




Laboratoire national de métrologie et d'essais





**Méthode de réciprocité :
caractérisation de petits composants acoustiques
et étalonnage des microphones en pression et en
champ libre**

Dominique Rodrigues
(CIFRE LNE)

Responsables :
M. Bruneau, A.-M. Bruneau (LAUM)
J.-N. Durocher, C. Guianvarc'h (LNE)

Introduction

■ La métrologie au LNE

- ✓ La métrologie fondamentale
 - Développement et maintien des étalons nationaux de référence
- ✓ La **métrologie industrielle**
 - Prestations de services à usage des industriels, des professionnels de la santé et de l'environnement
- ✓ La métrologie légale
 - Conformité des instruments de mesure vis-à-vis de la réglementation

■ Activités du département Acoustique

- ✓ **Etalonnages et vérifications**
 - **Microphones**, sonomètres, calibreurs, exposimètres, audiomètres, **oreilles artificielles ...**
- ✓ Participation aux commissions de **normalisation**
- ✓ **Participation aux études internationales** : comparaisons clés du BIPM, projets Euramet ...

Introduction

■ Etudes internationales (2005-2008)

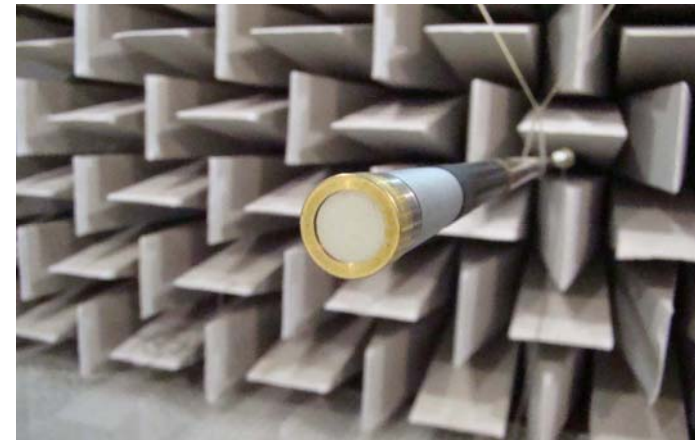
✓ **Audiométrie**

- Mesure de l'impédance acoustique de l'**oreille artificielle**
- **Etude Euramet 791** (NPL, DPLA, PTB, LNE, GUM)



✓ **Etalonnage primaire** des microphones étalons

- Etalonnage des microphones en **champ libre** par la méthode de **réciprocité**
- **Comparaison clé** du BIPM CCAUV.A-K4 (DPLA, CENAM, LNE, INMETRO, KRIS, NMIJ, PTB)



Plan

- **Méthode de la **réciprocité****
- **Méthode de la **réciprocité** en **champ libre****
 - ✓ **Etalonnage en **champ libre** des microphones par la méthode de la **réciprocité****
 - Perturbations électrique et acoustique, filtrage, résultats et incertitudes
 - ✓ **Centre acoustique d'un microphone électrostatique**
 - Méthodes analytique et expérimentale
- **Méthode de la **réciprocité** en **pression****
 - ✓ **Méthode de **mesure d'impédance** de petits éléments acoustiques**
 - Fente annulaire plate, tubes et cavités
 - ✓ **Etalonnage en **pression** des microphones**
 - Modèle du microphone
 - Modélisation globale du système d'étalonnage
 - Effet de la forme du champ de pression sur l'efficacité

Plan

- **Méthode de la **réciprocité****
- **Méthode de la réciprocité en champ libre**
 - ✓ Etalonnage en champ libre des microphones par la méthode de la réciprocité
 - Perturbations électrique et acoustique, filtrage, résultats et incertitudes
 - ✓ Centre acoustique d'un microphone électrostatique
 - Méthodes analytique et expérimentale
- **Méthode de la réciprocité en pression**
 - ✓ Méthode de mesure d'impédance de petits éléments acoustiques
 - Fente annulaire plate, tubes et cavités
 - ✓ Etalonnage en pression des microphones
 - Modèle du microphone
 - Modélisation globale du système d'étalonnage
 - Effet de la forme du champ de pression sur l'efficacité

Méthode de la réciprocité

■ Etalonnage primaire des microphones étalons

- ✓ Trois microphones dont deux **réiproques**

■ Grandeurs à déterminer

- ✓ **Mesure électrique :**
admittance électrique de transfert

$$Y_E = i_e / u_{r0}$$

i_e : courant alimentant le microphone émetteur

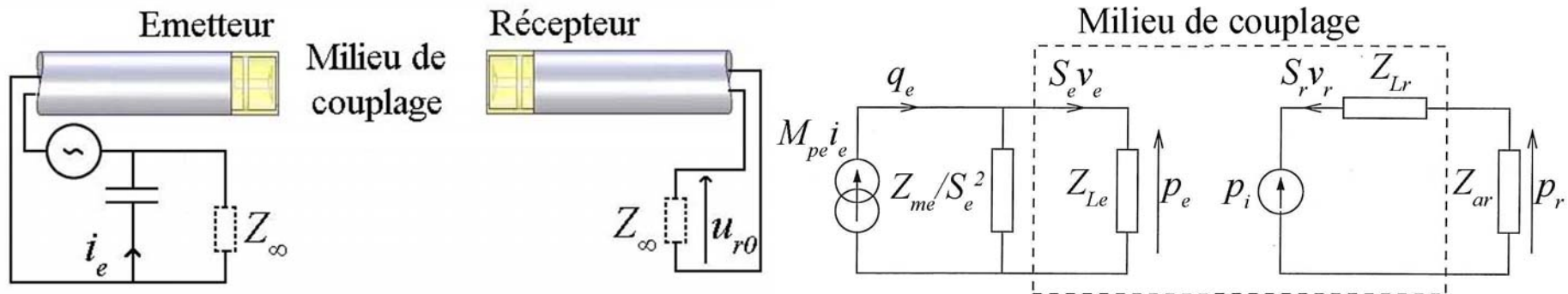
u_{r0} : tension à circuit ouvert aux bornes du microphone récepteur

- ✓ **Modélisation :**
admittance acoustique de transfert

$$Y_T = q_e / p_r$$

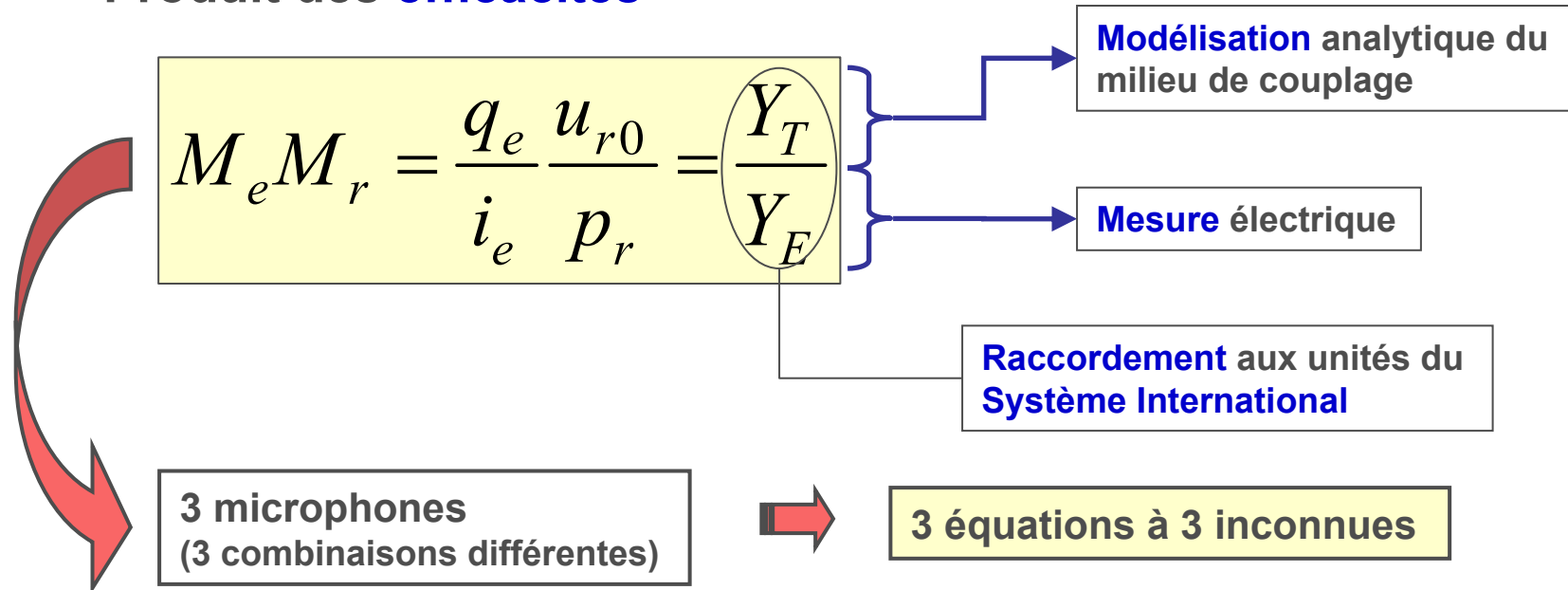
q_e : débit de la membrane de l'émetteur en court-circuit acoustique

p_r : pression sur la membrane du microphone récepteur



Méthode de la réciprocité

■ Produit des efficacités



■ Applications

- ✓ Etalonnage des microphones en **champ libre** (Norme CEI 61094-3)
- ✓ Etalonnage des microphones en **pression** (Norme CEI 61094-2)
- ✓ Mesure d'impédance acoustique de petits éléments

Plan

- Méthode de la réciprocité
- Méthode de la **réciprocité en champ libre**
 - ✓ **Etalonnage en champ libre** des microphones par la méthode de la **réciprocité**
 - Perturbations électrique et acoustique, filtrage, résultats et incertitudes
 - ✓ Centre acoustique d'un microphone électrostatique
 - Méthodes théorique et expérimentale
- Méthode de réciprocité en pression
 - ✓ Méthode de mesure d'impédance de petits éléments acoustiques
 - Fente annulaire plate, tubes et cavités
 - ✓ Etalonnage en pression des microphones
 - Modèle du microphone
 - Modélisation globale du système d'étalonnage
 - Effet de la forme du champ de pression sur l'efficacité

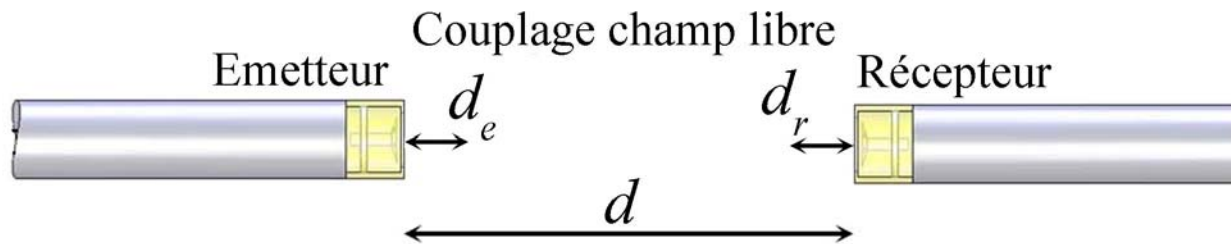
Etalonnage des microphones en champ libre

- Produit des **efficacités** en **champ libre** de deux microphones

$$M_{ffe} M_{ffr} = \frac{Y_T}{Y_E}$$

Modélisation
Mesure

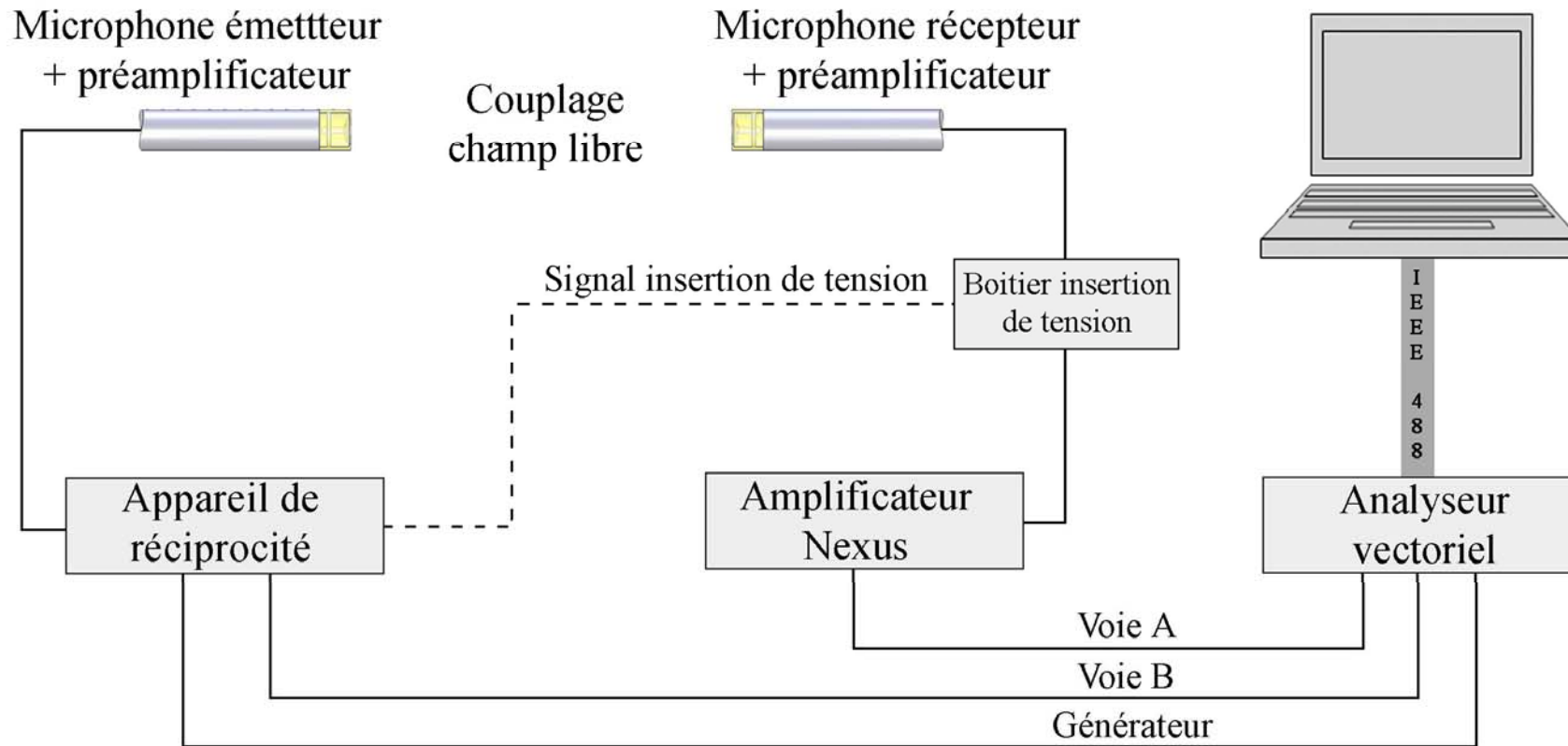
$$Y_T = \frac{2(d - d_e - d_r)}{j\rho_0 f} e^{jk_0(d - d_e - d_r)}$$



d_e, d_r : position du centre acoustique / membrane

Etalonnage des microphones en champ libre

■ Dispositif expérimental



Imperfections du dispositif

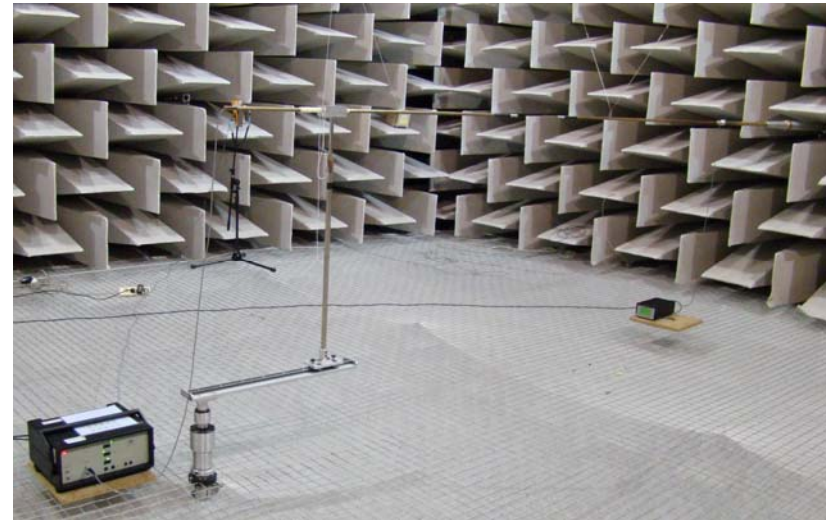


Perturbations des signaux

Etalonnage des microphones en champ libre

■ Sources de perturbations

- ✓ **Bruits** électrique et acoustique
- ✓ **Diaphonie**
- ✓ **Échos**
 - Parois
 - Perturbation du champ par la présence des microphones
 - Autres objets

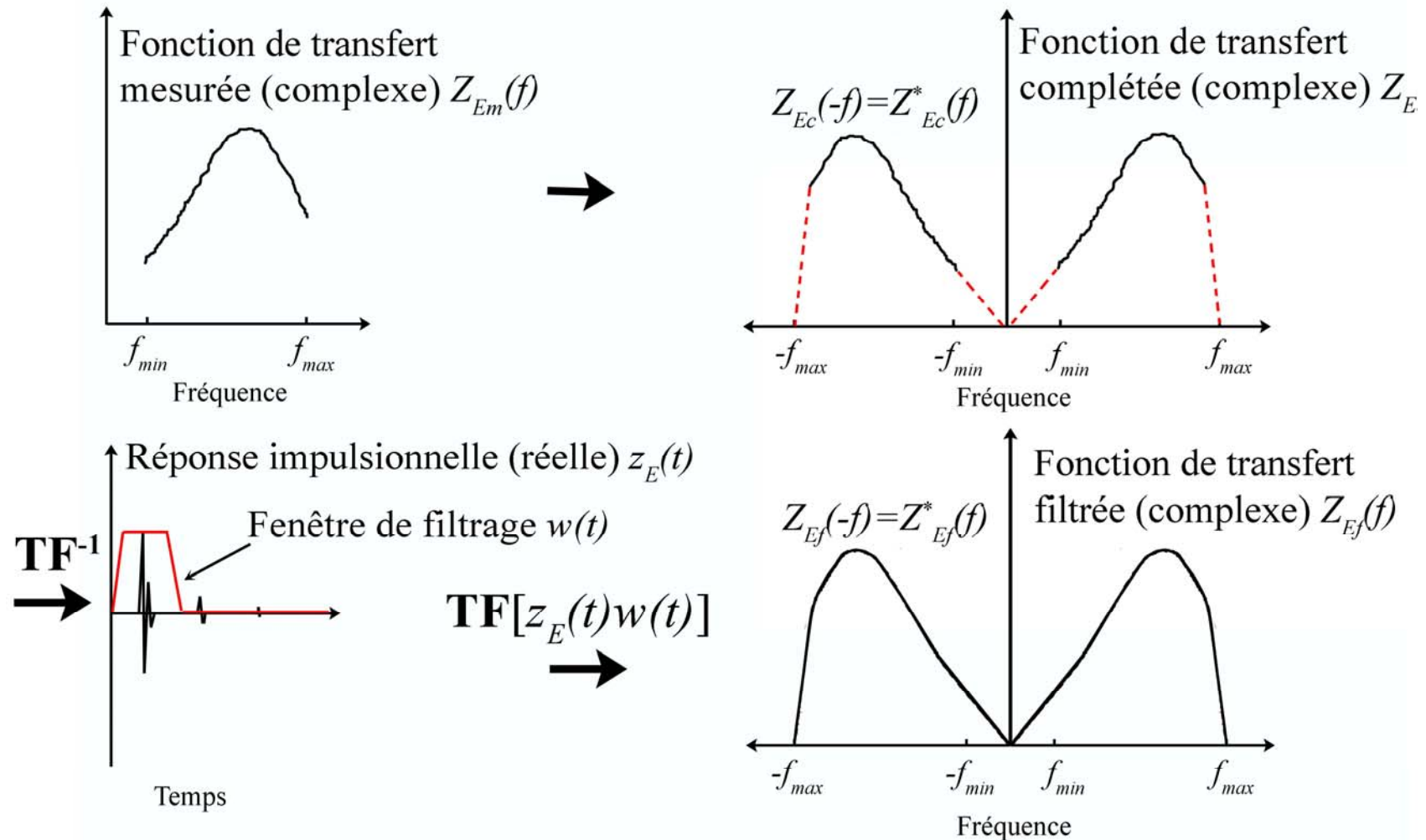


Perturbations caractérisées par leurs **chemins acoustiques**
(à l'exception des bruits électrique et acoustique)

