



Usineur de précision / Intégrateur mécanique



Dossier de modélisation

OPTOGEO
MICROBAROMETRE OPTIQUE
Convention 132906058

LE TRANSDUCTEUR
ACOUSTO-
MECANIQUE

Groupe Glémot



FICHE D'ETAT

Version	Date	Motif de la modification
00	13/01/2014	Création
01	22/01/2014	
02	28/01/2014	
03		
04		
05		

Visa Rédacteur(s) : Anthony HUE	Visas Approbateurs : Serge OLIVIER Nathalie OLIVIER
------------------------------------	---

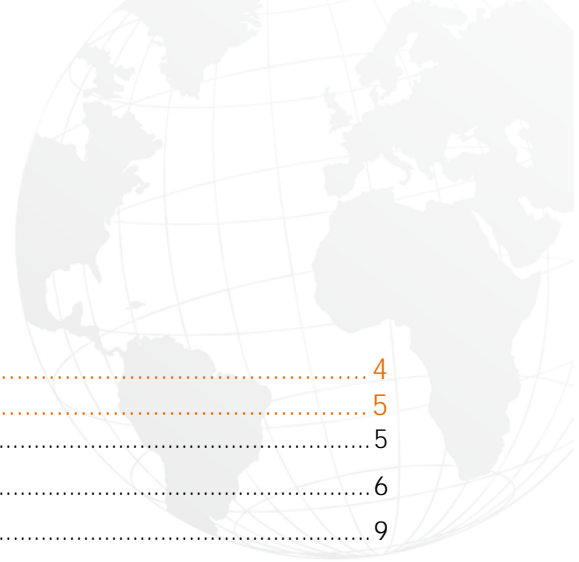


Table des matières

1	Lexique.....	4
2	INTRODUCTION	5
2.1.1	Contexte.....	5
2.1.2	Un peu d'historique.....	6
2.1.3	Le micro-baromètre optique.....	9
3	ETUDE DU TRANSDUCTEUR ACOUSTO-MECANIQUE.....	11
3.1	MESURE DES INFRASONS	14
3.1.1	Nature de la mesurande.....	14
3.1.2	Dynamique du capteur.....	14
3.1.3	Plage fréquentielle	14
3.1.4	Sources de bruit	14
3.2	PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR	15
3.2.1	Comportement mécanique du soufflet.....	15
3.2.2	Comportement acoustique de la cavité	24
3.2.3	Comportement acousto-mécanique de l'ensemble soufflet-cavité.....	28
3.3	Réflexion sur le dimensionnement de l'ensemble cavité-soufflet.....	31

Table des illustrations

Figure 1:	Système de surveillance international	5
Figure 2:	MB2000	6
Figure 3:	MB3 analogique et numérique	7
Figure 4:	Low Noise Model	7
Figure 5:	Synoptique du fonctionnement MB3 analogique et numérique	8
Figure 6:	Synoptique du micro-baromètre optique.....	10
Figure 7:	Ensemble bride - soufflet.....	15



1 LEXIQUE

CEA : Commissariat à l'Énergie Atomique et aux énergies alternatives

DASE : Direction des Applications Militaires, Sciences de la Terre et de l'Environnement

OTICE : Organisation du Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires

TICE : Traité d'Interdiction Complète des Essais nucléaires

R&D : Recherche et Développement

LVDT : Linear Variable Differential Transformer

LNM : Low Noise Model

MB : Microbaromètre

MB2000 : Microbaromètre des années 2000 appartenant au DASE

Mb 2005 : Microbaromètre des années 2005 appartenant au DASE

FO : Fibre Optique

IM : Interféromètre de Michelson



2 INTRODUCTION

2.1.1 Contexte

Le CEA développe depuis la fin des années 60 des technologies de détection dans le domaine de la mesure sismique et infrason. Historiquement, les premiers travaux sont menés dans le but de détecter et caractériser les explosions nucléaires aériennes. A la mise en place du traité d'interdiction complète des essais nucléaires (TICE) dans les années 90, un réseau mondial de détection se met progressivement en place. Ce réseau comprendra à terme 60 stations infrasons, de 4 à 8 capteurs chacune, réparties sur toute la planète.

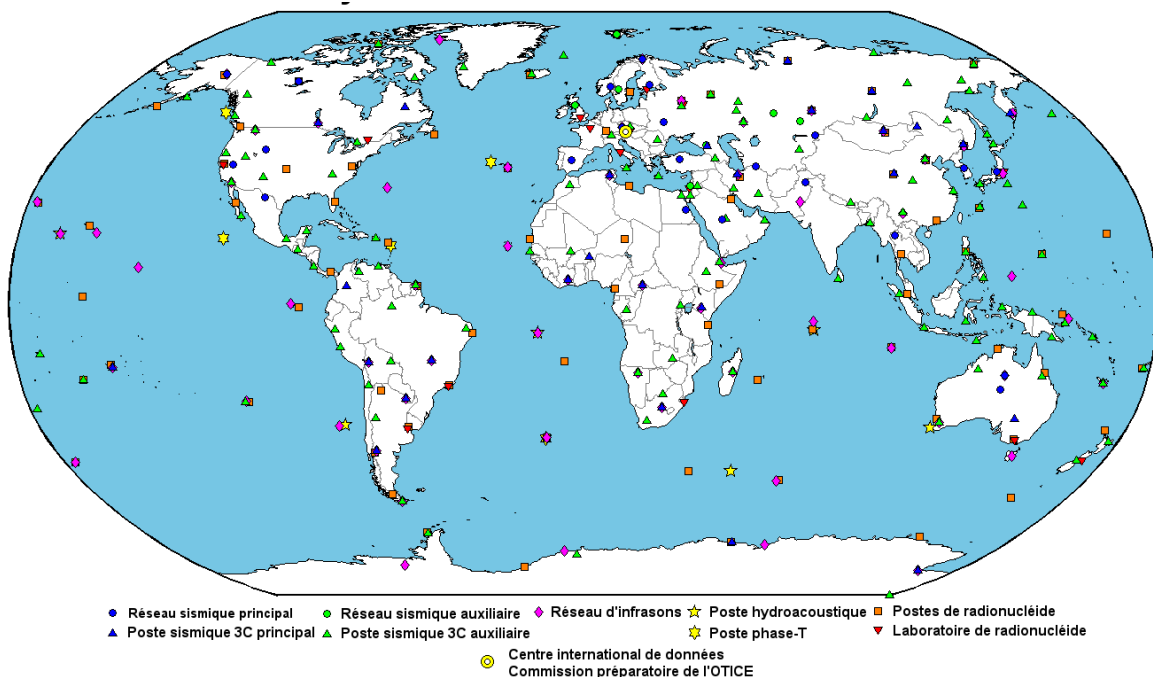


Figure 1: Système de surveillance internationale

Les microbaromètres développés par le CEA/DASE, et fabriqués par PROLANN, sont encore la référence mondiale du point de vue performance, en fiabilité et robustesse ainsi qu'en mesures BF. Après le MB 2000 qui a été largement diffusé mondialement dans le cadre de l'OTICE, le MB 2005 constitue la référence actuelle. Son successeur est le MB3, développé en version analogique et numérique, calibrable à distance et répondant aux contraintes du Low Noise Model.

Dans le cadre des évolutions des performances de ses capteurs géophysiques, le CEA a mis au point avec un partenaire industriel un transducteur optique de déplacement par interférométrie. Cette nouvelle brique technologique servira de base au projet que nous proposons.

Le projet présente une étude conjointe (3 partenaires) sur 36 mois permettant d'envisager les possibilités techniques de ce transducteur optique et d'évaluer les gains en performances comparativement aux dispositifs électriques traditionnels du type bobine-aimant, LVDT ou mesure capacitive.



Ces recherches pourront voir leur application à terme, non seulement pour les microbarmètres mais aussi pour les sismomètres. Le projet s'attachera essentiellement aux mesures en environnement réel pour l'évaluation et la validation du concept sur les microbaromètres qui sont très sensibles aux variations de température engendrant un bruit très basse fréquence.

2.1.2 Un peu d'historique...

3 générations de capteurs se sont succédées :

Années 90 -2010 : capteurs à technologie LVDT : Développement du MB 2000 qui a été largement diffusé mondialement dans le cadre de l'OTICE



Figure 2: MB2000

Après le MB 2000, le MB 2005 constitue la référence actuelle.

2010 : Son successeur le MB3 est basé sur une technologie bobine/aimant. Les données de sortie sont en dérivée de pression ou pression. Développé en version analogique et numérique, il est calibrable à distance et répond aux contraintes du Low Noise Model.

