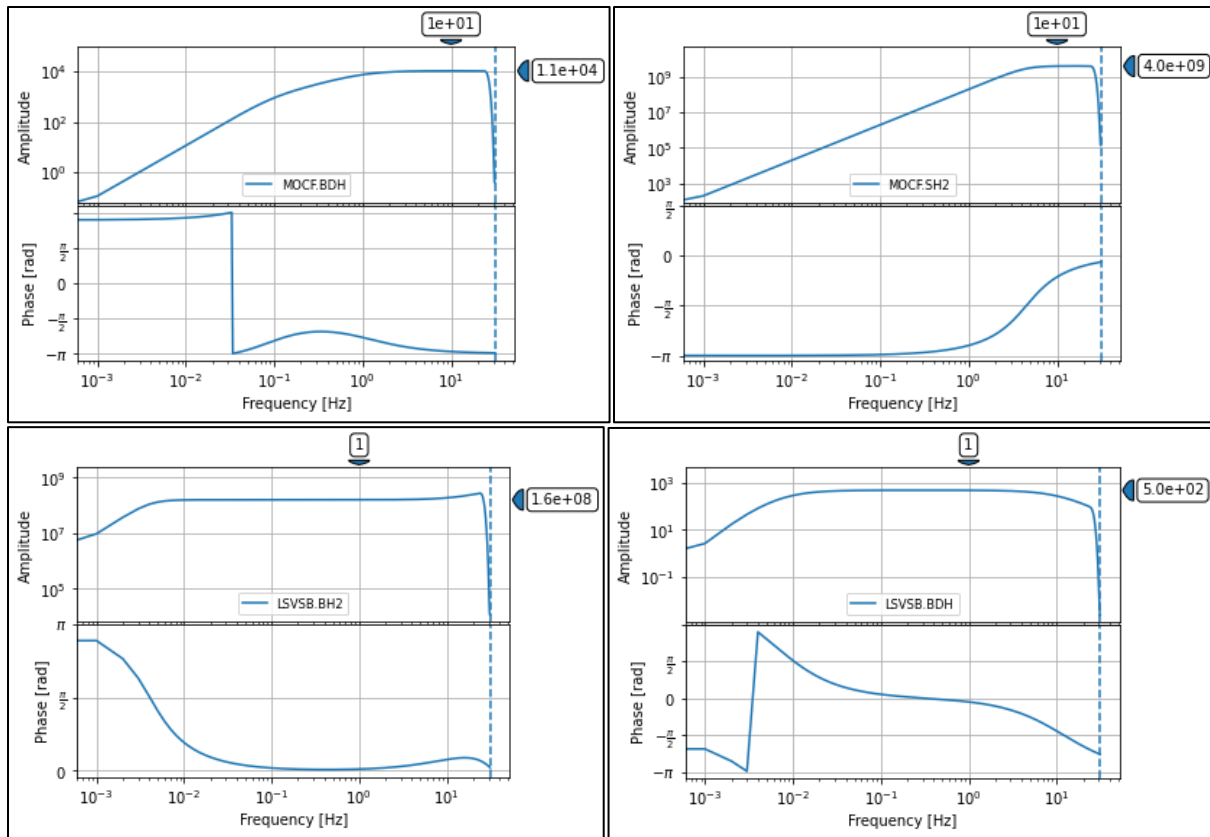


Figure A3 : Courbes théoriques du rapport Pression/Vitesse des stations sur lesquelles ont été enregistrés des évènements hautes fréquences pour les angles d'arrivées d'ondes suivants : 0°, 30°, 45°, 85°



Annexe A4 : Réponses instrumentales des capteurs du réseau 1T (MOCF) et de du réseau 4G (LSVSB)