Utilisation d'une procédure de **filtrage**

Etalonnage des microphones en champ libre

Procédure de filtrage



Etalonnage des microphones en champ libre

■ Procédure de **filtrage**

✓ **Théorème** de la **convolution**

$$TF[z_E(t)w(t)] = Z_E(f) * W(f)$$

Filtrage direct des fonctions de transfert par **convolution**

■ Filtrage des fonctions de transfert : **prétraitement**

(Microphones 1/2")

Impédance électrique de transfert mesurée en champ libre

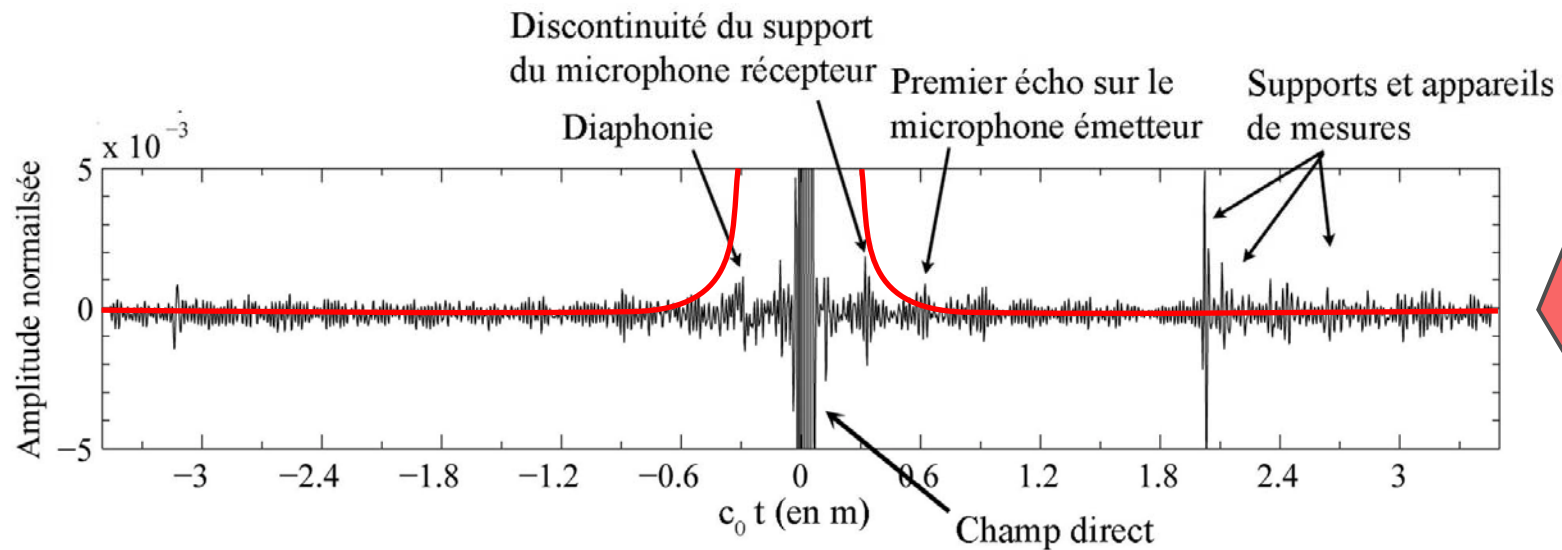
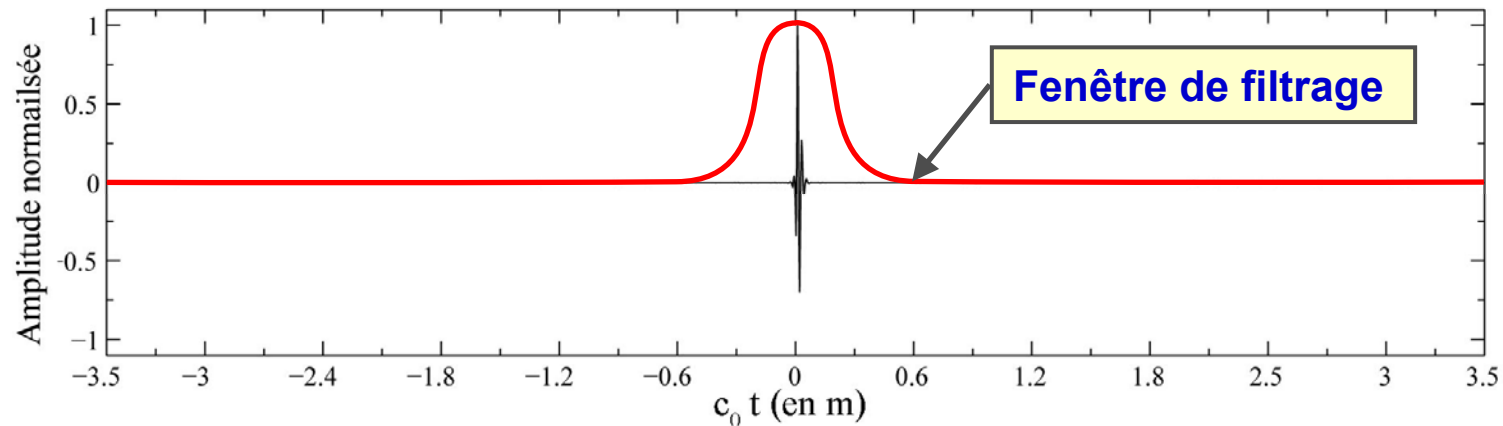
$$M_{ffe} M_{ffr} = Z_E \frac{2(d - d_e - d_r)}{j\rho_0 f} e^{jk_0(d - d_e - d_r)}, \quad \forall f > 1\text{kHz},$$

$$M_{ffe} M_{ffr} = M_{pe} M_{pr} \Delta_{ff}^2, \quad \forall f < 1\text{kHz},$$

Coefficient champ libre

Etalonnage des microphones en champ libre

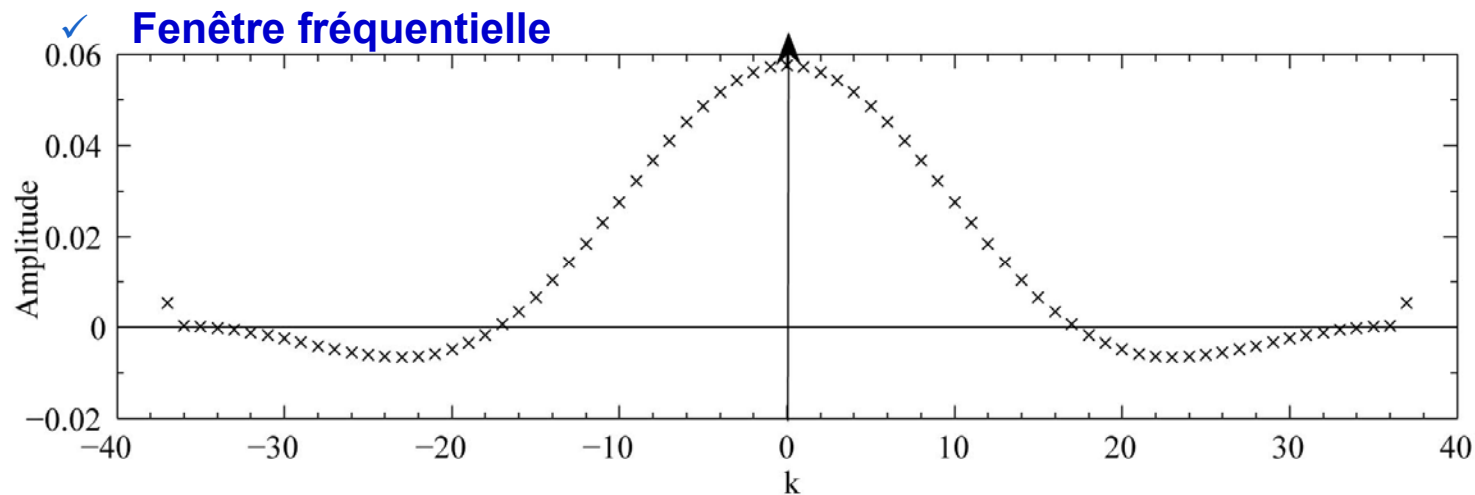
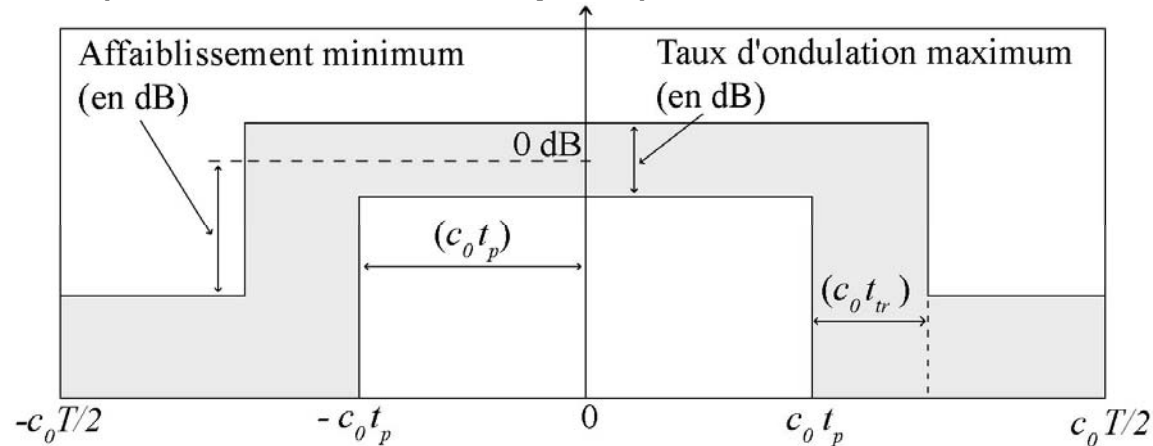
- Identification des perturbations : $h(t) = TF^{-1} [M_{ff e} M_{ff r}]$



Etalonnage des microphones en champ libre

■ Synthèse de la **fenêtre de filtrage** : méthode itérative (méthode de Remez)

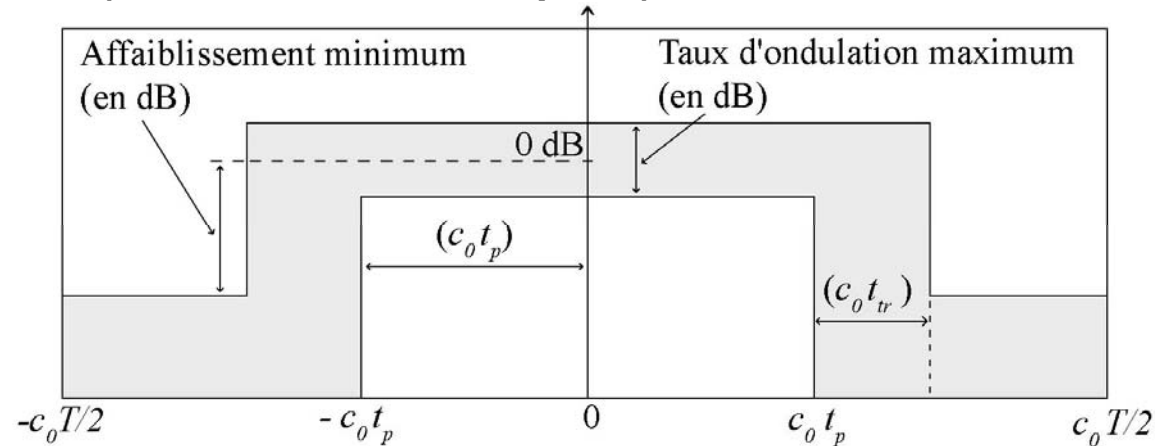
✓ Gabarit (dans le domaine temporel)



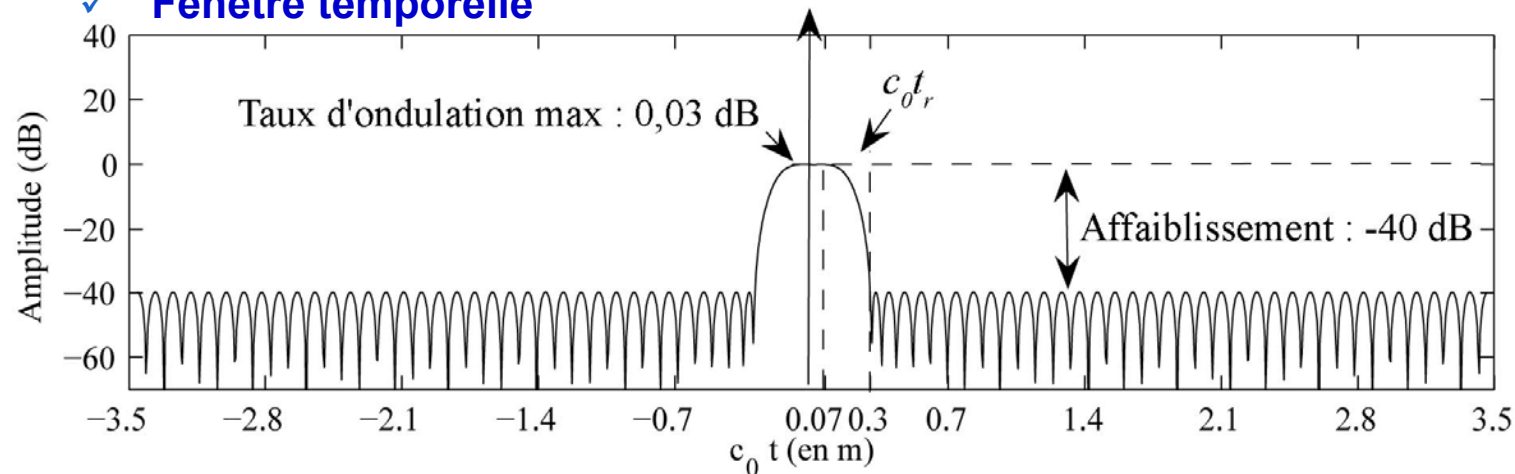
Etalonnage des microphones en champ libre

■ Synthèse de la **fenêtre de filtrage** : méthode itérative (méthode de Remez)

✓ Gabarit (dans le domaine temporel)

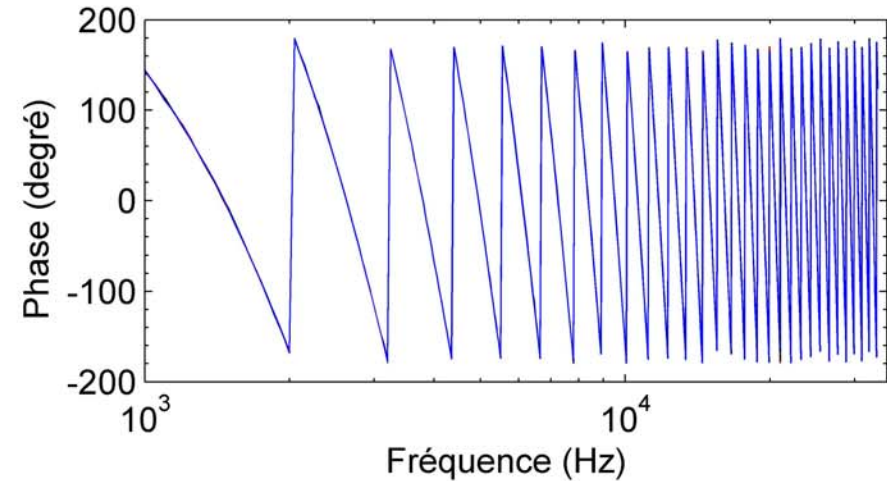
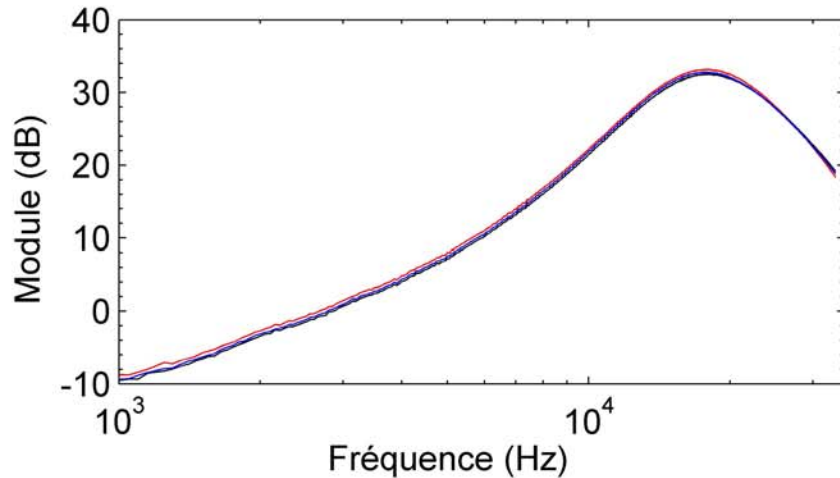