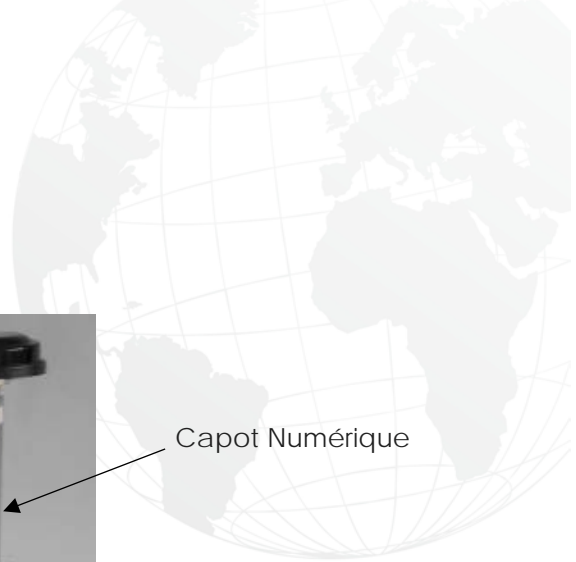


Figure 3: MB3 analogique et numérique

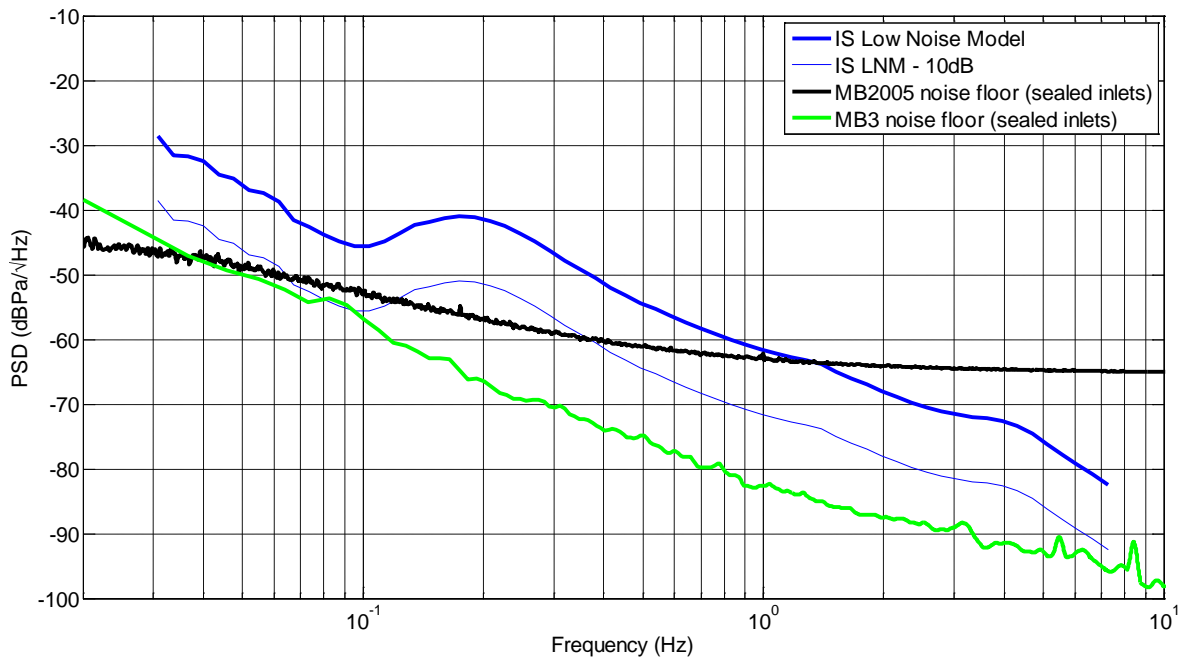
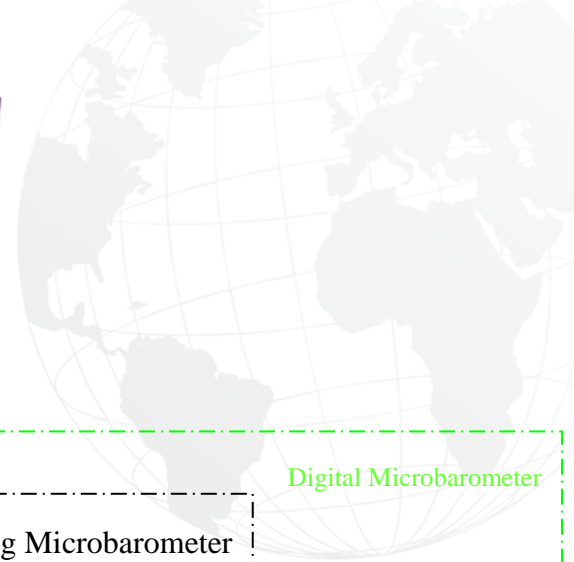


Figure 4: Low Noise Model



Synoptique de fonctionnement du MB3 actuel :

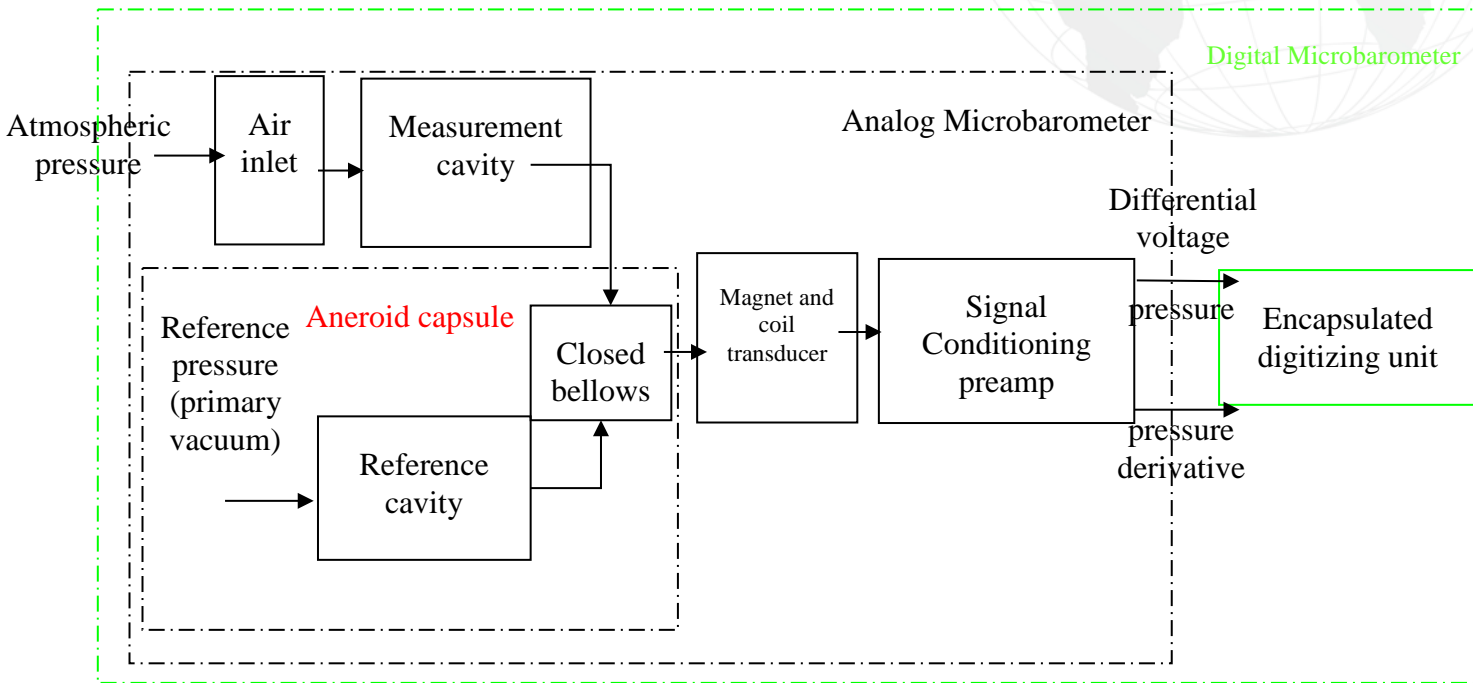


Figure 5: Synoptique du fonctionnement MB3 analogique et numérique



2.1.3 Le micro-baromètre optique

Le but de ce projet de R&D est de proposer une rupture technologique en terme de transducteur permettant de dépasser certaines des performances actuelles des microbaromètres large bande standards. Les axes d'amélioration espérés sont la résolution, la bande passante et la dynamique. Pour cela, il est envisagé d'associer un soufflet de microbaromètre avec un transducteur optique. Le soufflet est sensible à la pression tandis que le transducteur mesure les déplacements du soufflet directement représentatif des variations de pression.

Différents montages sont disponibles en interférométrie parmi lesquels on peut citer les montages de type Mach-zender, Fabry-Perrot ou Michelson.

Le CEA/DASE a entrepris depuis 2006 d'explorer les performances d'un interféromètre de Michelson pour des applications en géophysique. Le montage initial (maquette sur table) réalisé avec des composants optiques du commerce proposait une analyse en quadrature de phase pour améliorer la résolution du dispositif. Une voie d'analyse supplémentaire était disponible pour la correction des fluctuations de la source laser. Ce premier montage fonctionnait à la longueur d'onde de 635 nm dans le visible pour des facilités de réglage. Un second montage à 1550 nm a été réalisé dans la foulée pour bénéficier des composants télécom (prix réduit des composants, robustesse et durée de vie accrue). Ces études ont abouties à la réalisation d'un transducteur de déplacement optique sous forme de composant miniaturisé réalisé par la société TEEM Photonics sous licence CEA.