✓ Fenêtre temporelle

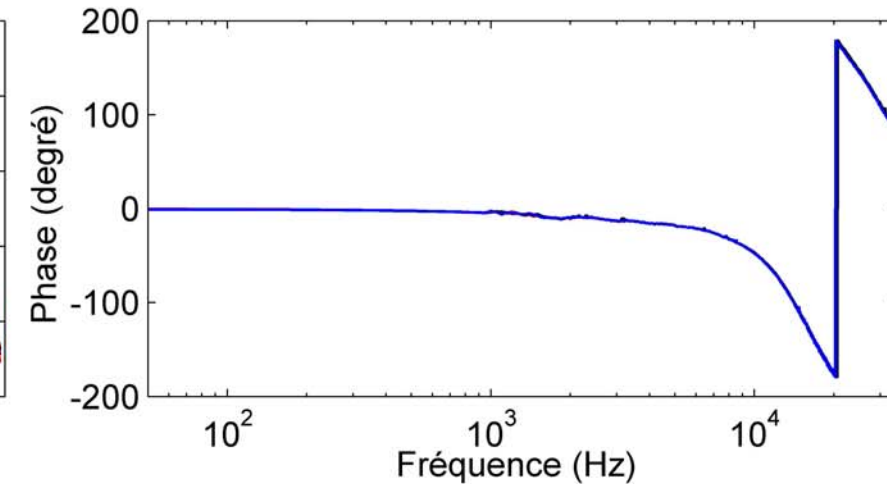
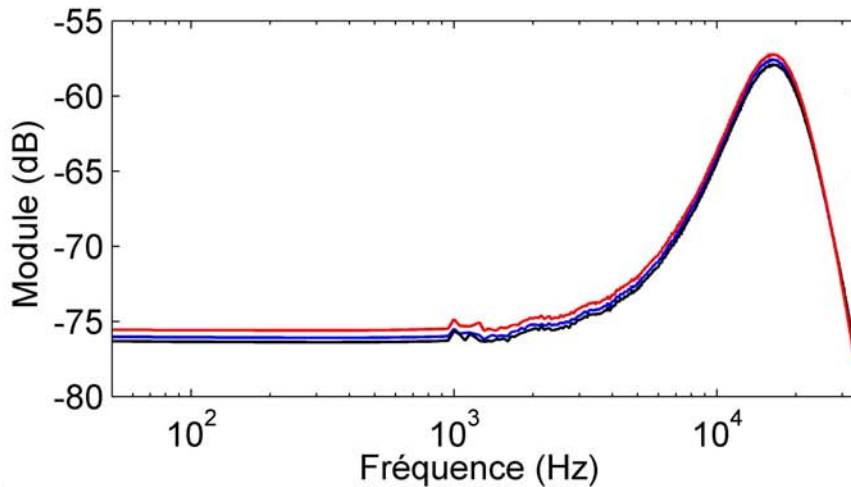


Etalonnage des microphones en champ libre

■ Impédances électriques de transfert mesurées

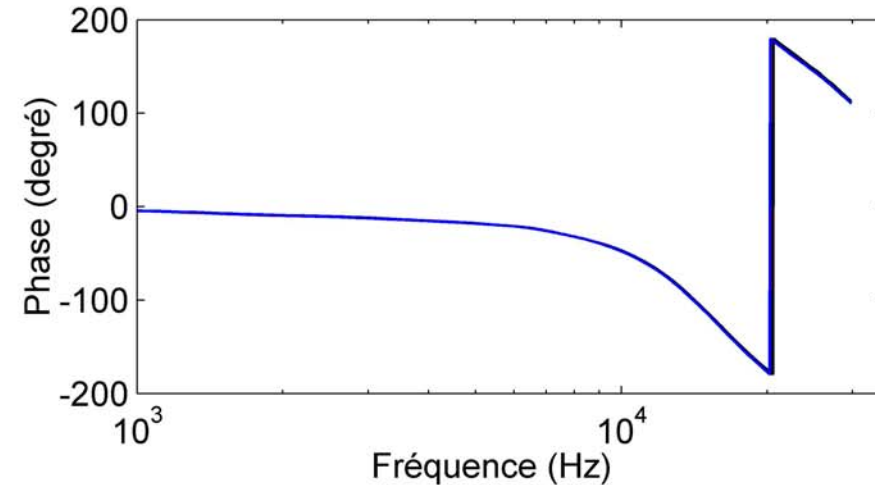
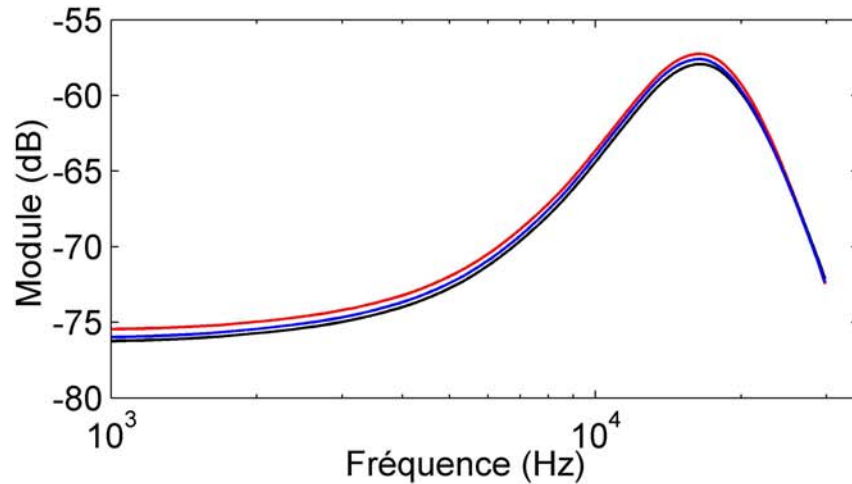


■ Produits des efficacités des microphones (prétraitement)

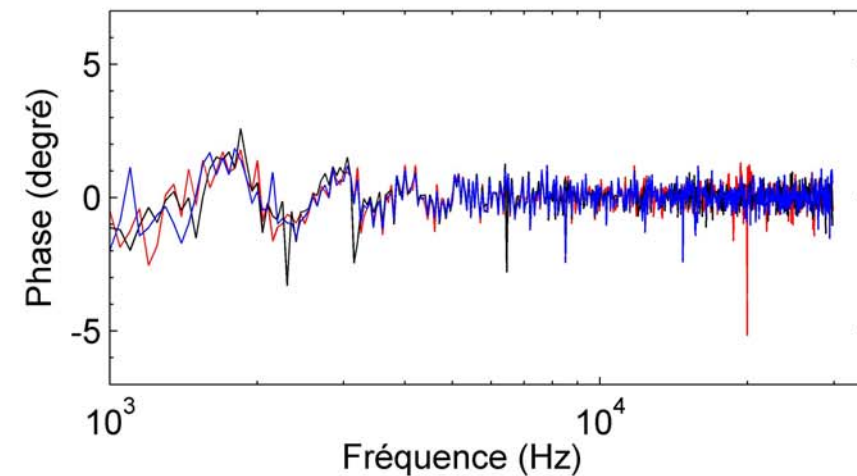
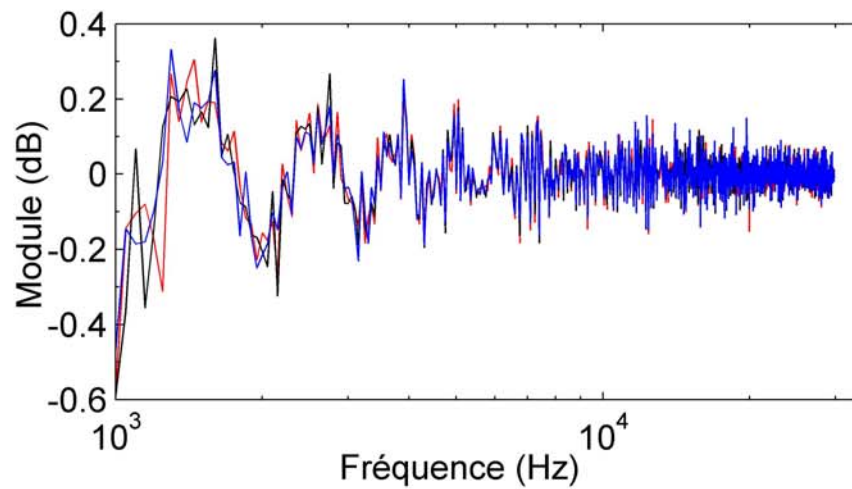


Etalonnage des microphones en champ libre

Produits filtrés des efficacités des microphones



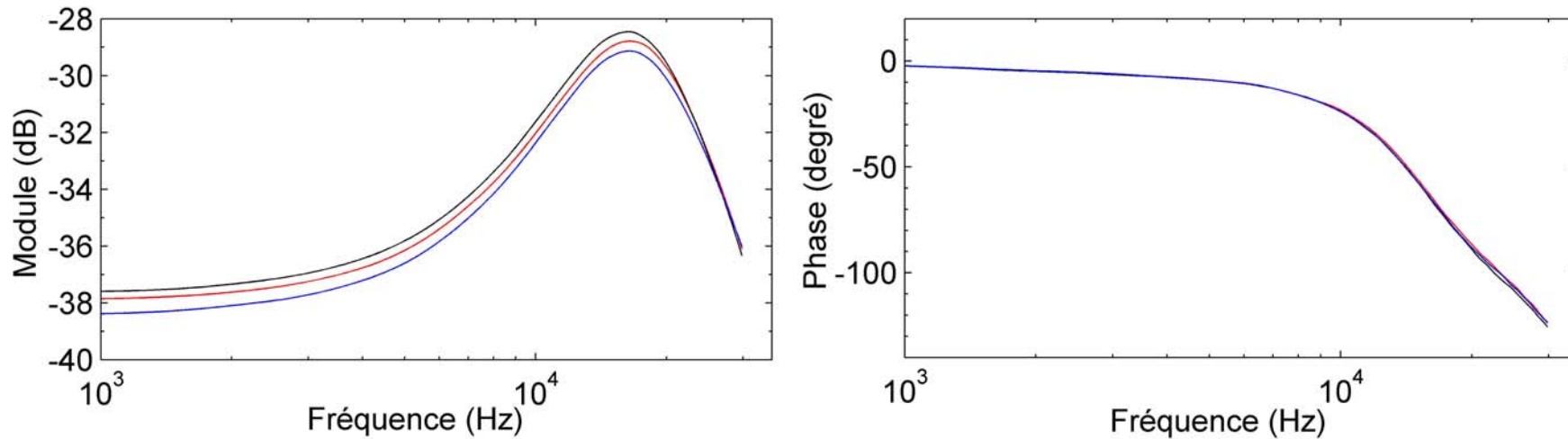
Perturbations retranchées par filtrage



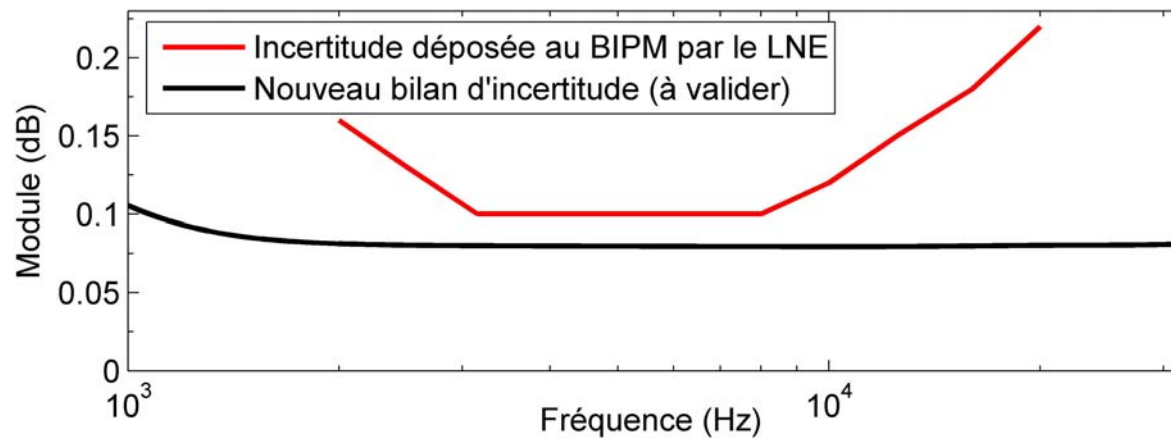
Etalonnage des microphones en champ libre

■ Résultats : efficacités en champ libre

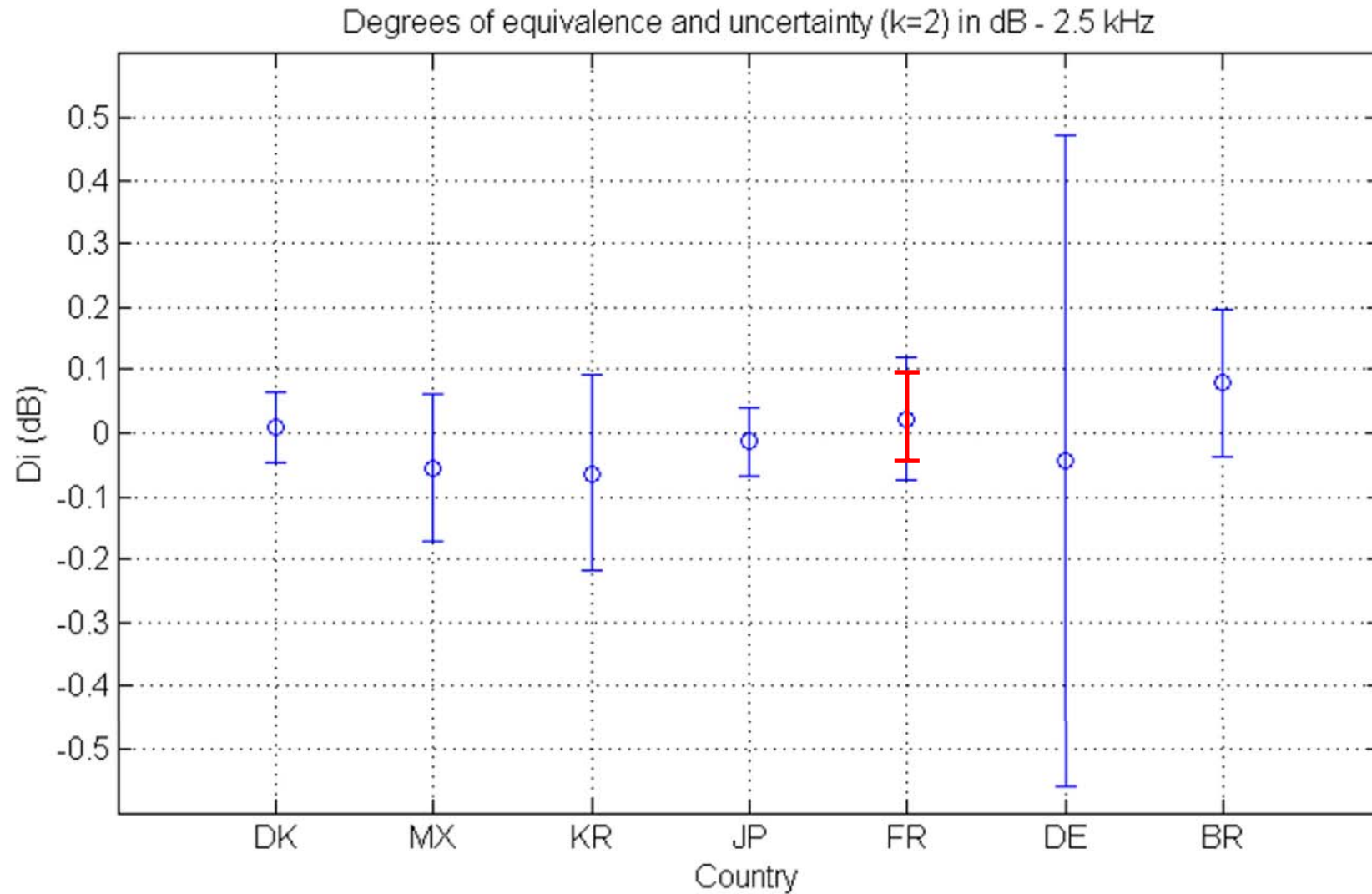
Microphones 1/2" Type 4180 (microphones pression)