Les performances atteintes par ces dispositifs ont été très satisfaisants en termes de résolution et de dynamique. Nous avons par contre constaté une grande sensibilité vis-à-vis de la température de ce genre de montage.

Le projet consiste à définir le futur capteur à travers une étude de conception permettant d'assembler les différentes briques de base existantes, puis de réaliser un démonstrateur. L'électronique d'acquisition du signal est à prendre en considération ainsi que l'optimisation des traitements embarqués. Dans un premier temps une inter-comparaison sera menée entre un MB2005 standard constituant la référence actuelle dans le domaine de la mesure basse fréquence et un dispositif utilisant un interféromètre miniature. Après évaluation des performances, un concept de nouveau capteur sera proposé et prototypé.

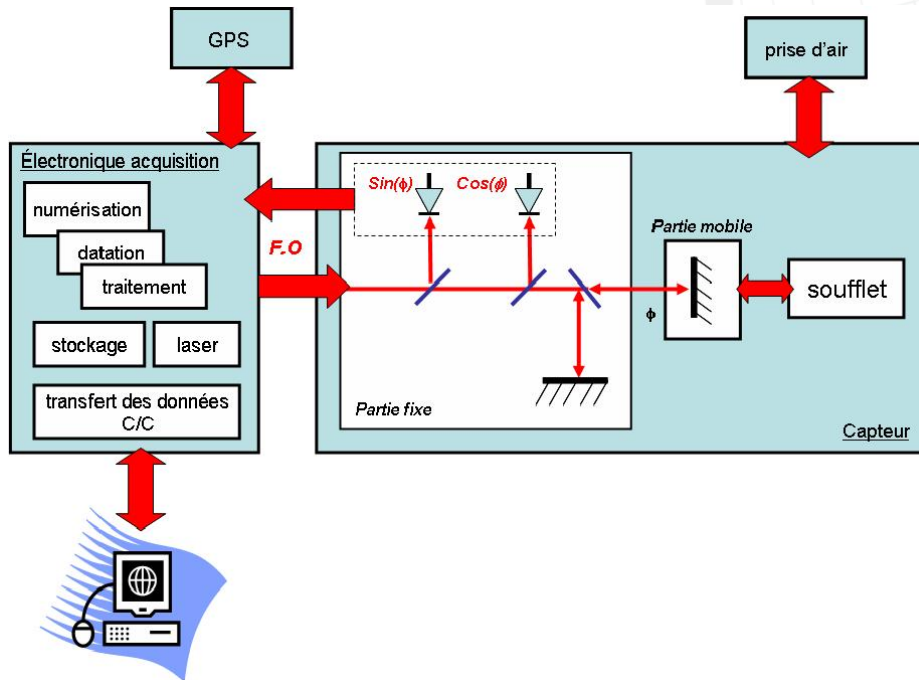


Figure 6: Synoptique du micro-baromètre optique



3 ETUDE DU TRANSDUCTEUR ACOUSTO-MECANIQUE

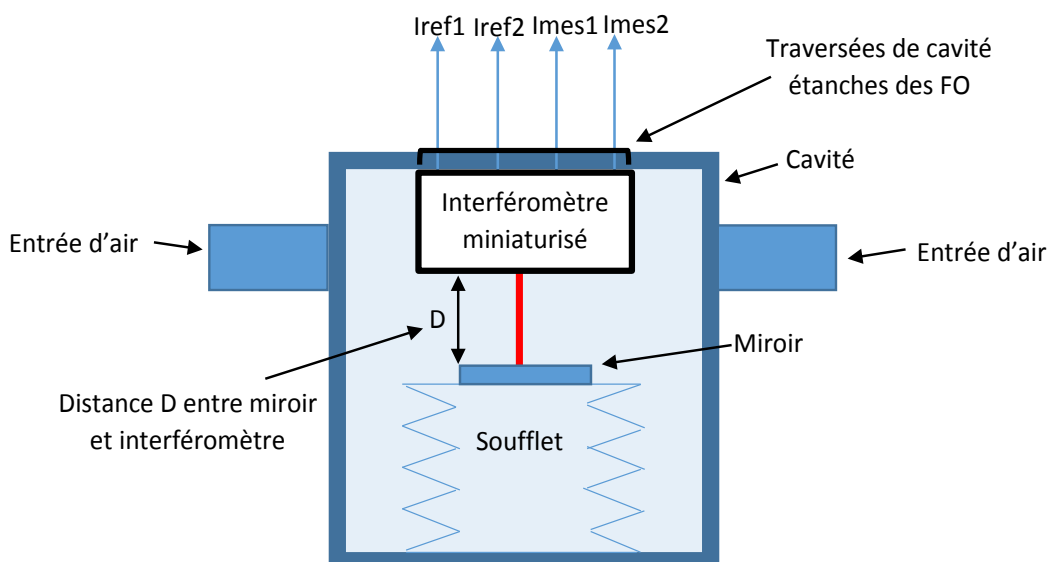
Problématiques de départ

Dans un premier temps, il est envisagé d'associer un soufflet déjà existant (MB2005 ou MB3) à l'interféromètre optique développé par TEEM PHOTONICS. L'ensemble sera placé dans une cavité connectée suivant les applications à un réseau de tubes permettant d'atténuer les différentes sources de bruits acoustiques externes.

Plusieurs configurations sont possibles :

La première et la plus simple à mettre en œuvre consiste à placer le miroir (associé à la voie de mesure optique de l'interféromètre) sur le côté mobile du soufflet à une distance D (voir schéma ci-dessous). Sur cette configuration les difficultés annoncées concernent d'une part, l'espace disponible pour l'intégration de l'interféromètre optique au sein d'une cavité déjà existante et d'autre part, la mise en œuvre de traversées de cavité étanches des fibres optiques (FO).

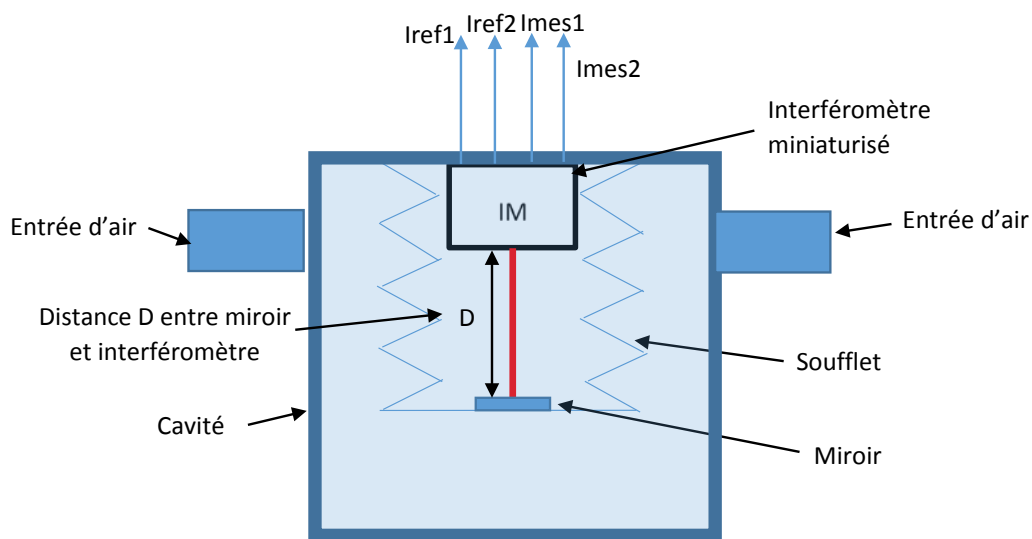
1ère configuration envisagée :



La seconde architecture serait d'intégrer l'interféromètre de Michelson (IM) à l'intérieur du soufflet. La partie optique serait ainsi confinée dans un espace sous vide primaire, ce qui aurait pour avantage de s'affranchir des perturbations extérieures comme des variations de température, de pression, d'humidité...etc.

Cette seconde solution imposera très probablement de développer un nouveau soufflet possédant à la fois des dimensions suffisantes pour intégrer l'interféromètre et les traversés étanches des FO. Ce nouveau soufflet devra posséder également des caractéristiques mécaniques répondant à des performances de détection acoustique souhaitées. Cette solution plus laborieuse sera donc étudiée dans un second temps.

2^{ème} configuration envisagée :



Cette première étude a donc pour objectif de prendre en compte l'ensemble des éléments de la chaîne de mesure acousto-mécanique afin de modéliser les différentes configurations envisagées.

C'est la phase de conception qui permettra de déterminer la configuration idéale pour positionner l'interféromètre et le soufflet. D'autres paramètres importants seront également à prendre en compte, notamment les variations de température appliquées aux différents composants : soufflet, bâti et miroir. Ces variations peuvent engendrer localement des dilatations sur les matériaux et ainsi perturber la mesure. Il pourra être envisagé de reprendre des solutions déjà existantes sur le MB2000 (mise en place de colonnettes « double matériaux » entre le soufflet et le bâti).



Cadre de l'étude

Dans un premier temps, il est important de connaître la nature de la mesurande, la dynamique de mesure du capteur et les sources de bruits potentielles.