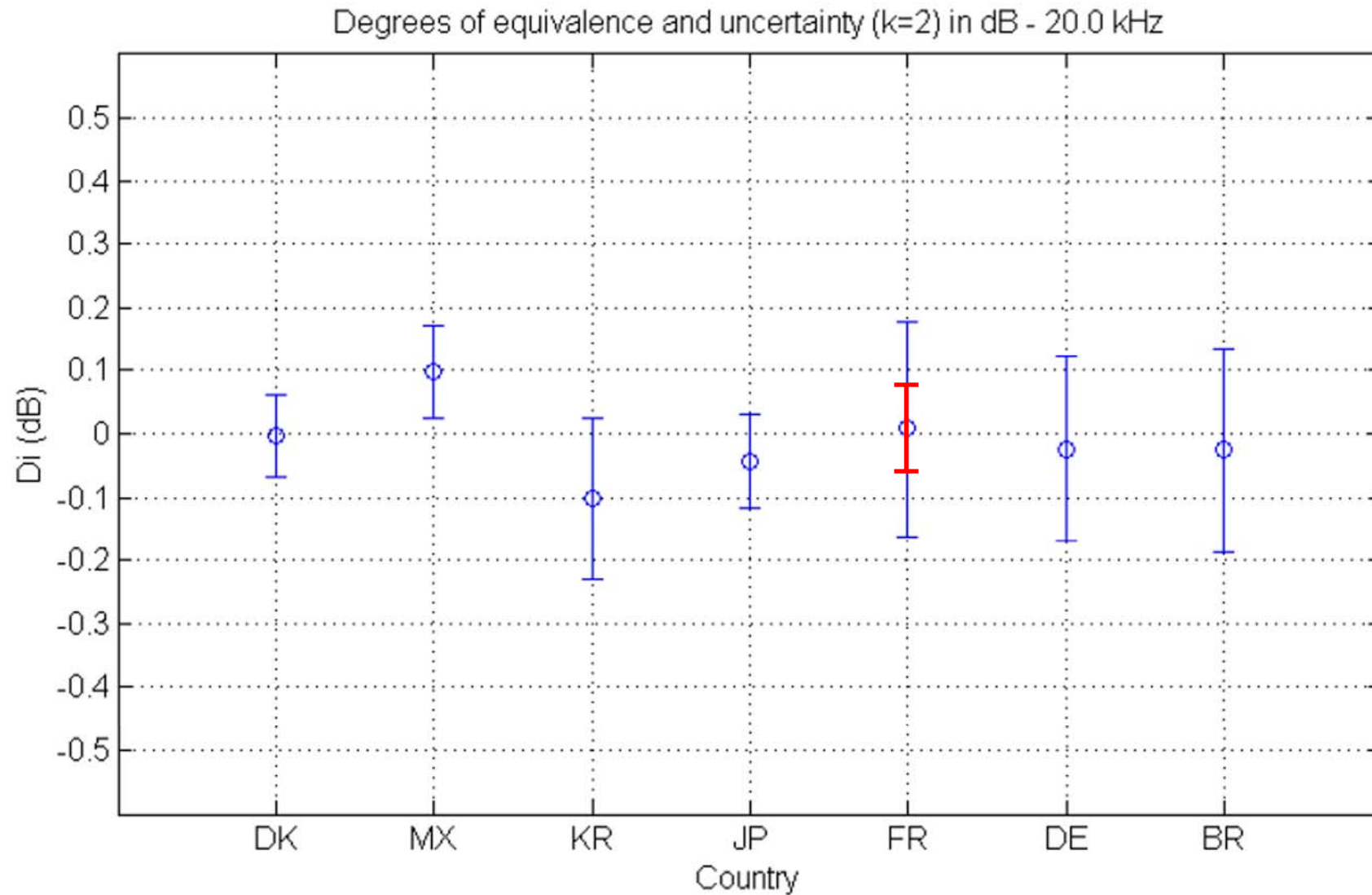
■ Incertitudes sur le module



Etalonnage des microphones en champ libre

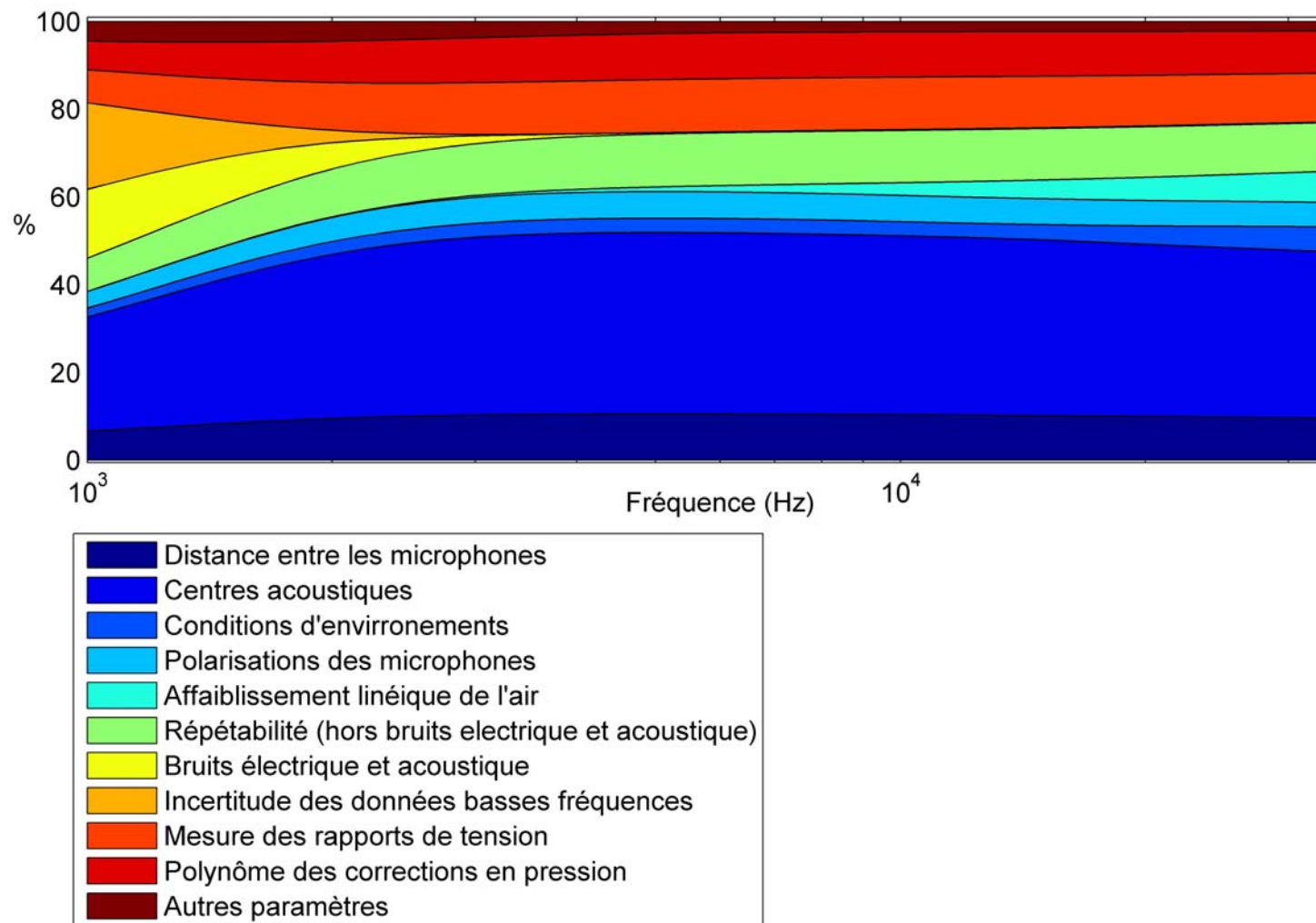


Etalonnage des microphones en champ libre



Etalonnage des microphones en champ libre

Paramètres d'influences dans le bilan des incertitudes (en module)



Plan

- Méthode de la réciprocité
- Méthode de la réciprocité en champ libre
 - ✓ Etalonnage en champ libre des microphones par la méthode de la réciprocité
 - Perturbations électrique et acoustique, filtrage, résultats et incertitudes
 - ✓ **Centre acoustique** d'un microphone électrostatique
 - Méthodes analytique et expérimentale
- Méthode de réciprocité en pression
 - ✓ Méthode de mesure d'impédance de petits éléments acoustiques
 - Fente annulaire plate, tubes et cavités
 - ✓ Etalonnage en pression des microphones
 - Modèle du microphone
 - Modélisation globale du système d'étalonnage
 - Effet de la forme du champ de pression sur l'efficacité

Centre acoustique d'un microphone électrostatique

■ Centre acoustique : définition (norme CEI 61094-3)

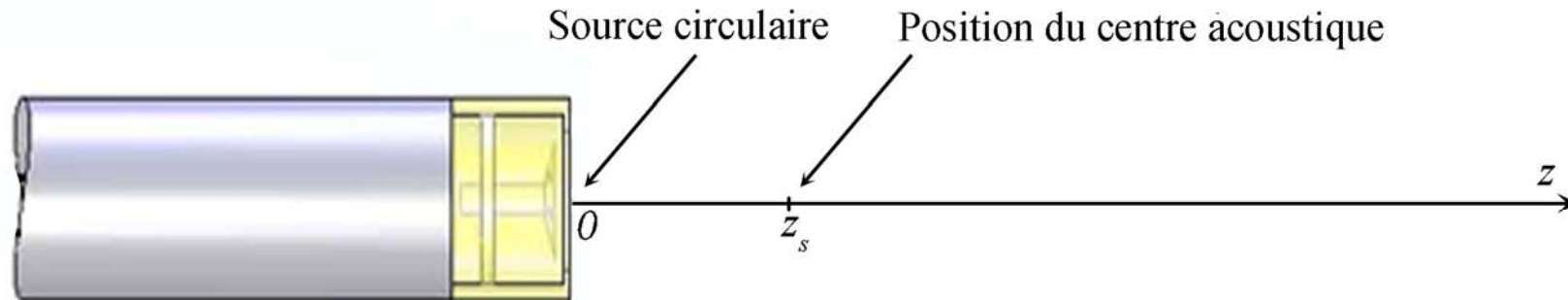
- ✓ « Pour un **transducteur émetteur** acoustique, pour un signal sinusoïdal de **fréquence donnée**, et pour **une direction** et **une distance** spécifiées, **point** d'où semblent diverger les **surfaces d'onde** approximativement **sphériques** qu'on observe dans une région autour du **point d'observation**. »

■ Détermination

- ✓ Expérimentale
- ✓ Analytique

Centre acoustique d'un microphone électrostatique

- **Position du centre acoustique** d'un transducteur acoustique



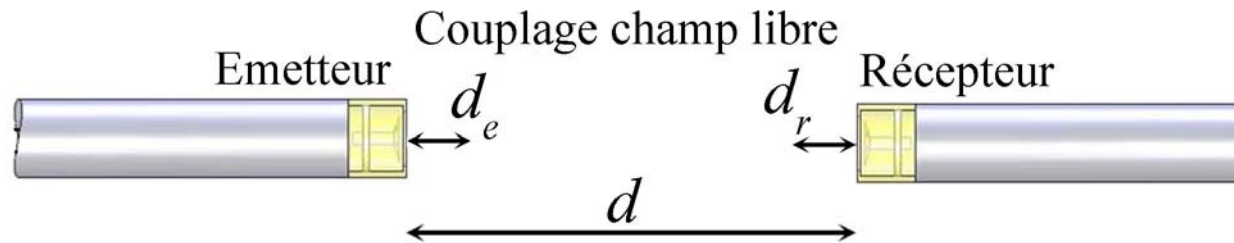
$$\frac{1}{|p(z)|} = m [z - z_s], \quad z > z_s,$$

Domaine de mesure : $z \in [z_{\min}; z_{\max}]$

Résultats de mesure : m et z_s

Centre acoustique d'un microphone électrostatique

- Détermination expérimentale : méthode classique
 - ✓ Fondée sur la méthode de **réciprocité** en **champ libre**
 - ✓ Faible **rapport signal sur bruit** en basses fréquences (< 1kHz)

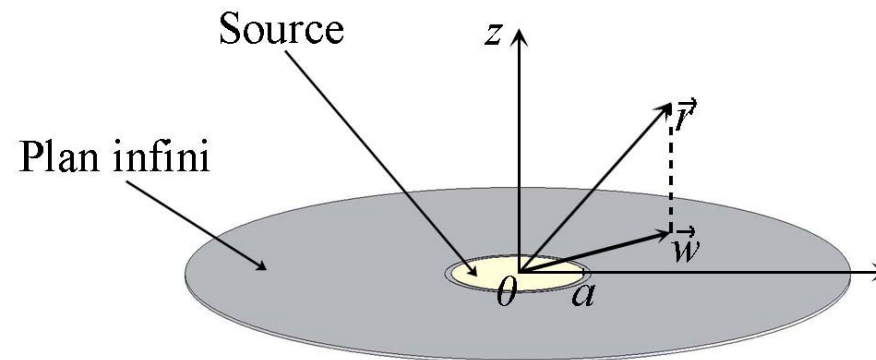
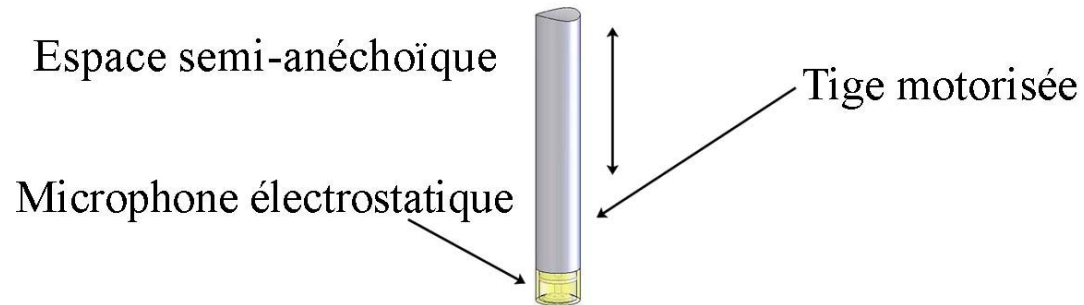


- Détermination expérimentale : nouvelle méthode
 - ✓ Amélioration du **rapport signal sur bruit**

Centre acoustique d'un microphone électrostatique

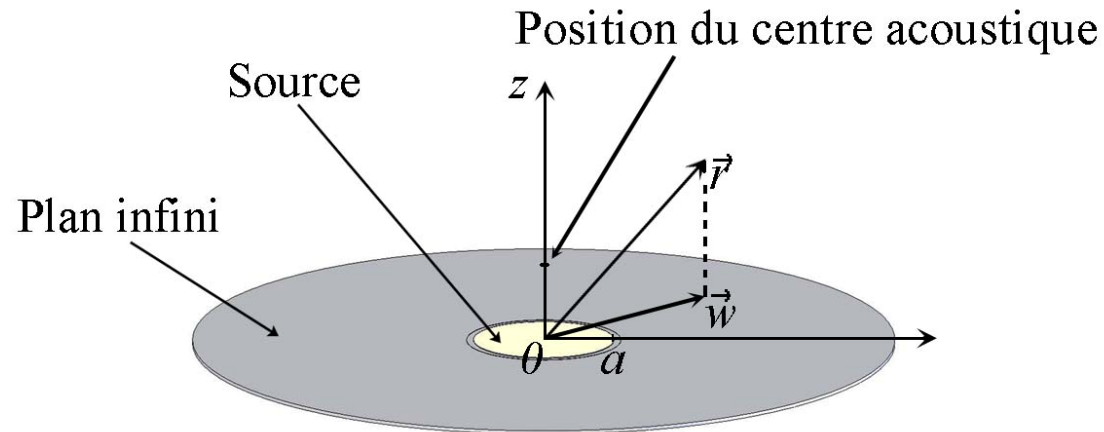
■ Nouvelle **méthode expérimentale** : dispositif

- ✓ **Source circulaire** dans un plan infini
- ✓ **Récepteur**
- ✓ **Espace semi infini**



Centre acoustique d'un microphone électrostatique

- **Position du centre acoustique d'une source circulaire dans un plan infini**

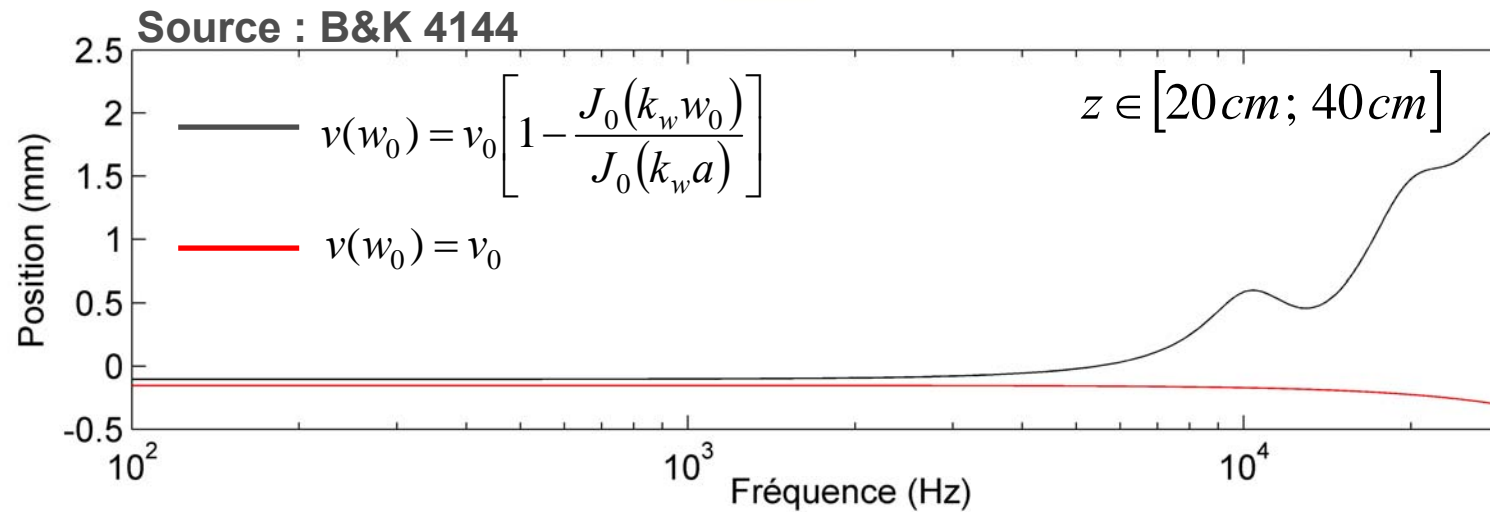
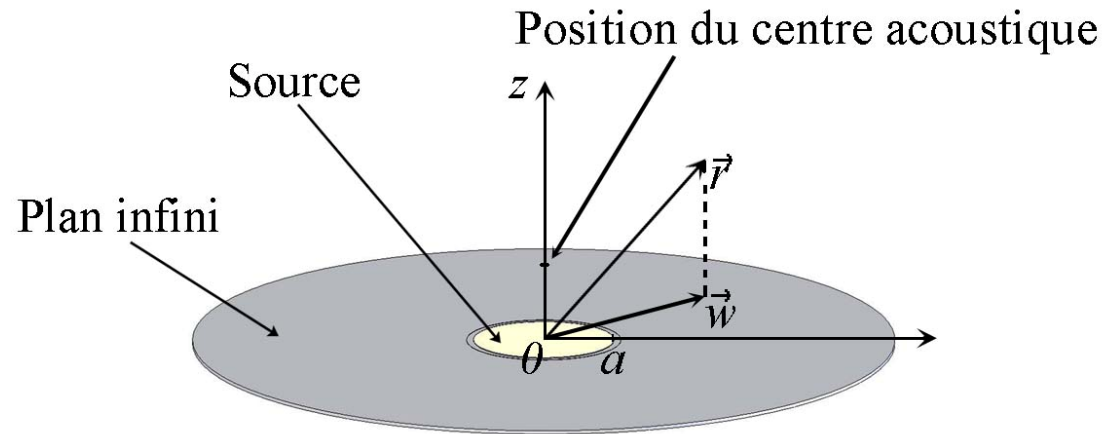


- ✓ Intégrale de **Rayleigh** (déviation par rapport à la loi en 1/r)

$$p(z) = jk_0 \rho_0 c_0 \int_0^a \frac{e^{-jk_0 \sqrt{z^2 + w_0^2}}}{\sqrt{z^2 + w_0^2}} v(w_0) w_0 dw_0$$

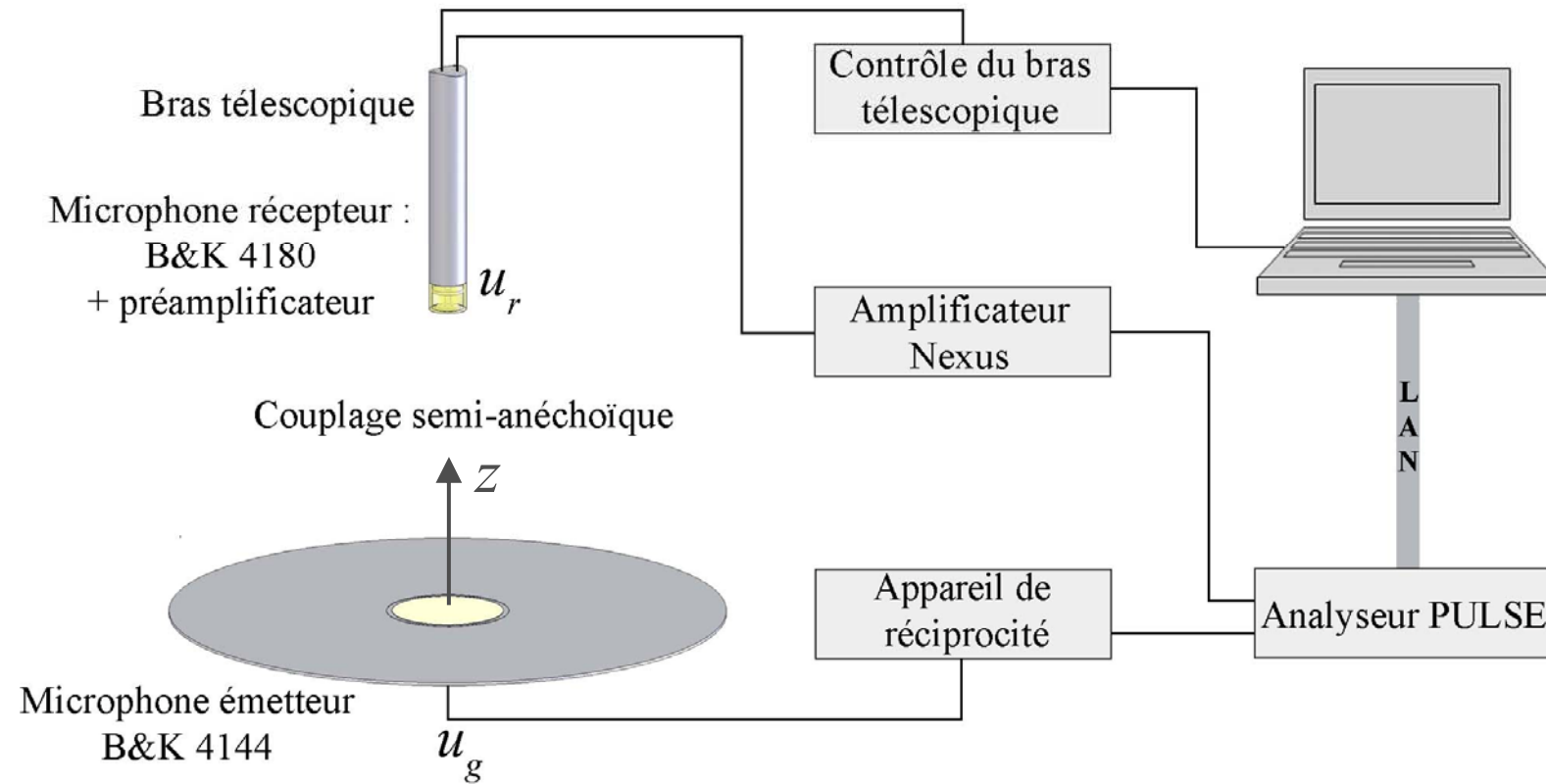
Centre acoustique d'un microphone électrostatique