La suite logique est de maîtriser le principe de fonctionnement d'un capteur (ensemble cavité - soufflet) existant afin d'en faciliter son évolution.

Après une présentation d'un microbaromètre existant, une première étude sera consacrée au comportement mécanique du soufflet :

- Bilan des principales caractéristiques mécaniques du soufflet
- Analyse du comportement statique et dynamique du soufflet
- Calcul et analyse fréquentielle de la fonction de transfert

Puis, une seconde étude sera dédiée au comportement acoustique de la cavité :

- Modèle acoustique
- Analyse du comportement fréquentielle de la cavité

De ces deux études une comparaison sera alors possible entre la fonction de transfert théorique de l'ensemble cavité - soufflet et les mesures à notre disposition.

Enfin, une dernière partie sera consacrée à une réflexion sur le futur dimensionnement de l'ensemble cavité - soufflet.



3.1 MESURE DES INFRASONS

3.1.1 Nature de la mesurande

Les ondes infrasonores sont des ondes élastiques dont les fréquences se situent en-dessous du domaine audible (<20 Hz), capables de se propager sur de grandes distances. Les ondes acoustiques se propagent par réflexions multiples sur les différentes couches de l'atmosphère et au sol, avec des vitesses de l'ordre de 330 m/s, plus ou moins aidées ou contrariées par les conditions atmosphériques en altitude. Certaines propagations peuvent bénéficier de guides d'onde notamment dans la stratosphère et la thermosphère. Enfin certaines sources infrasonores sont suffisamment puissantes (forte explosion volcanique ou nucléaire) pour secouer l'atmosphère en générant des ondes de gravité avec des périodes de quelques minutes. Ces propagations peuvent faire plusieurs fois le tour de la terre.

Les sources d'infrasons sont très variées. Elles sont d'origine naturelle (perturbations météorologiques, orages magnétiques, vents, houle océanique...), ou artificielles (explosions, avions supersoniques ...).

3.1.2 Dynamique du capteur

La résolution d'un micro-baromètre MB3 est donnée à 0,1 mPa. Suivant les conditions atmosphériques et l'altitude, la pression atmosphérique peut varier entre 350 hPa et 1150 hPa, soit 800 hPa de dynamique statique. Le capteur doit donc être capable de faire une mesure dans cette gamme de pression statique. Les micro-baromètres actuels ne disposent pas de cette performance, ce qui sera a priori possible avec un micro-baromètre optique. De plus, aucun réglage ne sera nécessaire comme cela peut être le cas sur un MB3 (ajustement de la position de l'aimant par rapport à la bobine).

3.1.3 Plage fréquentielle

Concernant, les fréquences des signaux mesurés, ils s'étendent approximativement de 0,1 mHz à 70 Hz. Ce qui nous permet par la relation $\lambda = \frac{c}{\nu}$ de donner des ordres de grandeurs concernant les longueurs d'ondes des phénomènes observés s'étendant de quelques mètres à plusieurs milliers de km. Nous reviendrons par la suite sur ces grandeurs qui permettent de considérer que notre capteur est un **système à constantes localisées**.

3.1.4 Sources de bruit

Lors de la mesure d'ondes de pression infrasonores de faible amplitude (< 1 Pa), les variations de pression générées par le vent peuvent masquer le signal à mesurer. L'amplitude de ces perturbations peut varier d'un facteur mille suivant les conditions de vent (< 1 mPa en absence de vent et > 1 Pa pour des vents moyens de l'ordre de 20 m/s). Pour réduire l'influence de cette source de bruit, des systèmes de filtrage peuvent être connectés aux embouts du capteur.



3.2 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT DU CAPTEUR

3.2.1 Comportement mécanique du soufflet

3.2.1.1 Présentation du transducteur acousto-mécanique

Le soufflet représente le transducteur acousto-mécanique sensible aux variations de pression. Celui-ci est constitué d'un empilement de disques fins et cloisonné à ces extrémités par deux brides.

La plus épaisse des brides est celle par laquelle le vide primaire est effectué. La valeur du vide P0 sert de référence et permet lors de la fabrication du soufflet d'obtenir une longueur d'équilibre approximativement égale pour tous les soufflets.

On obtient alors un composant au comportement similaire à celui d'un ressort, c'est-à-dire possédant une longueur d'équilibre et un comportement en compression linéaire.

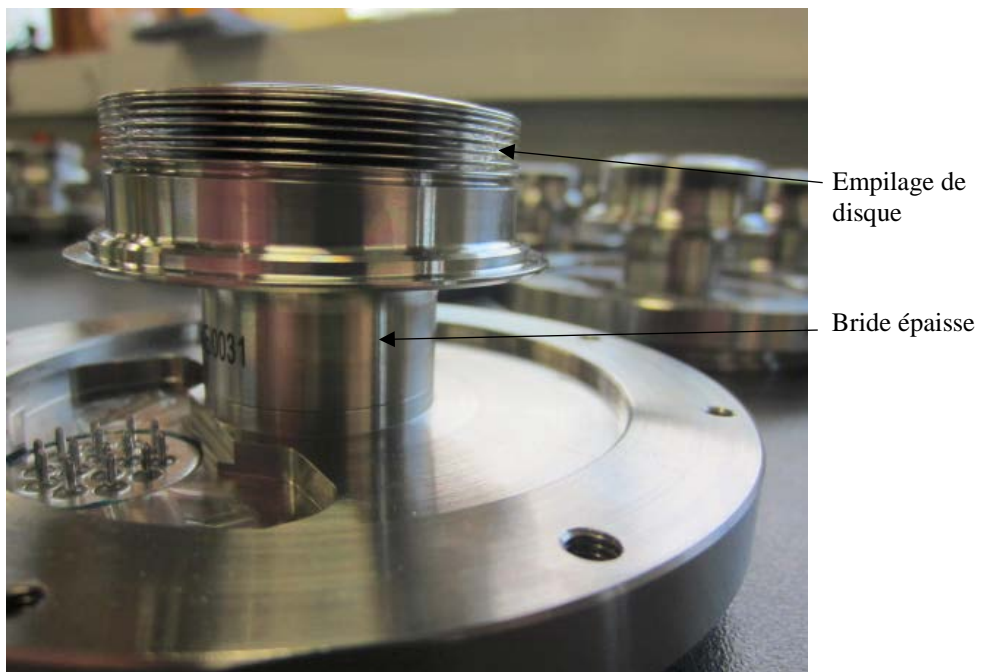


Figure 7: Ensemble bride - soufflet



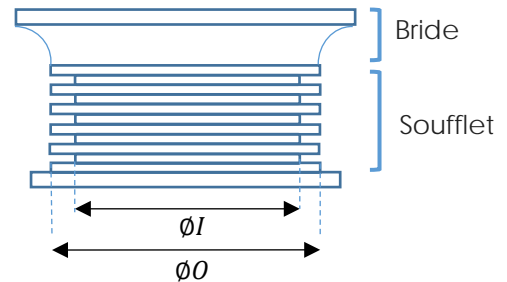
3.2.1.2 Les principales caractéristiques mécanique du soufflet

- La surface effective du soufflet

C'est la surface (en m²) du soufflet qui va effectivement engendrer un effort lié à la différence de pression entre l'intérieur et l'extérieur.
Celle-ci est définie par l'expression suivante :

$$S(\text{en m}^2) = \frac{\pi}{4} \left(\frac{O + I}{2} \right)^2$$

O : représente le diamètre extérieur du soufflet
I : diamètre intérieur du soufflet



Dans le cas du MB3, la surface effective du soufflet est de 10,13 cm².

- Le volume sous-vide de la capsule (ensemble soufflet bride)

Le volume sous vide V₀ (en m³) du soufflet est le volume d'air qu'il contient lorsque le vide primaire a été réalisé dans le soufflet. Ce volume inclut l'air compris dans le soufflet et dans la bride.

- La raideur acoustique du soufflet

La raideur acoustique K_{acous} caractérise l'effort exercé sur le soufflet par la différence de pression de part et d'autre de celui-ci. Cette raideur dépend de la surface effective, du coefficient de compressibilité de l'air et du volume sous vide V₀.
Son expression est donnée par

$$K_{acous} (\text{en N/m}) = S \times \frac{\rho c^2}{V_0}$$

Avec ρc^2 le coefficient de compressibilité de l'air.

- La raideur mécanique du soufflet

La raideur mécanique K_{méca} est liée au matériau et aux dimensions propres du soufflet.

$$K_{meca} (\text{en N/m}) = 4.3. \left(\frac{E. (O + I)t^3}{(O - I - t)^3 N} \right)$$

Avec E : le module d'Young du matériau, N : le nombre d'ondes du soufflet et t : l'épaisseur de la paroi du soufflet, O et I représentent respectivement le diamètre extérieur et intérieur du soufflet.



▪ La raideur totale du soufflet

La raideur totale du soufflet est la somme des raideurs acoustique et mécanique.

$$K_{TOT}(\text{en N/m}) = K_{meca} + K_{acous}$$

Dans le cas du MB3, la raideur du soufflet est donnée à 12350 N/m.

▪ La masse mobile

Etant donné l'architecture du soufflet, il est difficile d'estimer la masse mobile. En effet, il y a d'une part, la masse de la bride (partie fixe) et d'autre part un empilage de disques (dans le cas d'une MB3) qui constitue la partie sensible et mobile.

Théoriquement, la masse mobile peut être évaluée. Elle est donnée à 14,5 g pour le soufflet du MB3.

Nous pouvons d'ores et déjà distinguer trois paramètres physiques important qui caractérisent le soufflet :

- La surface effective
- La raideur totale
- La masse mobile

Ci-dessous sont indiquées les valeurs associées au soufflet intégré sur les MB3 et sur les MB2005 :

Pour le MB3 :

- La surface effective : 10,13 cm²
- La raideur totale : 12350 N/m
- La masse mobile : 14,5g

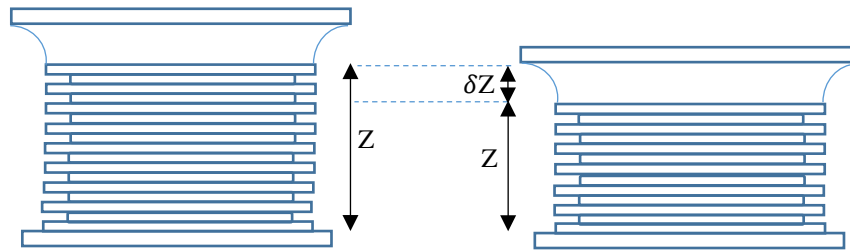
Pour le MB2005 :

- La surface effective : 16 cm²
- La raideur totale : 46400 N/m
- La masse mobile : 67,3 g

Remarques : ces valeurs seront utilisées par la suite pour établir leurs fonctions de transfert.

3.2.1.3 Analyse du comportement statique et dynamique du soufflet

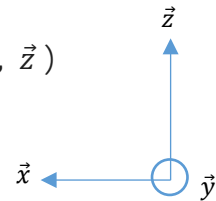
Pour comprendre le principe de fonctionnement du soufflet, nous allons tout d'abord dresser un bilan des forces qui s'exercent sur sa masse mobile afin d'appliquer par la suite le principe fondamentale de la statique et de la dynamique. Ci-dessous sont représentés l'état statique et dynamique du soufflet :



Soufflet au repos

Soufflet comprimé

$$R = (O, \vec{x}, \vec{y}, \vec{z})$$



Force due à l'écart de pression entre l'extérieur et l'intérieur du soufflet

Le soufflet est un volume cloisonné à l'intérieur duquel est réalisé un vide primaire. Il subit donc à chacune de ces extrémités un effort proportionnel à la section effective S du soufflet et à la différence de pression δP entre le vide réalisé et l'atmosphère.

$$\overrightarrow{F_{P_{ext} \rightarrow G}} = -S \cdot (P_m - P_0) \vec{z}$$

Force due à la pesanteur

Dans le référentiel R , l'action de la pesanteur sur la masse mobile du soufflet est constante.

$$\overrightarrow{F_{pesanteur \rightarrow G}} = -M \cdot g \cdot \vec{z}$$



Force due à la raideur métallique du soufflet

Le soufflet se comporte comme un ressort, il possède une position à l'équilibre z_0 et une position en compression z . La force résultante est donc proportionnelle à cette compression et à sa raideur mécanique.

$$\overrightarrow{F_{K_{meca} \rightarrow G}} = -K_{meca} \cdot (z - z_0) \vec{z}$$

Force due à la raideur acoustique du soufflet

La différence de pression entre l'extérieur et l'intérieur du soufflet engendre une variation de l'effort exercé sur le soufflet.

$$\overrightarrow{F_{K_{acous} \rightarrow G}} = -K_{acous} \cdot (z - z_0) \vec{z}$$

Force due aux frottements

Nous considérons que les actions d'amortissement peuvent être caractérisées par un effort d'amortissement visqueux suivant l'axe vertical.

$$\overrightarrow{F_{\xi}} = -C \dot{z} \cdot \vec{z}$$

A partir de ce bilan de forces nous pouvons désormais étudier le comportement statique puis dynamique du soufflet.

Appliquons tout d'abord le principe fondamental de la statique :

On considère une absence de mouvement du sol et une pression extérieure correspondant à une pression d'équilibre $P_m = P_{m_{equi}}$.

On applique le PFS sur la masse mobile en projection sur l'axe des \vec{z} :

$$\begin{aligned} (\overrightarrow{F_{K_{acous} \rightarrow G}} + \overrightarrow{F_{K_{meca} \rightarrow G}} + \overrightarrow{F_{Pesanteur \rightarrow G}} + \overrightarrow{F_{P_{ext} \rightarrow G}}) \cdot \vec{z} &= 0 \\ -K_{meca} \cdot (z - z_0) - K_{acous} \cdot (z - z_0) - M \cdot g - S \cdot (P_m - P_0) &= 0 \end{aligned}$$

En posant

$$K = K_{acous} + K_{meca}$$

Il est alors possible d'établir l'expression de la longueur d'équilibre sous une pression extérieure donnée :

$$Z_{\text{équi}} = Z_0 - \frac{M \cdot g + S \cdot (P_{m_{\text{équi}}} - P_0)}{K}$$

Appliquons maintenant le principe fondamental de la dynamique :

On considère que le soufflet possède un seul degré de liberté qui est la translation de la masse mobile suivant l'axe vertical \vec{z} . Les mouvements du sol sont désormais pris en compte.

$$\left(\overrightarrow{F_{K_{\text{acous}} \rightarrow G}} + \overrightarrow{F_{K_{\text{méca}} \rightarrow G}} + \overrightarrow{F_{P_{\text{esanteur}} \rightarrow G}} + \overrightarrow{F_{P_{\text{ext}} \rightarrow G}} + \overrightarrow{F_{\xi \rightarrow G}} \right) \cdot \vec{z} = M(\ddot{z} + \ddot{z}_{\text{sol}})$$

$$-K_{\text{méca}} \cdot (z - z_0) - K_{\text{acous}} \cdot (z - z_0) - M \cdot g - S \cdot (P_{\text{ext}} - P_0) - C\dot{z} = M(\ddot{z} + \ddot{z}_{\text{sol}})$$

En posant

$$K = K_{\text{acous}} + K_{\text{méca}}$$

$$P_m - P_0 = P_m - P_{m_{\text{équi}}} + P_{m_{\text{équi}}} - P_0$$

On obtient

$$M \cdot \ddot{z} + C\dot{z} + K \cdot z = -S \cdot (P_m - P_{m_{\text{équi}}}) - M \cdot \ddot{z}_{\text{sol}} + K \left[Z_0 - \frac{M \cdot g + S \cdot (P_{m_{\text{équi}}} - P_0)}{K} \right]$$

En posant :

$$\delta P_m = P_m - P_{m_{\text{équi}}} \quad \text{et} \quad \delta z = z - Z_0$$

Et en utilisant la notation complexe il vient :

$$\delta z = \left[\frac{M}{K} \cdot (j\omega)^2 + \frac{C}{K} \cdot (j\omega) + 1 \right] = -\frac{S}{K} \cdot \delta P_m - \frac{M}{K} \cdot \ddot{z}_{\text{sol}}$$



Ce qui permet d'obtenir une expression de la variation de la longueur du soufflet en fonction de la variation de pression extérieure :

$$\delta z = - \frac{\frac{S}{K} \cdot \delta P_m + \frac{M}{K} \cdot z_{sol}''}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_0} + \left(\frac{jw}{w_0}\right)^2}$$

Avec

$$W_0^2 = \frac{K}{M} \text{ et } \xi = \frac{C}{2\sqrt{KM}}$$

W_0 : pulsation de résonance

ξ : coefficient d'amortissement avec C donnée à 0,592

Pour simplifier l'étude de cette fonction, il est intéressant de l'écrire de cette manière :

$$\delta z = - \frac{\frac{S}{K} \cdot \delta P_m}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_0} + \left(\frac{jw}{w_0}\right)^2} - \frac{\frac{M}{K} \cdot z_{sol}''}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_0} + \left(\frac{jw}{w_0}\right)^2}$$

On distingue ainsi deux termes importants :

Un premier qui définit la sensibilité mécanique du soufflet aux variations de pressions extérieures.

Un second qui définit la sensibilité mécanique du soufflet à l'accélération du sol.

Dans un premier temps, nous allons considérer que les mouvements du sol sont négligeables.