- **Position du centre acoustique d'une source circulaire dans un plan infini**



Centre acoustique d'un microphone électrostatique

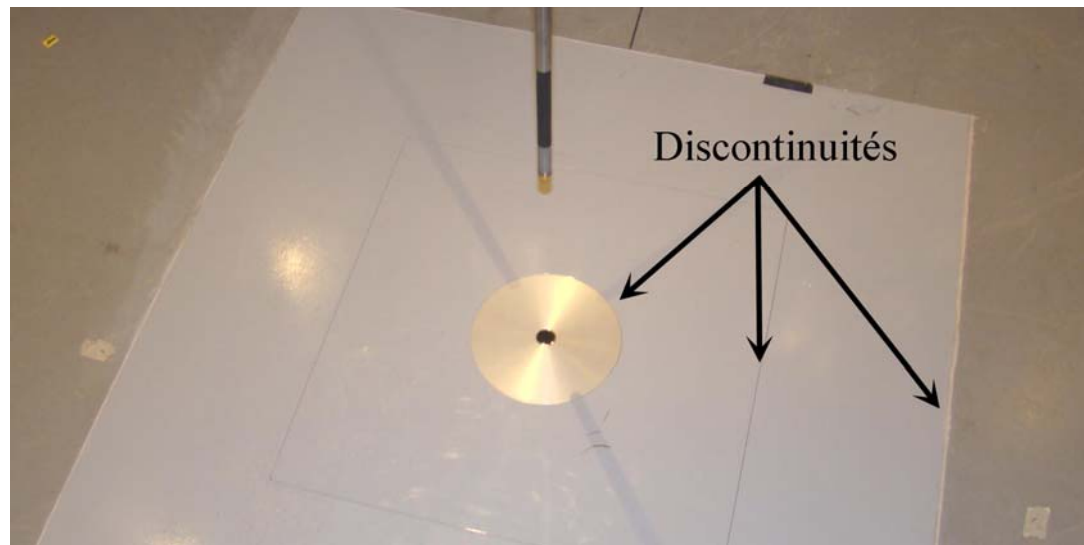
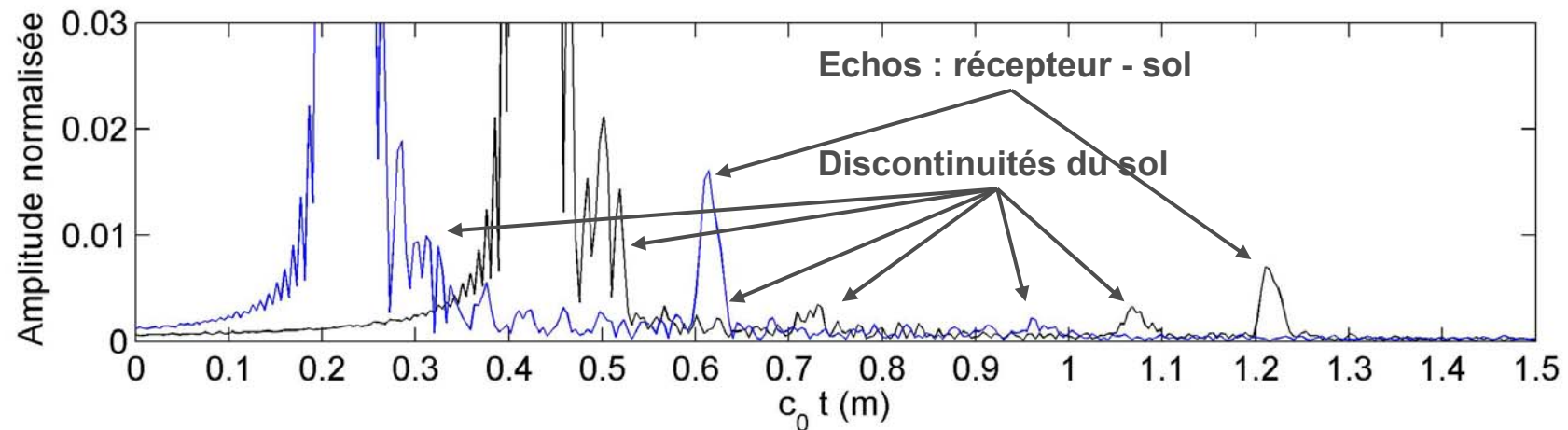
- **Position du centre acoustique** du microphone : dispositif expérimental



Fonction de transfert $\Rightarrow H_m(z, f) = u_r / u_g$

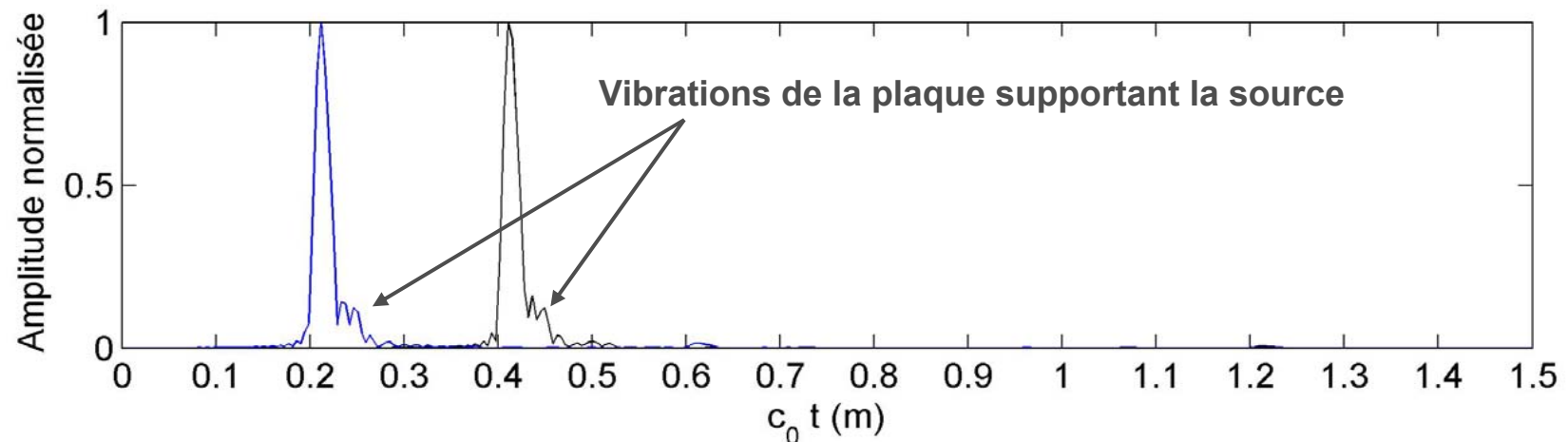
Centre acoustique d'un microphone électrostatique

■ **Réponse impulsionnelle** : $h_m(z, t) = FFT^{-1}[H_m(z, f)]$



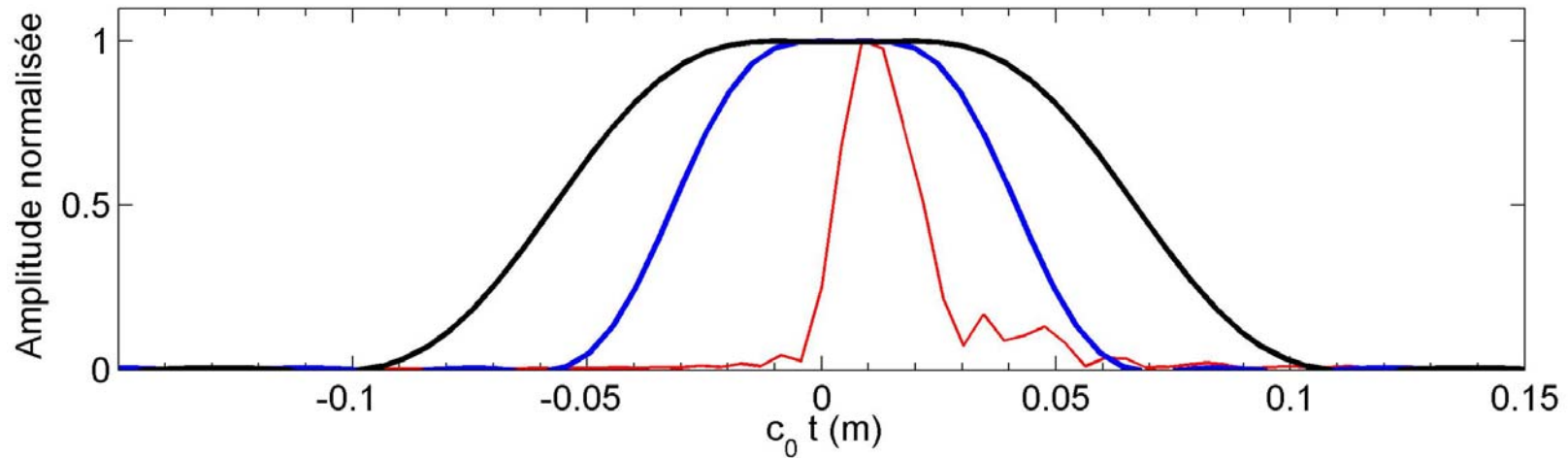
Centre acoustique d'un microphone électrostatique

- **Réponse impulsionnelle** : $h_m(z, t) = FFT^{-1}[H_m(z, f)]$

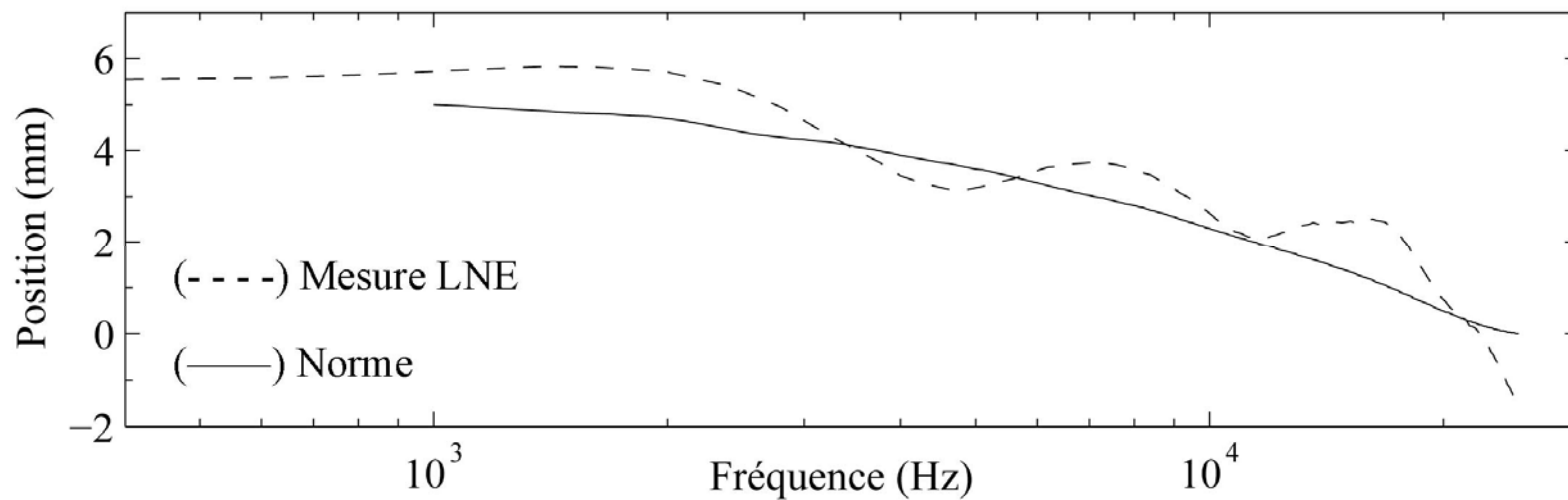


Centre acoustique d'un microphone électrostatique

Fenêtre de filtrage

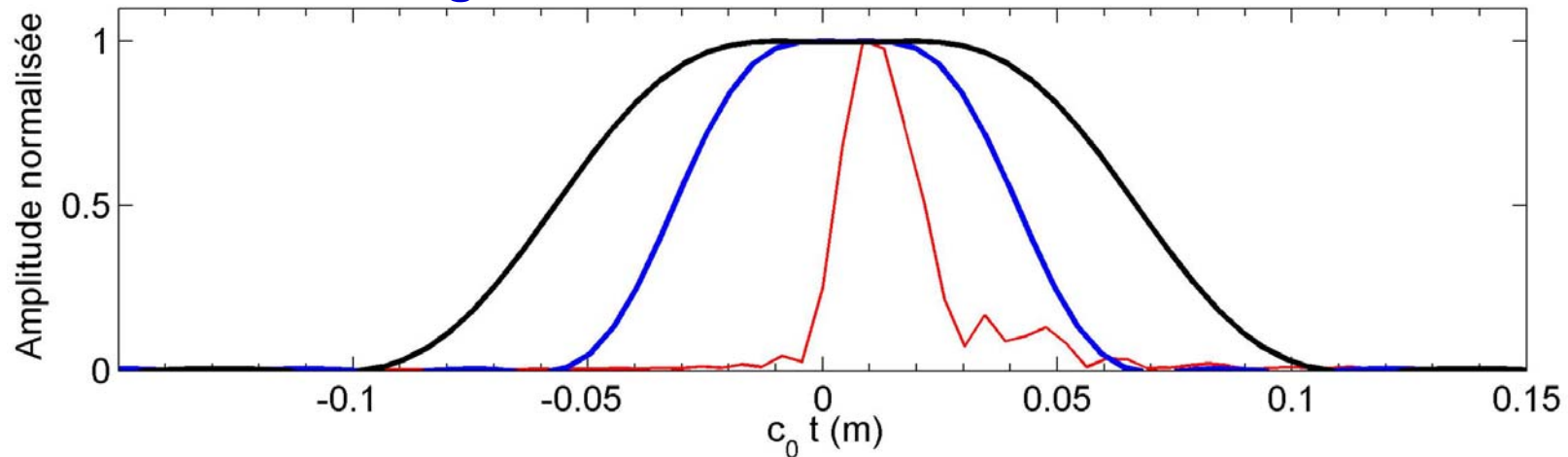


Résultats expérimentaux (B&K 4180)

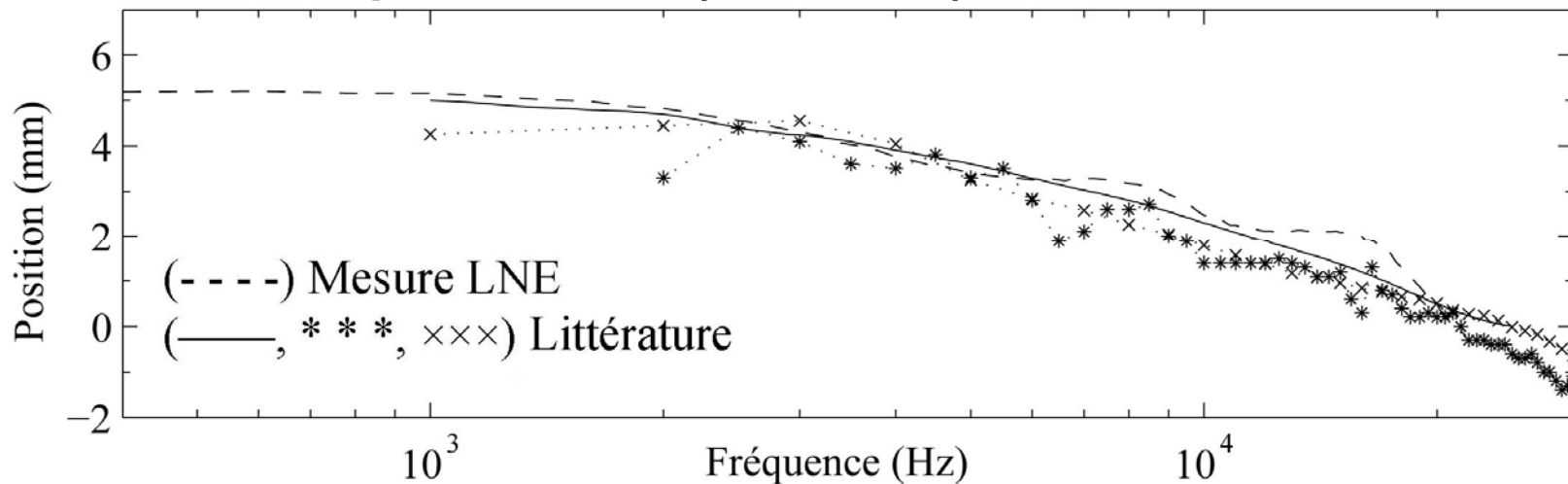


Centre acoustique d'un microphone électrostatique

Fenêtre de filtrage



Résultats expérimentaux (B&K 4180)



Centre acoustique d'un microphone électrostatique

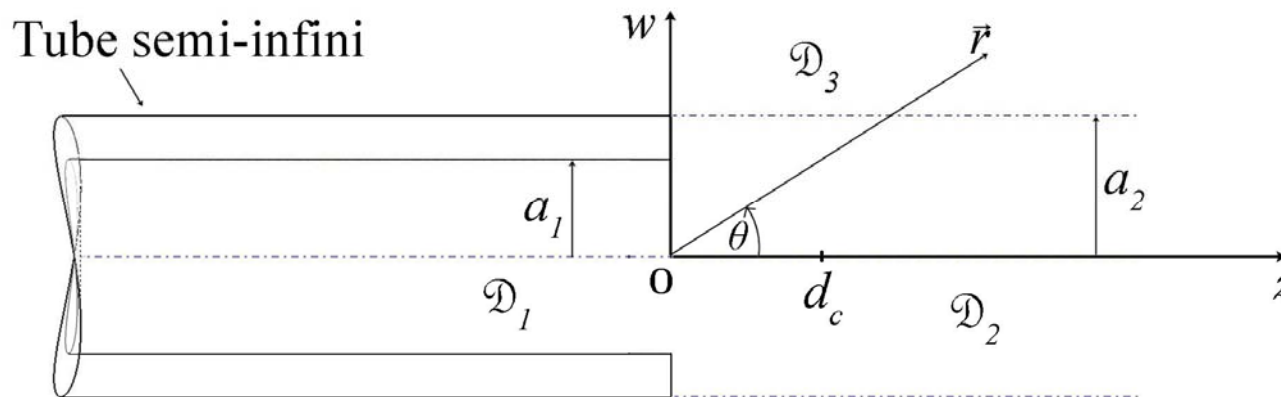
■ Détermination **analytique** : modèle d'**Ando** (1970)

✓ **Tube semi-infini** ouvert d'épaisseur non nulle

- Domaine découpé en **trois sous-domaines** distincts (+ **conditions d'interfaces**)
- Utilisation des **transformées de Laplace** et de la technique de **Wiener-Hopf**
- **Solution approchée** du champ de pression (en champ lointain)

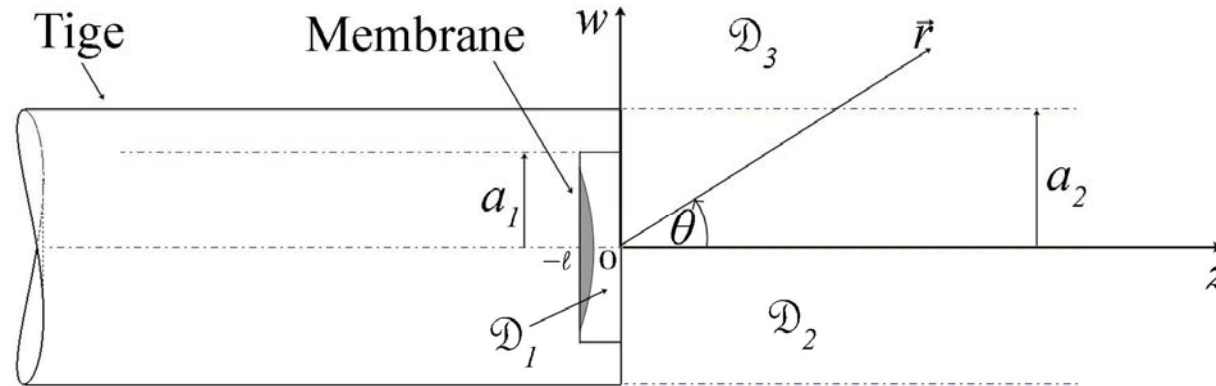
- **Position du centre acoustique** du dispositif :
$$\frac{p_3(z \rightarrow -\infty)}{p_3(z \rightarrow \infty)} = |\xi| e^{-j2k_0 d_c}$$

Information contenue dans la **phase** du rapport des champs de pression lorsque $z \rightarrow +\infty$ et $-\infty$



Centre acoustique d'un microphone électrostatique

- Détermination **analytique** : **microphone** monté dans un tube semi-infini



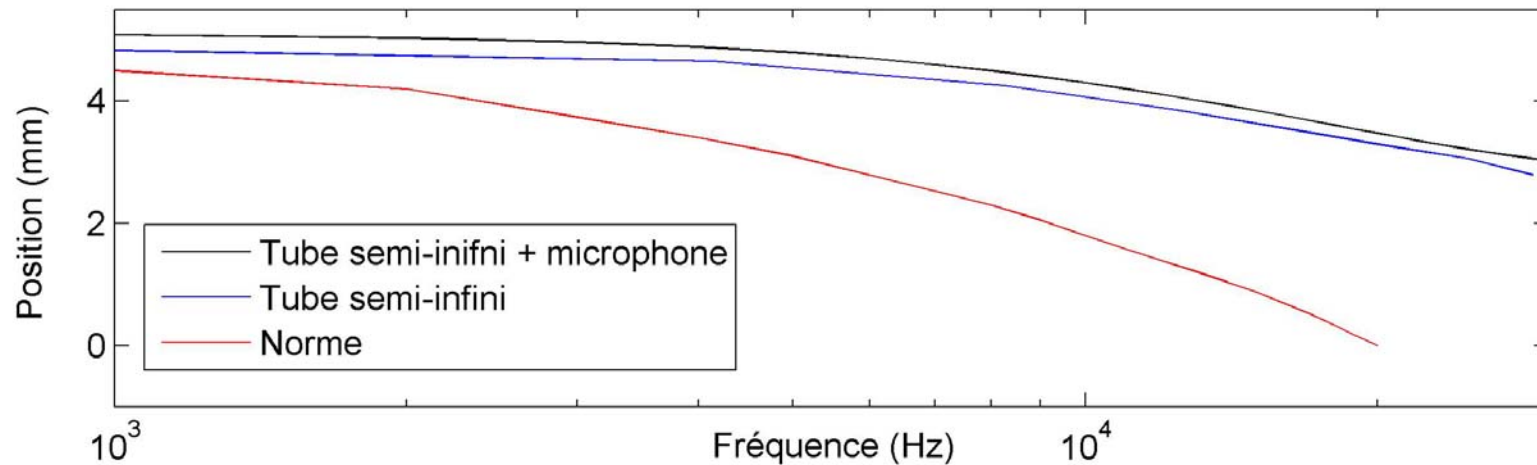
✓ Modèle

- **Microphone** décrit par un modèle à constantes localisées
- Domaine découpé en sous-domaines
 - **Cavité frontale** (théorème de Green)
 - **Espace infini** (modèle d'**Ando**)
- **Conditions aux interfaces** et aux **frontières**

- **Position du centre acoustique** :
$$\frac{p_3(z \rightarrow -\infty)}{p_3(z \rightarrow \infty)} = |\xi| e^{-j2k_0 d_c}$$

Centre acoustique d'un microphone électrostatique

■ Position du centre acoustique : résultats analytiques (Type 1/2")



■ Discussion

- ✓ Faible influence de la présence du microphone sur la **détermination analytique** de la **position du centre acoustique**
- ✓ La position obtenue analytiquement (à partir de la **phase** du champ de pression acoustique) diffère en hautes fréquences de la position obtenue expérimentalement (à partir de l'**amplitude** du champ de pression acoustique)

Etalonnage, centre acoustique : conclusion

- **Etalonnage en champ libre** des microphones étalons par la méthode de réciprocité
 - ✓ Participation à la **comparaison clé** CCAUV.A-K4 du BIPM (septembre 2007)
 - ✓ **Amélioration** du **dispositif expérimental** et **optimisation** de la procédure de **filtrage**
 - ✓ **Amélioration** du bilan des **incertitudes**
 - Mise en évidence de la participation majoritaire de la **position** du **centre acoustique** des microphones dans le bilan des incertitudes

- **Position du centre acoustique** d'un microphone électrostatique
 - ✓ Etude **expérimentale**
 - Amélioration du rapport signal sur bruit, extension des mesures aux **basses fréquences**
 - ✓ Etude **analytique**
 - Faible influence de la présence du microphone
 - Résultats différents en hautes fréquences des données normalisées

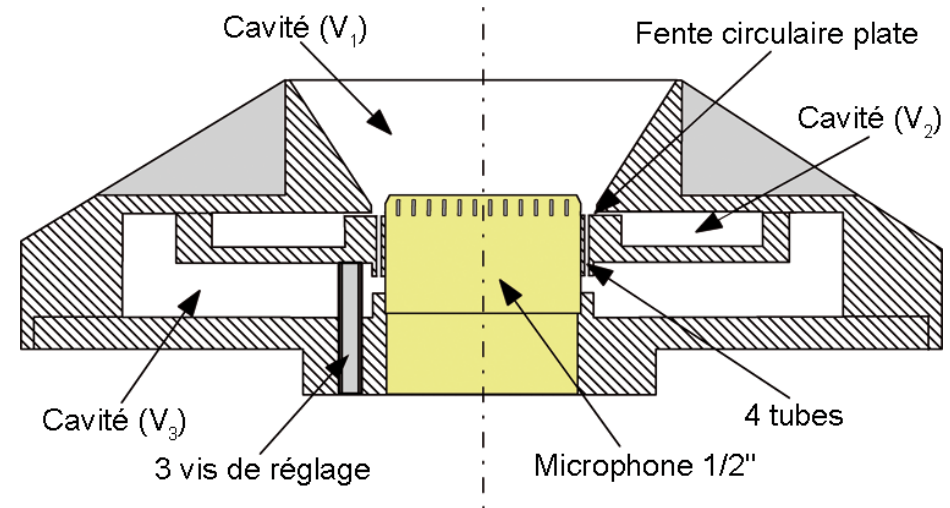
Plan

- Méthode de la réciprocité
- Méthode de la réciprocité en champ libre
 - ✓ Etalonnage en champ libre des microphones par la méthode de la réciprocité
 - Perturbations électrique et acoustique, filtrage, résultats et incertitudes
 - ✓ Centre acoustique d'un microphone électrostatique
 - Méthodes analytique et expérimentale
- Méthode de la **réciprocité en pression**
 - ✓ Méthode de **mesure d'impédance** de petits éléments acoustiques
 - Fente annulaire plate, tubes et cavités
 - ✓ Etalonnage en pression des microphones
 - Modèle du microphone
 - Modélisation globale du système d'étalonnage
 - Effet de la forme du champ de pression sur l'efficacité

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

■ Contexte

- ✓ Validation d'un nouveau modèle d'impédance d'entrée de l'oreille artificielle



Caractérisation expérimentale des propriétés acoustiques des petits éléments constitutifs de l'oreille artificielle (fente annulaire, tubes et cavités).

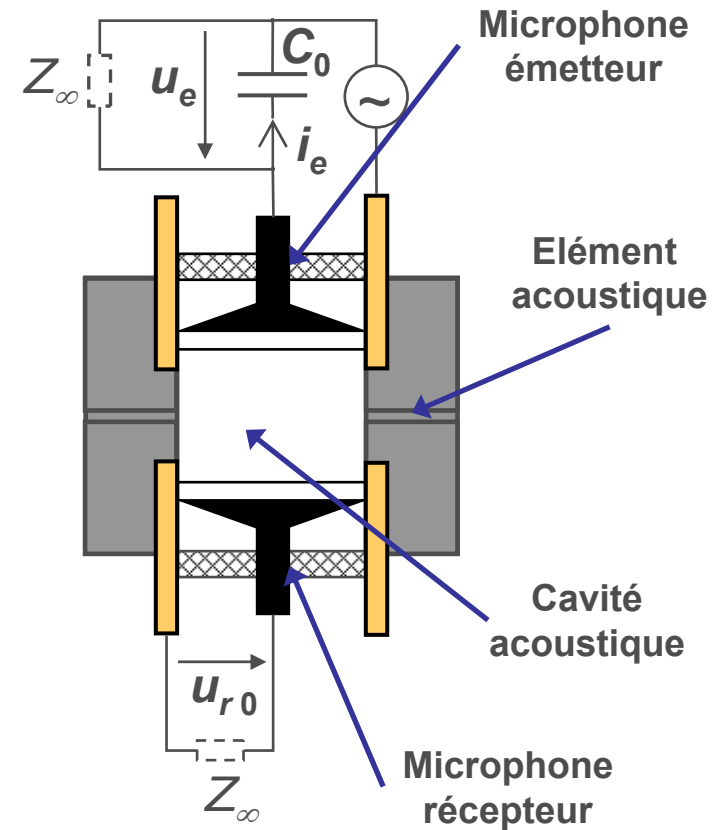
■ Autres applications

- ✓ **Caractérisation** de petits éléments acoustiques utilisés dans :
 - haut parleurs
 - microphones
 - MEMS ...

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

Dispositif expérimental

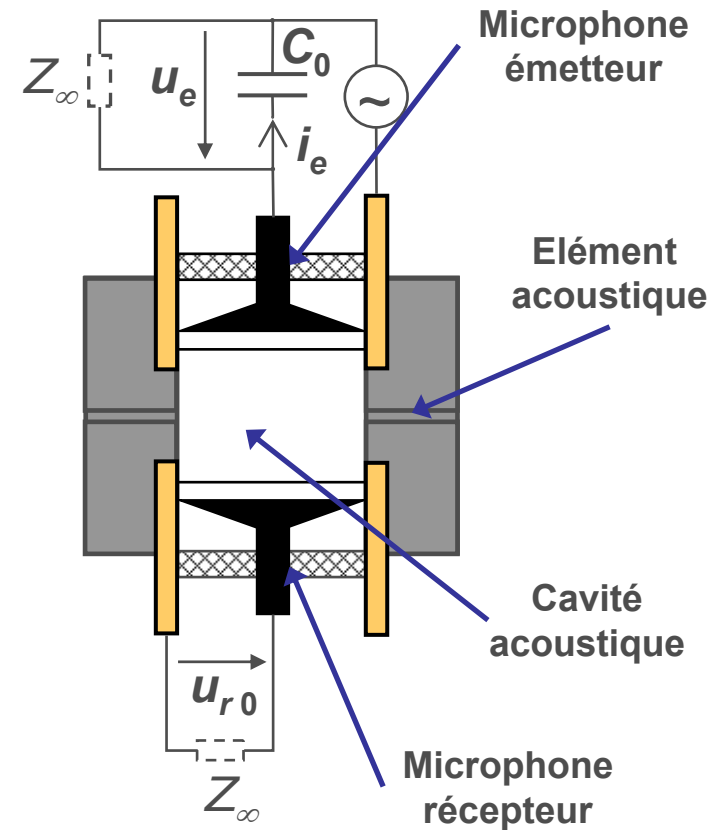
- ✓ 1 microphone récepteur
- ✓ 1 microphone émetteur



Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

■ Dispositif expérimental

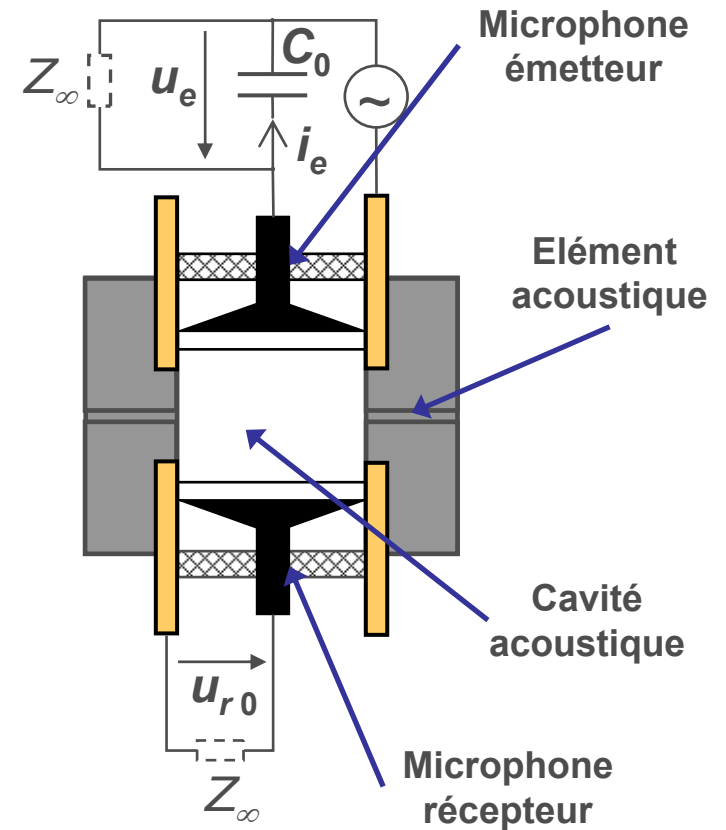
- ✓ 1 microphone **récepteur**
- ✓ 1 microphone **émetteur**
- ✓ 1 **coupleur standard**, totalement clos



Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

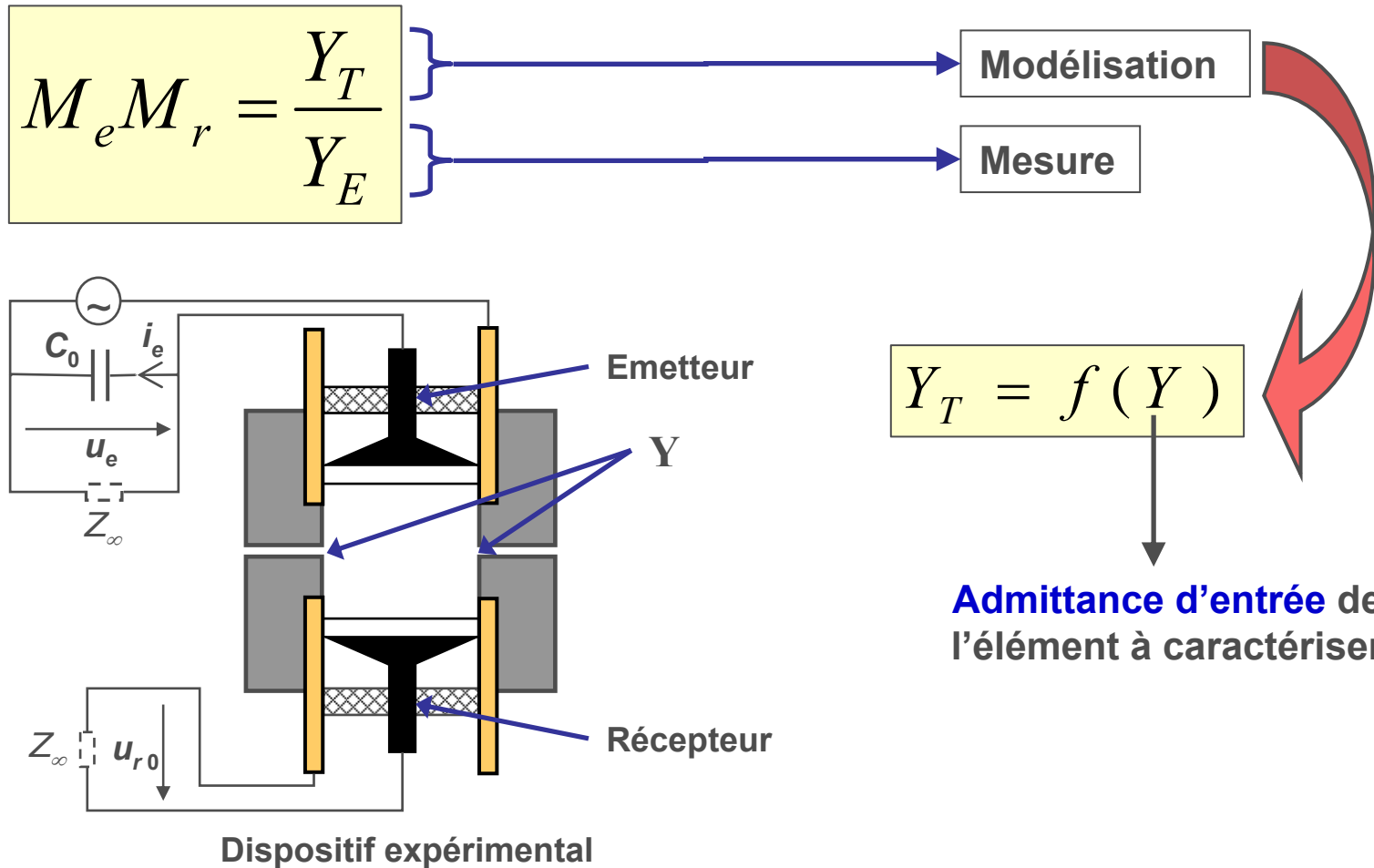
Dispositif expérimental

- ✓ 1 microphone **récepteur**
- ✓ 1 microphone **émetteur**
- ✓ 1 **coupleur standard**, totalement clos
- ✓ 1 **coupleur spécifique** où l'élément à caractériser est placé en paroi de la cavité




Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

Produit des efficacités de deux microphones



Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

- **Modélisation de l'admittance acoustique de transfert**
 - ✓ Propagation d'ondes planes suivant l'axe de la cavité cylindrique
 - ✓ Modélisation en fluide thermovisqueux


$$Y_T = Y_{T0} + \alpha Y$$

Y_{T0} → Admittance acoustique de transfert en l'absence d'élément acoustique en paroi

α → Facteur connu analytiquement, qui traduit la non-uniformité du champ acoustique

Y → Admittance d'entrée de l'élément acoustique à caractériser

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

- Expression de l'**admittance acoustique** d'entrée Y

$$Y = \frac{Y'_T}{\alpha} \left(\frac{Y_E}{Y'_E} - \frac{Y_{T0}}{Y'_T} \right)$$

Y ➔ Admittance d'entrée de l'élément acoustique à caractériser

Y'_T ➔ Admittance acoustique de transfert du coupleur totalement clos

Y_T ➔ Admittance acoustique de transfert du coupleur comportant l'élément en paroi

Y_{T0} ➔ Admittance acoustique de transfert du coupleur comportant l'élément en paroi (pour $Y = 0$)

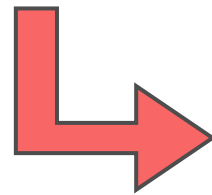
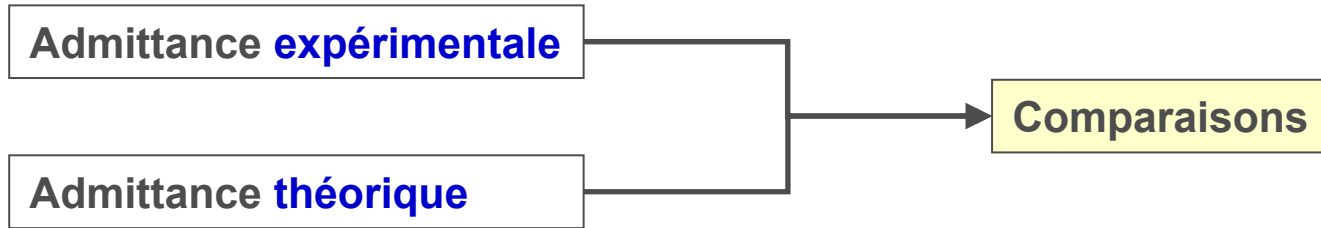
α ➔ Facteur connu analytiquement

Y'_E ➔ Admittance électrique de transfert pour le coupleur totalement clos

Y_E ➔ Admittance électrique de transfert pour le coupleur comportant l'élément en paroi

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

■ Validation des résultats de mesure



Obtenu **analytiquement** à partir des **dimensions géométriques** des petits éléments acoustiques en question

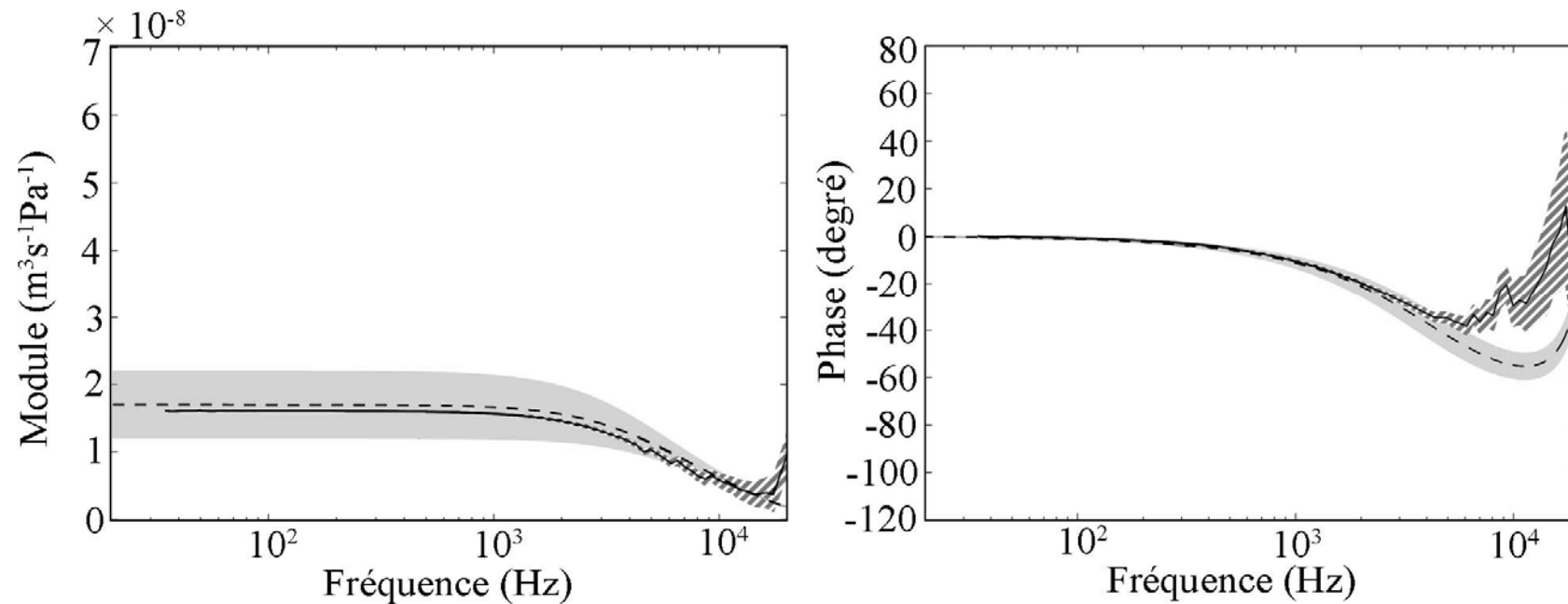
Modélisation en fluide **thermovisqueux**

■ Éléments étudiés

- ✓ 1 **fente annulaire** ouverte sur l'espace infini
- ✓ 4 **tubes** ouverts sur l'espace infini
- ✓ 4 **tubes chargés** par un **volume**

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

- Comparaison des **résultats théoriques** et **expérimentaux**
 - ✓ **Fente annulaire** ouverte (épaisseur $71,2 \mu\text{m} \pm 6 \mu\text{m}$)



(- - - -) Admittance théorique

(—) Admittance expérimentale

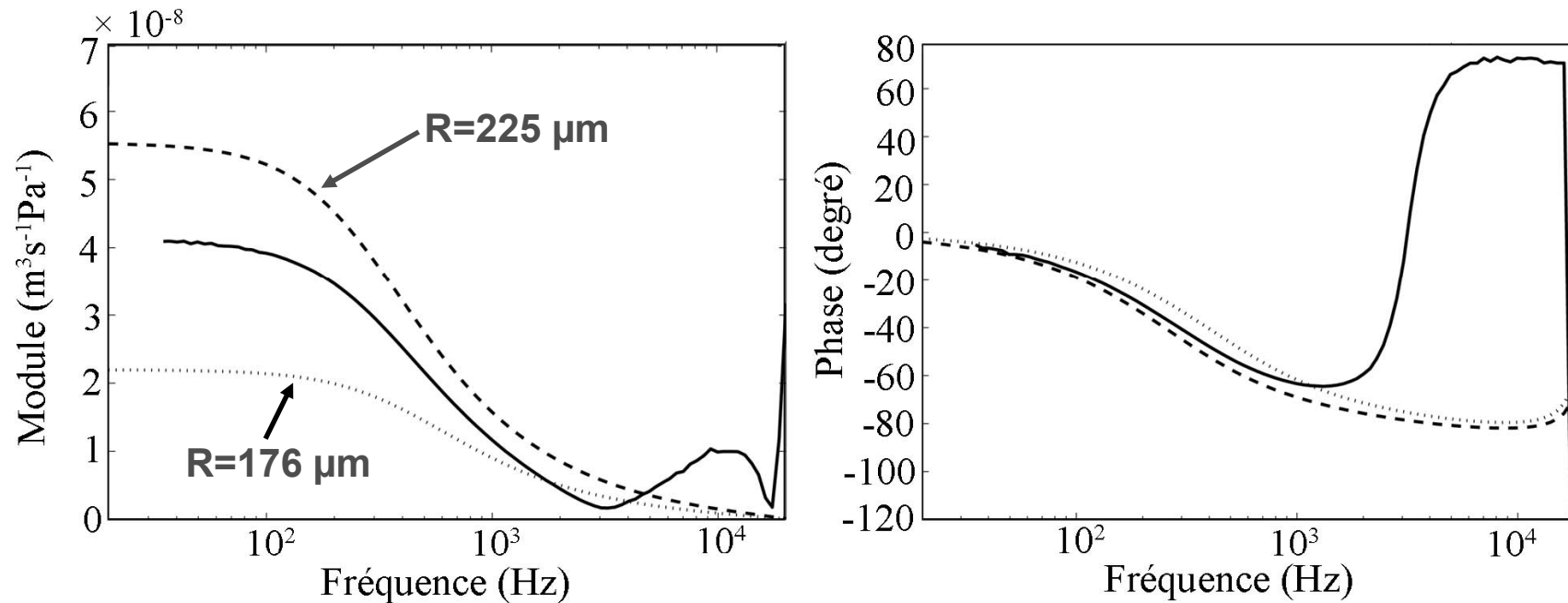
■ Intervalle d'incertitude sur l'admittance théorique

▨ Intervalle d'incertitude sur l'admittance expérimentale

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

■ Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

✓ 4 tubes ouverts



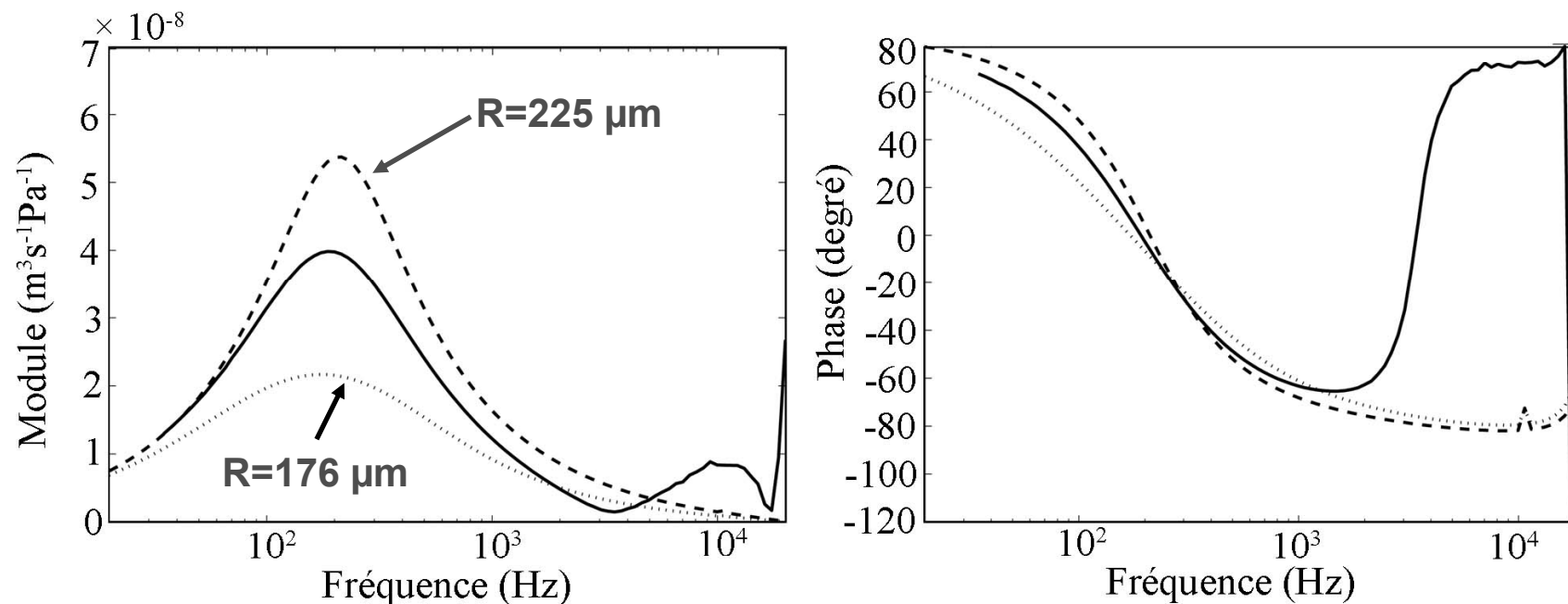
(—) Admittance expérimentale

(- - -) Admittance théorique (dimensions géométriques données par le fabricant)

(·····) Admittance théorique (dimensions géométriques mesurées)

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

- Comparaison des **résultats théoriques** et **expérimentaux**
 - ✓ **4 tubes chargés** par un volume



- (—) Admittance expérimentale
- (- - -) Admittance théorique (dimensions géométriques données par le fabricant)
- (·····) Admittance théorique (dimensions géométriques mesurées)

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

■ Amélioration du dispositif

- ✓ Réalisation d'éléments de **dimensions précises** pour **diminuer** les **erreurs** sur les **valeurs théoriques** des **admittances d'entrée**

■ Contraintes

Incertitudes sur les admittances d'entrée théoriques des petits éléments :

5% pour le module

2° pour la phase



4 tubes :

Diamètres : $450 \pm 2 \mu\text{m}$

Longueur : $3,80 \pm 0,01 \text{ mm}$



Fente annulaire :

Epaisseur : $100 \pm 1 \mu\text{m}$

Longueur : $1,32 \pm 0,01 \text{ mm}$

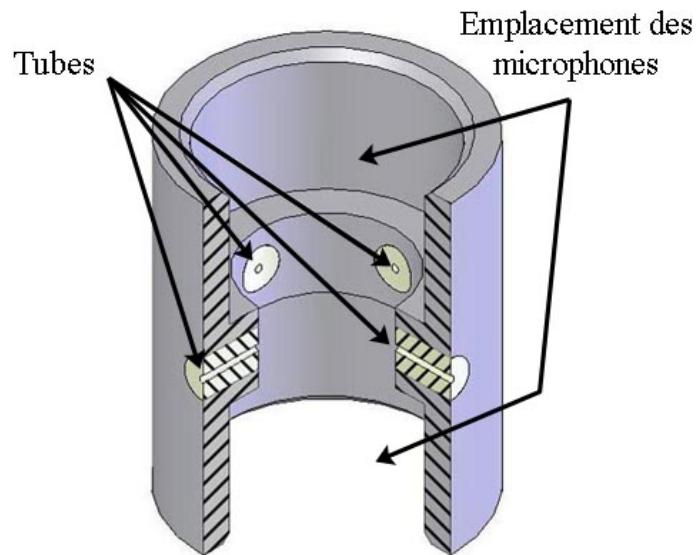
Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

■ Nouveaux coupleurs

4 tubes :

Diamètres : $450 \pm 1 \mu\text{m}$

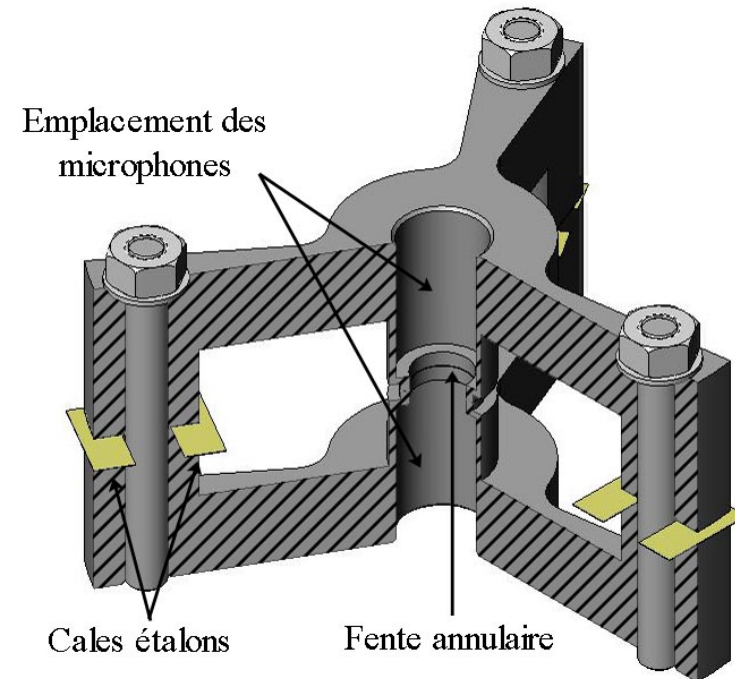
Longueur : $3,80 \pm 0,01 \text{ mm}$



Fente annulaire :

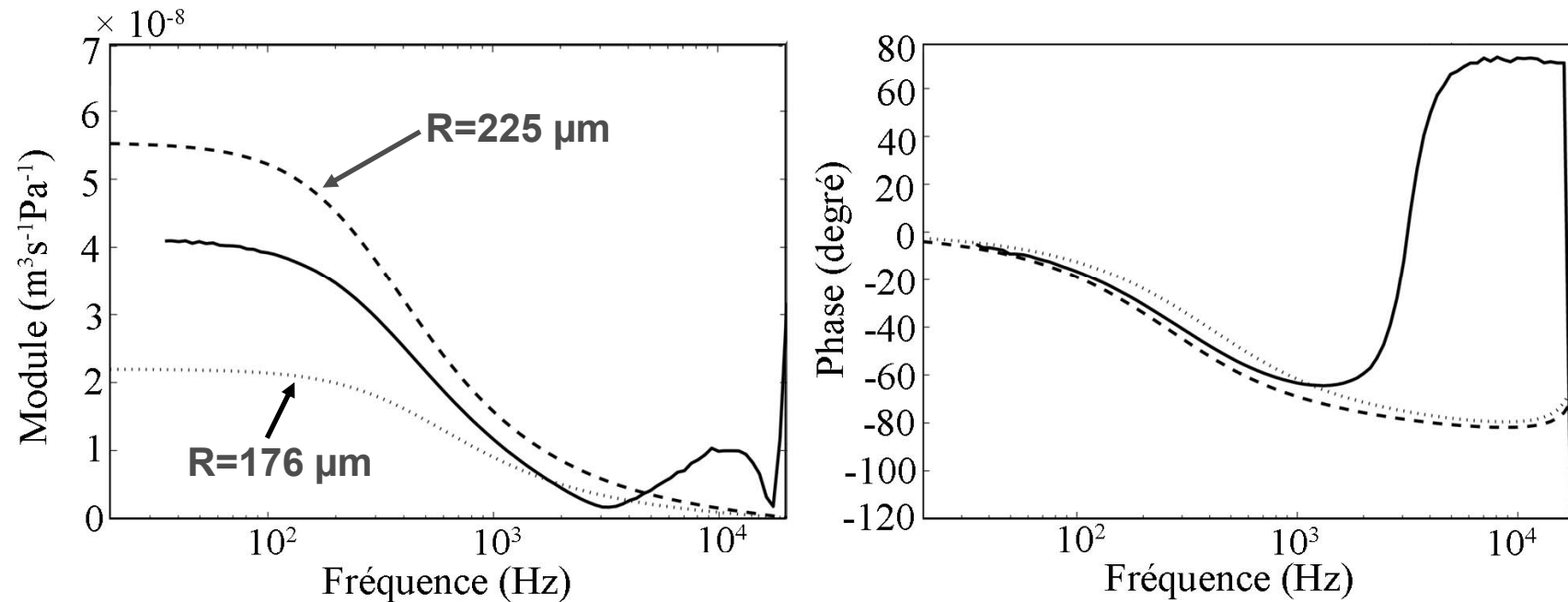
Épaisseur : $100 \pm 1 \mu\text{m}$

Longueur : $1,32 \pm 0,01 \text{ mm}$



Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

- Comparaison des **résultats théoriques** et **expérimentaux**
 - ✓ **4 tubes** ouverts (**rappel**)