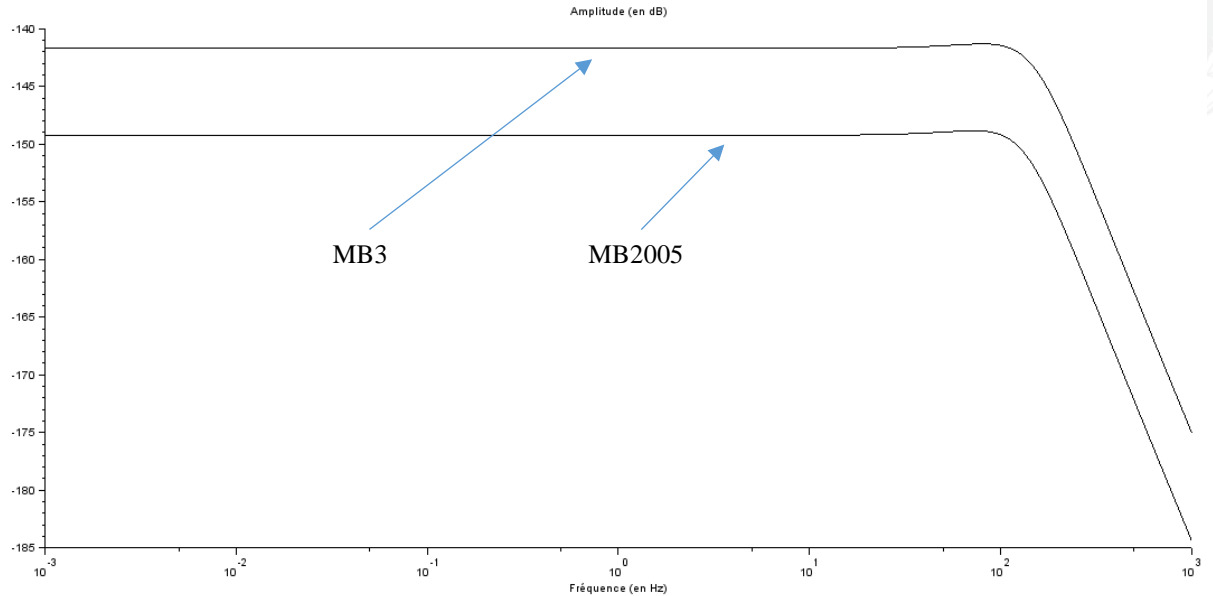
Nous avons donc la fonction de transfert suivante :

$$H_1(jw) = - \frac{\frac{S}{K}}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_0} + \left(\frac{jw}{w_0}\right)^2}$$

Cette fonction de transfert nous permet de tracer le diagramme de Bode en gain de la sensibilité mécanique du soufflet (MB3 et MB2005) aux variations de pressions extérieures.

Pour le tracé de ces courbes, les valeurs des différentes caractéristiques techniques (surface effective, raideur et masse) du soufflet cité au 3.2.1.2 ont été utilisées.

Courbes de gain :



Observations :

Sur la courbe de gain du MB3 on relève :

- Une valeur de -141,7dB, soit une sensibilité mécanique d'environ 82 nm/Pa dans la zone plate.
- Une fréquence de coupure à -3 dB de 159Hz.

Sur la courbe de gain du MB2005 on relève :

- Une valeur de -149,3dB, soit une sensibilité mécanique d'environ 34,2 nm/Pa dans la zone plate.
- Une fréquence de coupure à -3 dB de 151Hz.

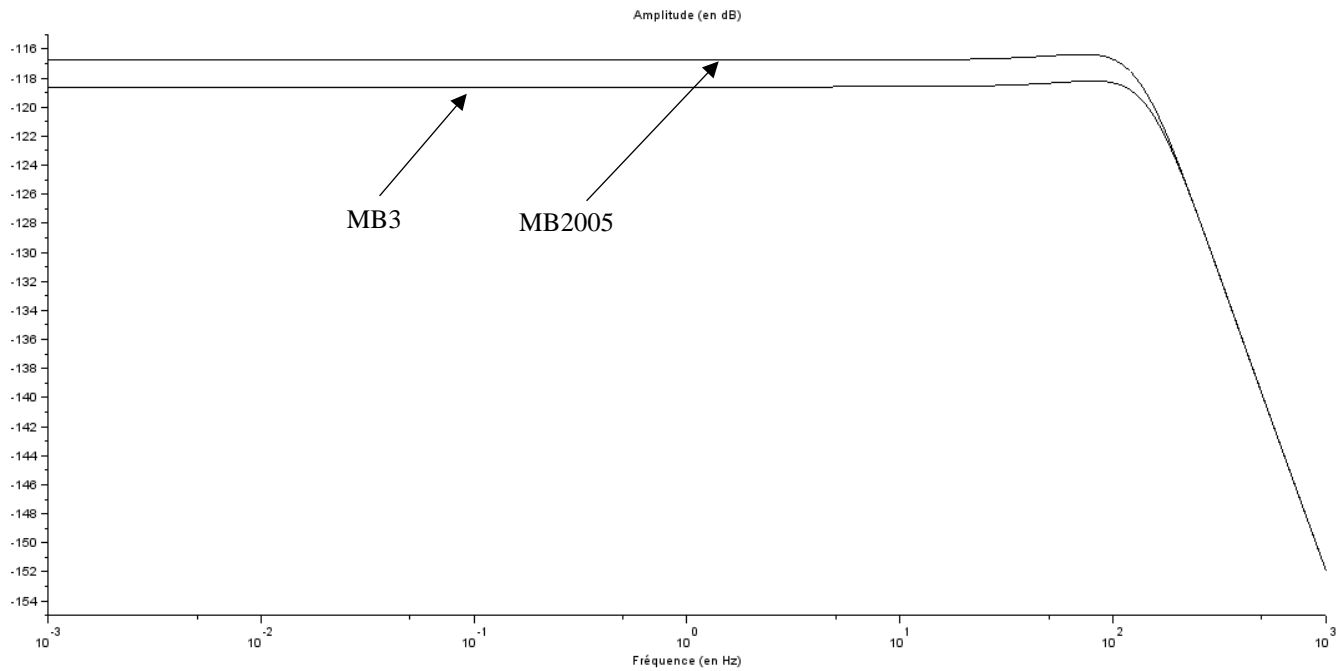
Nous allons maintenant prendre en compte les mouvements liés aux déplacements du sol caractérisés par l'expression suivante :

$$H_2(jw) = - \frac{\frac{M}{K}}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_0} + \left(\frac{jw}{w_0}\right)^2}$$

Cette fonction de transfert nous permet de tracer le diagramme de Bode en gain pour un soufflet MB3 et MB2005.

Pour le tracé de ces courbes, les valeurs des différentes caractéristiques techniques (surface effective, raideur et masse) du soufflet cité au 3.2.1.2 ont été utilisées.

Courbes de gain :



Sur la courbe de gain du MB3 on relève :

- Une valeur de -118,3 dB, soit une sensibilité mécanique à l'accélération du sol de **1,21 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{s}^2$** .
- Une fréquence de coupure à -3 dB de 169Hz.

Sur la courbe de gain du MB2005 on relève :

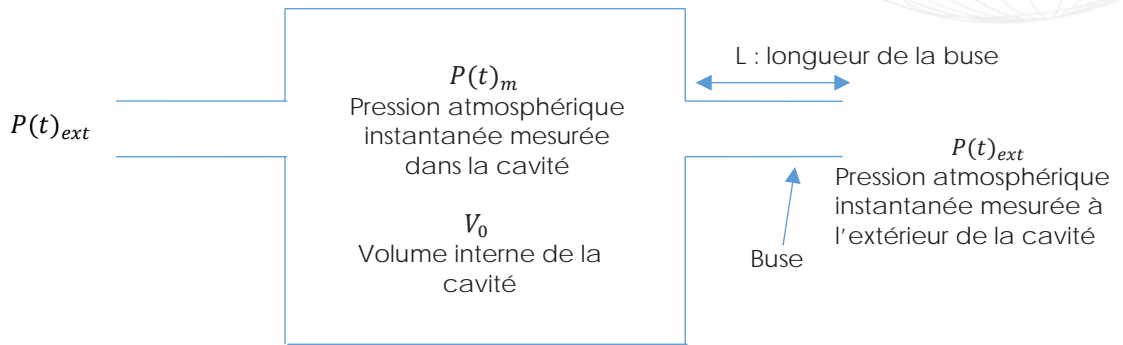
- Une valeur de -116,7 dB, soit une sensibilité mécanique à l'accélération du sol de **1,46 $\mu\text{m}/\text{m}\cdot\text{s}^2$** .
- Une fréquence de coupure à -3 dB de 151Hz.

Jusqu'ici, seul le comportement du soufflet a été étudié. Comme nous l'avons vu précédemment, ce soufflet est intégré dans une cavité où la mesure est réalisée.



3.2.2 Comportement acoustique de la cavité

3.2.2.1 Illustration d'une cavité existante



Remarque : cette cavité comprend un volume interne statique et 4 buses d'une longueur d'environ 5 cm.

3.2.2.2 Modèle acoustique

Dans la partie 3.1, il a été précisé que notre capteur est un système à constantes localisées. Cet état indique que les dimensions du capteur sont petites par rapport aux longueurs d'onde des signaux infrasons mesurés. Par conséquent, les grandeurs des champs (pression et vitesse) aux points considérés (distant d'une distance d proche de celle des dimensions du capteur) sont égales en valeur instantanée. Les variations spatiales de ces grandeurs physiques ne sont donc plus liées à celle du temps.

Pour étudier et modéliser le comportement d'un système acoustique dans ces conditions, il est alors possible de partir des relations de couplage mécano-acoustique :

$$\text{Force (en N)} = \text{Surface} \times \text{Pression}$$

$$\text{vitesse (en m/s)} = \frac{q}{S} = \frac{\text{débit volumique}}{\text{Surface}}$$

Ces relations font apparaître les composants acoustiques suivants :

- **La compliance acoustique C_a (en m^3/Pa)** : est un composant délimitant une portion de fluide subissant un changement d'état.

$$C_a = \frac{V_c}{P_0}$$

V_c : volume interne de la cavité (en m^3)
 P_0 : pression interne de la cavité (en Pa)



- **La résistance acoustique R_a ($\text{Pa}\cdot\text{s}/\text{m}^3$)** : est un composant idéal, siège d'une transformation d'énergie acoustique en une autre forme telle que la chaleur.

$$m_a = \frac{\rho \cdot V}{S^2}$$

V : dans notre cas, volume interne de la buse (en m^3)

ρ : masse volumique de l'air de $1,293 \text{ Kg}/\text{m}^3$

S : dans notre cas, surface interne de la buse (en m^2)

- **La masse acoustique m_a (en Kg/m^4)** : est un composant idéal délimitant une portion de fluide en mouvement oscillatoire et se comportant comme un solide indéformable.

$$R_a = \frac{4 \cdot \pi \cdot \eta}{S^2} \cdot L$$

η : coefficient de viscosité de l'air qui vaut $18,6 \cdot 10^{-6}$

L : longueur de la buse (en m)

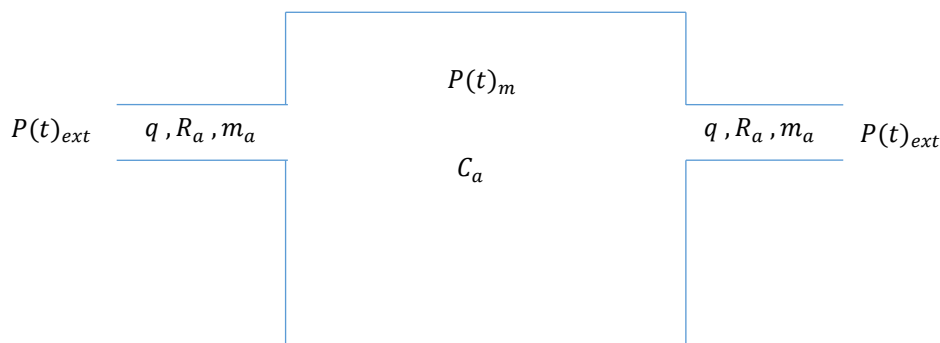
S : dans notre cas, surface interne de la buse (en m^2)

Ces composants ont une analogie directe avec les composants mécaniques ou électriques. Par exemple, dans le système électrique, on a les similitudes suivantes :

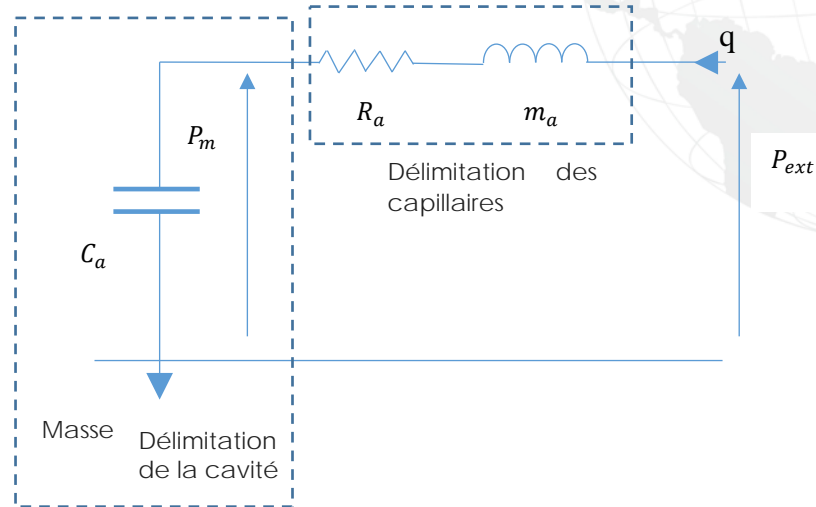
- La compliance acoustique correspond à une capacité.
- La résistance acoustique à une résistance électrique
- La masse acoustique à une inductance.

3.2.2.3 Analyse du comportement fréquentielle de la cavité

A partir des composants acoustiques vus précédemment, nous pouvons représenter symboliquement une cavité existante de la manière suivante :



Ce qui donne le schéma acoustique suivant :



A partir de ce schéma, nous pouvons en déduire les équations suivantes :

$$P_{cavité} = \frac{q}{j \cdot \omega \cdot C_a}$$

$$P_{ext} - P_{cavité} = (R_a + j\omega \cdot m_a) \cdot q$$

Ce qui nous donne la relation suivante entre la pression extérieure et la pression de la cavité :

$$\frac{P_{ext}}{P_m} = \frac{1}{1 + 4 \cdot C_a \cdot R_a \cdot j\omega + 4 \cdot m_a \cdot C_a \cdot (j\omega)^2}$$

En posant

$$\omega_{0c} = \frac{1}{2\sqrt{m_a \cdot C_a}}$$

$$\xi_c = \frac{R_a \cdot C_a}{\sqrt{m_a \cdot C_a}}$$

ω_{0c} : pulsation de résonance

ξ_c : coefficient d'amortissement

On obtient la fonction de transfert suivante pour la cavité :

$$\frac{P_{ext}}{P_m} = \frac{1}{1 + 2 \cdot \xi_c \cdot \frac{j\omega}{\omega_{0c}} + \left(\frac{j\omega}{\omega_{0c}}\right)^2}$$



Cette fonction de transfert nous permet de tracer le diagramme de Bode en gain pour une cavité MB3 et MB2005.

Pour tracer ces diagrammes, les valeurs suivantes ont été prises :

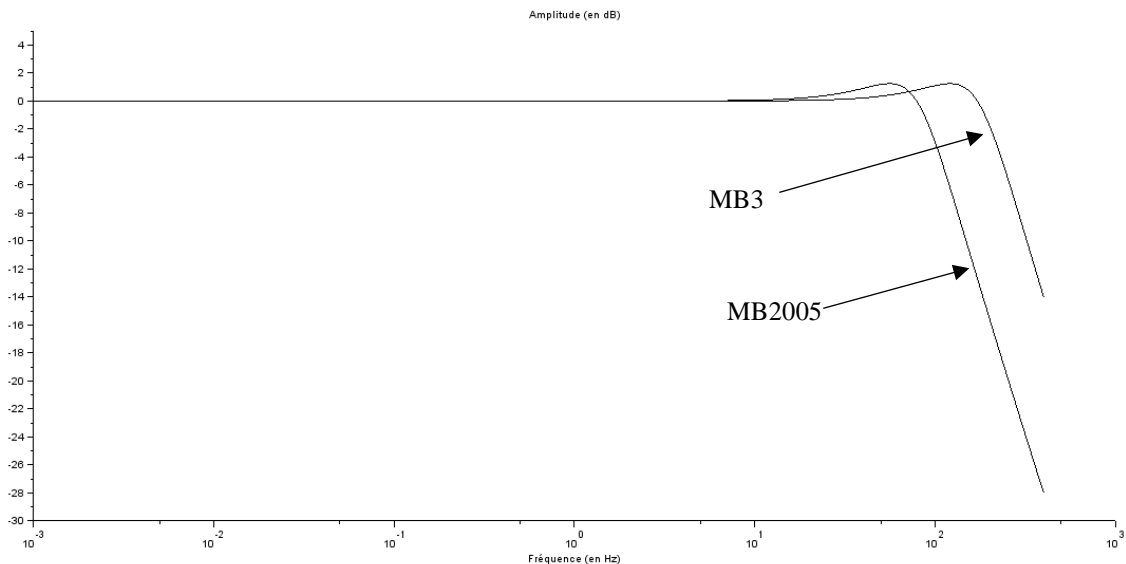
Pour le MB3 :

- o Volume interne de la cavité : $1,31 \cdot 10^{-4}$ m³
- o Pression interne de la cavité : 101325 Pa
- o Rayon interne des buses : 6,5 mm
- o Longueur des buses : 5 cm

Pour le MB2005 :

- o Volume interne de la cavité : $6,2 \cdot 10^{-4}$ m³
- o Pression interne de la cavité : 101325 Pa
- o Rayon interne des buses : 6,5 mm
- o Longueur des buses : 5 cm

Courbes de gain :



Observations :

Sur la courbe de gain du MB3 on relève :

- Une valeur de 0 dB dans la zone plate.
- Une fréquence de coupure à -3 dB de 159Hz.

Sur la courbe de gain du MB2005 on relève :

- Une valeur de 0 dB dans la zone plate.
- Une fréquence de coupure à -3 dB de 151Hz.

Pour les 2 courbes, on constate que le gain est de 0 dB dans une certaine plage de fréquence. Cela signifie que la cavité n'a aucune influence sur les grandeurs de champs. Autrement dit, pour cette plage de fréquence, la pression extérieure est égale à la pression interne de la cavité en valeur instantanée. On est bien dans le cas d'un système à constantes localisées.



3.2.3 Comportement acousto-mécanique de l'ensemble soufflet-cavité

Les deux études réalisées précédemment, nous ont permis d'obtenir les fonctions de transfert associées respectivement au soufflet et à la cavité :

Fonction de transfert du soufflet :

$$\delta z = - \frac{\frac{S}{K} \cdot \delta P_m}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{j\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2} - \frac{\frac{M}{K} \cdot z_{sol}''}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{j\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Fonction de transfert de la cavité :

$$\frac{P_m}{P_{ext}} = \frac{1}{1 + 2 \cdot \xi_c \cdot \frac{j\omega}{\omega_{0c}} + \left(\frac{j\omega}{\omega_{0c}}\right)^2}$$

Dans l'expression de la fonction de transfert du soufflet, nous avons δP_m qui est défini par :

$$\delta P_m = P_m - P_{m_{\text{equi}}}$$

Avec P_m : pression atmosphérique instantanée mesurée

Et $P_{m_{\text{equi}}}$: pression atmosphérique mesurée à l'équilibre

En utilisant maintenant l'expression de la fonction de transfert de la cavité, on obtient la relation suivante :

$$\delta P_m = \frac{1}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_{0c}} + \left(\frac{jw}{w_{0c}}\right)^2} \cdot (P_{ext} - P_{ext_{\text{equi}}})$$

$$d'ou \delta P_m = \frac{1}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_{0c}} + \left(\frac{jw}{w_{0c}}\right)^2} \cdot \delta P_{ext}$$

Nous pouvons désormais établir une relation globale qui lie la variation de la longueur du soufflet en fonction de la variation de pression extérieure à la cavité :

$$\delta z = - \frac{\frac{S}{K} \cdot \delta P_{pext}}{\left[1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_0} + \left(\frac{jw}{w_0}\right)^2\right] \cdot \left[1 + 2 \cdot \xi_c \cdot \frac{jw}{w_{0c}} + \left(\frac{jw}{w_{0c}}\right)^2\right]} - \frac{\frac{M}{K} \cdot z_{sol}''}{1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_0} + \left(\frac{jw}{w_0}\right)^2}$$

En l'absence de mouvements du sol, nous obtenons une fonction de transfert globale qui s'écrit :

$$H_G(jw) = - \frac{\frac{S}{K}}{\left[1 + 2 \cdot \xi \cdot \frac{jw}{w_0} + \left(\frac{jw}{w_0}\right)^2\right] \cdot \left[1 + 2 \cdot \xi_c \cdot \frac{jw}{w_{0c}} + \left(\frac{jw}{w_{0c}}\right)^2\right]}$$

Avec :

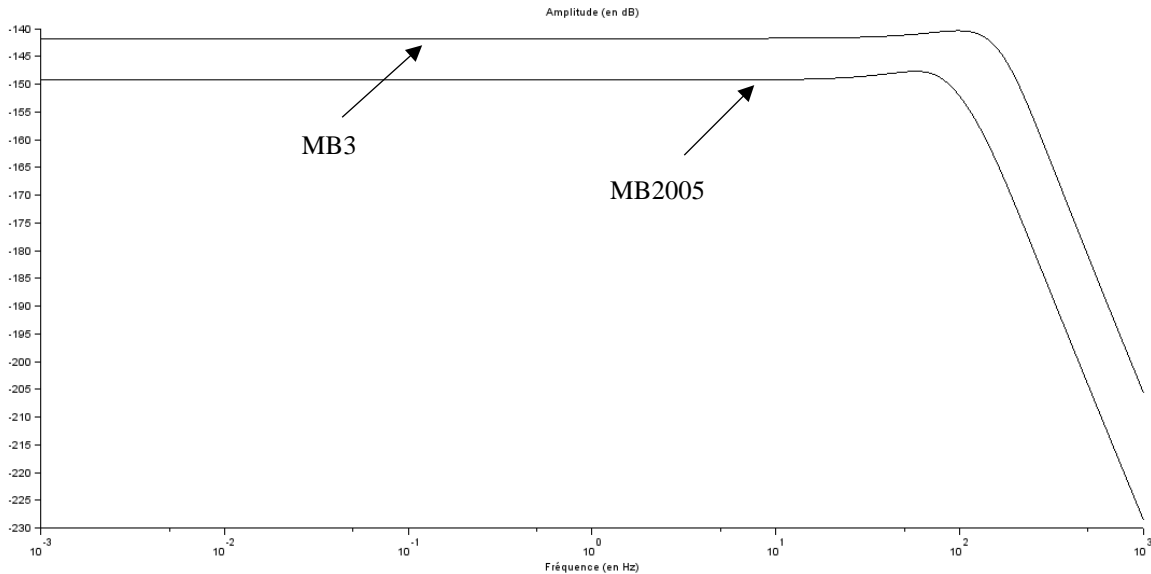
- w_0 : pulsation de résonance du soufflet
- ξ : coefficient d'amortissement associé au soufflet
- w_{0c} : pulsation de résonance de la cavité
- ξ_c : coefficient d'amortissement associé à la cavité

Nous pouvons désormais tracer le diagramme de Bode en gain de cette fonction de transfert globale pour le MB3 et le MB2005.

Pour le tracé de ces courbes de gain, nous reprenons les valeurs indiquées au 3.2.1.2 (associées aux soufflets MB3 et MB2005) et les valeurs indiquées au 3.2.2.3 (associées aux cavités MB3 et MB2005).

Ci-dessous les diagrammes de Bode en gain pour le MB3 et le MB2005 :

Courbe de gain :



Observations :

Au vu de l'allure de ces deux courbes, on constate que l'ensemble soufflet-cavité se comporte comme un filtre passe-bas.

Sur la courbe de gain on relève:

Sur la courbe de gain du MB3 on relève :

- Une valeur de -141,7dB, soit une sensibilité mécanique d'environ 82 nm/Pa dans la zone plate.
- Une fréquence de coupure à -3 dB de 154,88 Hz.

Sur la courbe de gain du MB2005 on relève :

- Une valeur de -149,3dB, soit une sensibilité mécanique d'environ 34,2 nm/Pa dans la zone plate.
- Une fréquence de coupure à -3 dB de 100 Hz.

Afin de valider ce modèle numérique, une comparaison a été effectuée avec une fonction de transfert obtenue par la mesure. Cette comparaison a été réalisée sur un MB2005.

Les résultats s'avèrent cohérents avec une sensibilité de 34,2 nm/Pa obtenue par le modèle numérique et une sensibilité de 40 nm/Pa obtenue par la mesure.

On peut donc conclure que ce modèle numérique est une bonne base de départ pour le dimensionnement du futur capteur optique.



3.3 Réflexion sur le dimensionnement de l'ensemble cavité-soufflet

Cette première approche théorique nous a permis d'appréhender le principe de fonctionnement d'un capteur existant. Cette étude s'est limitée à la cavité et au soufflet qui représente la partie de détection acousto-mécanique du capteur.

A travers ce travail, il a été identifié les paramètres physiques qui caractérisent la cavité et le soufflet.

Pour le soufflet :

- o sa raideur
- o sa surface effective
- o sa masse mobile

Pour la cavité :

- o son volume interne
- o le volume interne des conduits

Tous ces paramètres imposeront les performances suivantes du capteur :

- o Une sensibilité mécanique du soufflet aux variations de pressions extérieures.
- o Une sensibilité mécanique à l'accélération du sol.
- o Une fréquence de résonance associée au soufflet et à la cavité
- o Un coefficient d'amortissement associé au soufflet et à la cavité

Cette première étude acousto-mécanique des micro-baromètres du DASE, nous a permis de comprendre le principe de fonctionnement de l'ensemble soufflet - cavité. Cette analyse nous a permis, d'une part, d'identifier les paramètres d'influences qui dimensionnent le soufflet et la cavité. D'autre part, elle nous a permis d'élaborer un modèle numérique générique pouvant être utilisé pour différentes générations de micro-baromètres (MB2000, MB2005 ou MB3).

Le développement de cet outil est une bonne base pour la phase de conception où probablement, il sera nécessaire de modifier certains paramètres physiques.

Dans ce modèle numérique, il n'a pas été pris en compte d'autres grandeurs d'influences telles que des variations en températures (ou en pression) qui peuvent engendrer localement des dilatations sur les matériaux. Ces effets peuvent ainsi perturber la mesure.

Une étude théorique de l'influence de ces grandeurs physiques sur le futur capteur n'est pas triviale. Une caractérisation en température sera donc effectuée sur les différents éléments qui composeront le micro-baromètre optique.



Usineur de précision / Intégrateur mécanique



Références bibliographiques :

- Mario Rossi (2007) AUDIO_Presses Polytechniques et universitaires romandes
- D.Ponceau and L.BOSCA (2010)_Infrasound Sensors
- D.Ponceau (2004)_Etude Paramétrique de la capsule anéroïde du microbaromètre MB2000

Source internet :

- Site du DASE :
http://www.dase.cea.fr/public/dossiers_thematiques/microbarometres/description