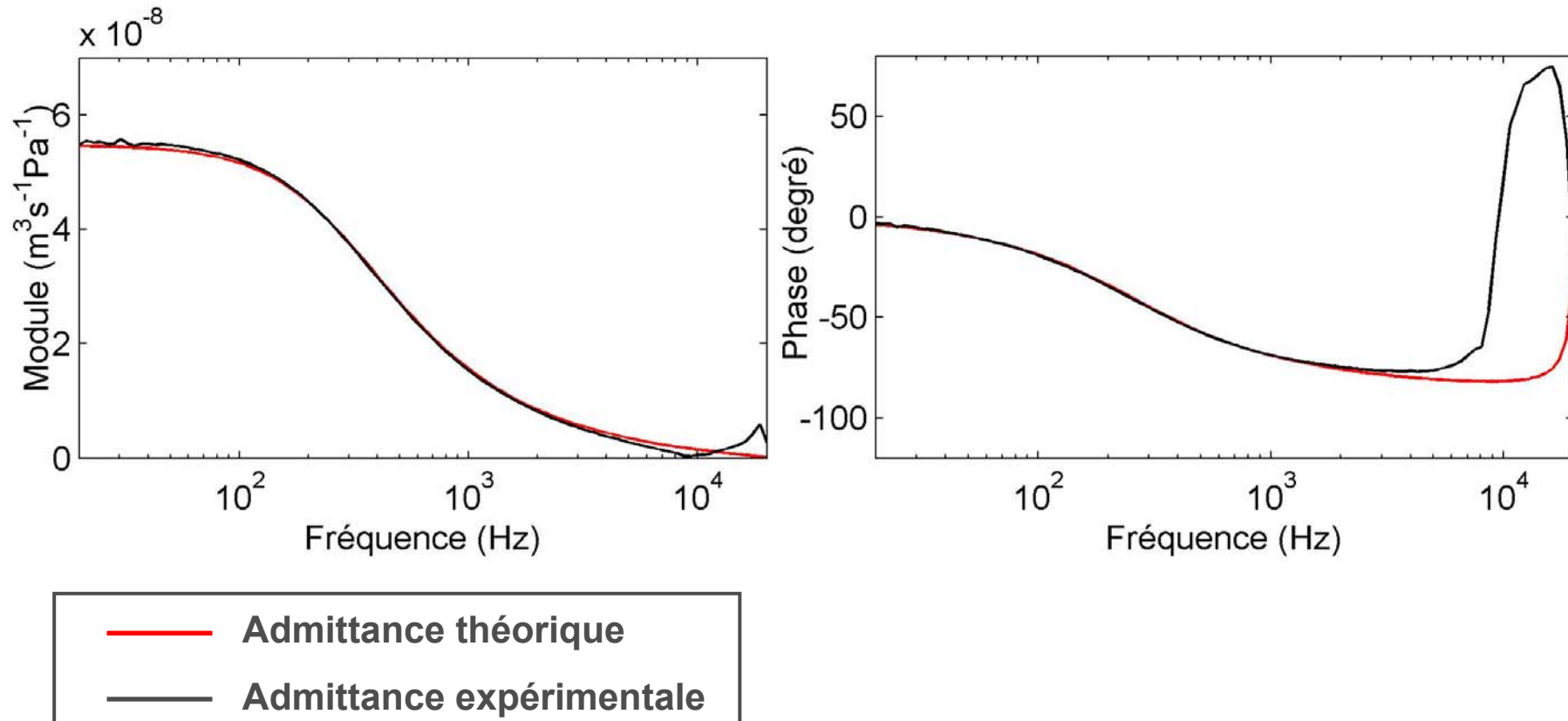


- (—) Admittance expérimentale
- (- - -) Admittance théorique (dimensions géométriques données par le fabricant)
- (·····) Admittance théorique (dimensions géométriques mesurées)

Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

■ Comparaison des résultats théoriques et expérimentaux

- ✓ 4 tubes ouverts ($\varnothing : 449 \pm 1\mu\text{m}$, longueur : $3.80 \pm 0.01\text{mm}$)



Mesure d'impédance de petits éléments acoustiques

■ Discussion et conclusion

✓ Validation de la méthode de mesure

- Les **mesures** d'impédances de petits éléments acoustiques sont désormais **accessibles** pour les **fréquences inférieures à 5 kHz**
- Un autre dispositif de référence (**fente annulaire**) devrait confirmer ces résultats

✓ Extension aux **hautes fréquences**

- L'extension aux fréquences plus élevées (au-delà de 5 kHz) nécessite l'usage de **modèles acoustiques plus précis** :
 - Prise en compte des **modes radiaux** dans la cavité de couplage
 - Effets de la **non uniformité du champ de pression** à l'avant de la membrane du microphone sur son **efficacité**



Modélisation des microphones et du système complet d'étalonnage

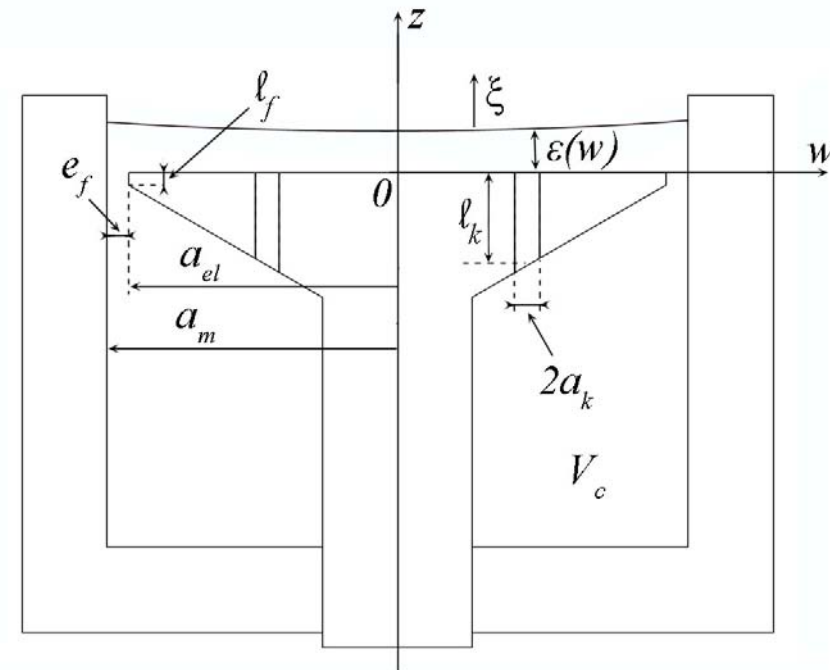
Plan

- Méthode de la réciprocité
- Méthode de la réciprocité en champ libre
 - ✓ Etalonnage en champ libre des microphones par la méthode de la réciprocité
 - Perturbations électrique et acoustique, filtrage, résultats et incertitudes
 - ✓ Centre acoustique d'un microphone électrostatique
 - Méthode analytique et expérimentale
- Méthode de la **réciprocité en pression**
 - ✓ Méthode de mesure d'impédance de petits éléments acoustiques
 - Fente annulaire plate, tubes et cavités
 - ✓ **Etalonnage en pression** des microphones
 - Modèle du microphone
 - Modélisation globale du système d'étalonnage
 - Effet de la forme du champ de pression sur l'efficacité

Modèle du microphone

■ **Modèle** du microphone 1/2'' (Type 4134)

- ✓ Membrane
- ✓ Couche de fluide compressible dissipatif d'épaisseur $\varepsilon(w)$
- ✓ Electrode perforée (6 orifices)
- ✓ Fente périphérique cylindrique
- ✓ Cavité arrière



■ **Modélisation** : équations fondamentales de l'acoustique en fluide **thermovisqueux**

- ✓ Equation de Navier-Stokes
- ✓ Equation de Fourier
- ✓ Equation de conservation de la masse

Modèle du microphone

Equation de Navier-Stokes

✓ Hypothèses simplificatrices

- Epaisseur $\varepsilon(w)$ faible devant le diamètre de la membrane
- Modèle **axisymétrique**

$$\left(\frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} - \ell'_v \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) v_w(w, z) = \frac{-1}{\rho_0 c_0} \frac{\partial}{\partial w} p_\ell(w)$$

✓ Conditions aux limites

- Condition de **non glissement** en $z = \varepsilon(w)$
- Condition de **glissement moyen** sur l'électrode arrière
 - Vitesse radiale approchée par l'équation d'Euler sur les orifices
 - Vitesse nulle sur la surface de l'électrode (hors orifices)

$$v_w(w, \varepsilon(w)) = 0$$

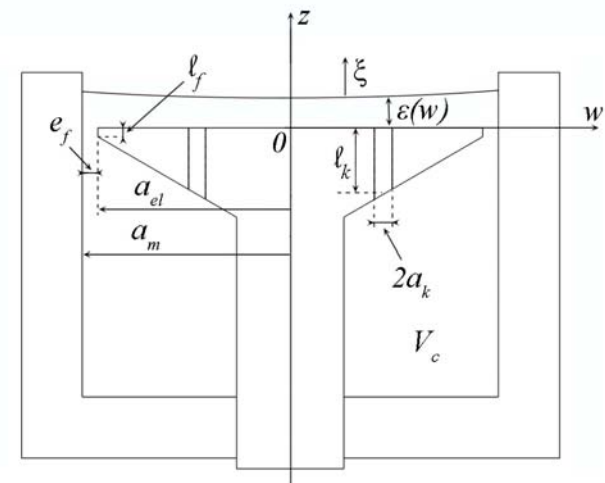
$$v_w(w, 0) = \frac{-y_w}{j\omega\rho_0} \frac{\partial}{\partial w} p_\ell(w)$$

avec

$$y_w = \frac{\sum_k S_k}{S_{el}}$$

✓ Solution

$$\langle v_w(w) \rangle_\varepsilon = \frac{-1}{j\omega\rho_0} F_v(w) \frac{\partial}{\partial w} p_\ell(w)$$



Modèle du microphone

Equation de Fourier

✓ Hypothèses simplificatrices

- Epaisseur $\varepsilon(w)$ faible devant le diamètre de la membrane
- Modèle axisymétrique

$$\left(\frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} - \ell_h \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \tau(w, z) = \frac{\gamma - 1}{\hat{\beta} \gamma} \frac{1}{c_0} \frac{\partial}{\partial t} p_\ell(w)$$

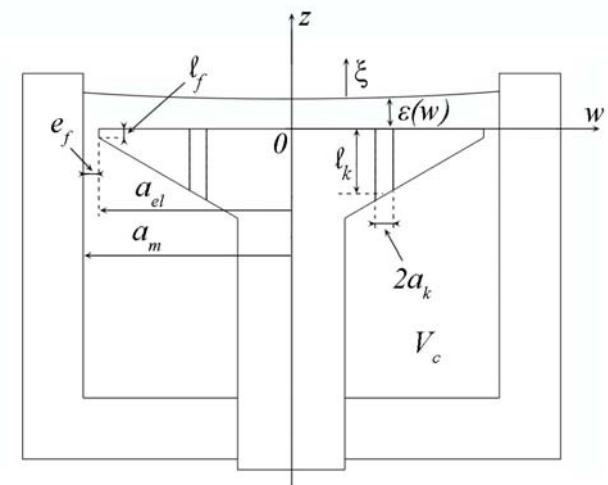
✓ Conditions aux limites

- Condition isotherme en $z = \varepsilon(w)$
- Condition isotherme en $z = 0$
 - Approximation compte tenu de la présence des orifices

$$\begin{aligned} \tau(w, 0) &= 0 \\ \tau(w, \varepsilon(w)) &= 0 \end{aligned}$$

✓ Solution

$$\langle \tau(w) \rangle_\varepsilon = \frac{\gamma - 1}{\hat{\beta} \gamma} F_h(w) p_\ell(w)$$



Modèle du microphone

Equation de conservation de la masse

$$\frac{j\omega\gamma}{\rho_0 c_0^2} (p_\ell - \hat{\beta} \langle \tau \rangle_\varepsilon) + \frac{1}{w\varepsilon(w)} \frac{\partial}{\partial w} (\langle v_w \rangle_\varepsilon w\varepsilon(w)) = \frac{-1}{\varepsilon(w)} (j\omega\xi(w) - v_z(w,0))$$

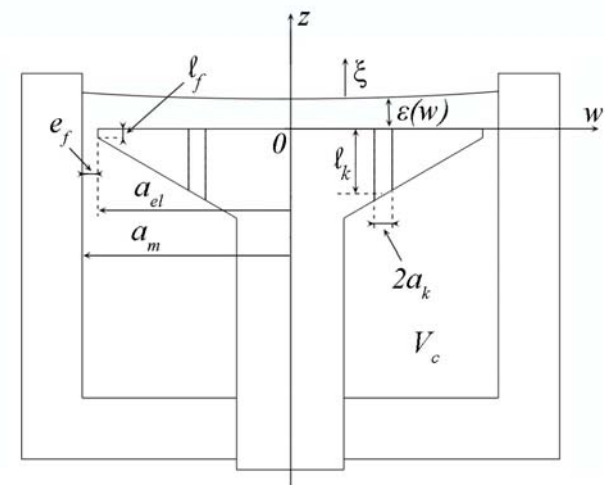
Vitesse normale sur l'électrode : $v_z(w,0)$

- ✓ Débit sortant des orifices
- ✓ Débit sortant de la fente périphérique

➔ $v_z(w,0) \approx -y_\varepsilon p_\ell(w)$

y_ε : **admittance moyenne** (par unité de surface) des orifices

- ✓ **Cavité arrière** : modèle « petite cavité »



Modèle du microphone

Equation de propagation

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial w^2} + \frac{1}{w} \left(1 + \frac{w}{\varepsilon(w)} \frac{\partial}{\partial w} \varepsilon(w) + \frac{w}{F_v(w)} \frac{\partial}{\partial w} F_v(w) \right) \frac{\partial}{\partial w} + \chi^2 \right] p_\ell(w) = \frac{-\omega^2 \rho_0}{F_v(w) \varepsilon(w)} \xi(w)$$

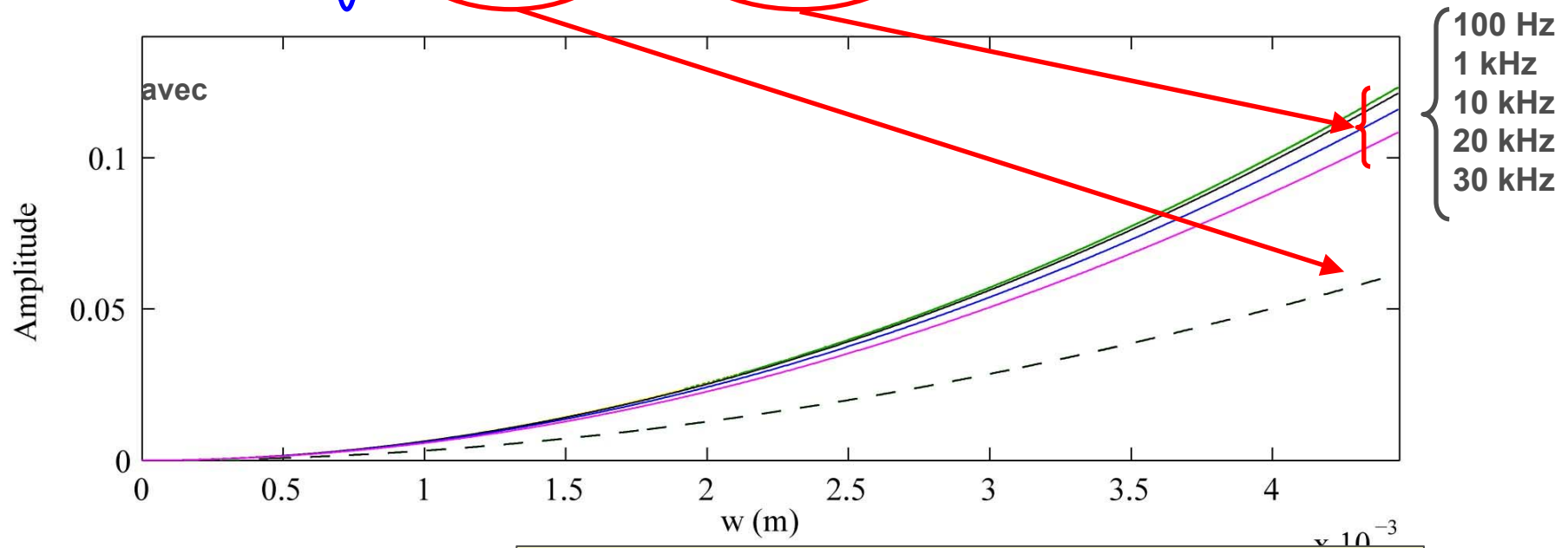
avec

$$\chi^2 = \frac{\omega^2}{c_0^2} \frac{1 + (\gamma - 1) f_h(w)}{1 - f_v(w)} - j\omega \frac{\rho_0 y_\varepsilon}{\varepsilon(w) (1 - f_v(w))}$$

Modèle du microphone

Equation de propagation

$$\left[\frac{\partial^2}{\partial w^2} + \frac{1}{w} \left(1 + \frac{w}{\varepsilon(w)} \frac{\partial}{\partial w} \varepsilon(w) + \frac{w}{F_v(w)} \frac{\partial}{\partial w} F_v(w) \right) \frac{\partial}{\partial w} + \chi^2 \right] p_\ell(w) = \frac{-\omega^2 \rho_0}{F_v(w) \varepsilon(w)} \xi(w)$$



$$\left[\frac{\partial^2}{\partial w^2} + \frac{1}{w} \frac{\partial}{\partial w} + \chi^2 \right] p_\ell(w) = \frac{-\omega^2 \rho_0}{F_v(w) \varepsilon(w)} \xi(w)$$

Modèle du microphone

■ Solutions

- ✓ Champ de **pression** dans la **lame de fluide**

$$p_\ell(w) = \sum_{\mu=0}^{\infty} p_{\ell\mu} E_{\ell\mu}(w)$$

- ✓ Champ de **déplacement** de la **membrane**

$$T_m (\Delta_w + k_w^2) \xi(w) = [p_{av}(w) - p_{av}(a_m)] - [p_\ell(w) - p_\ell(a_m)] + [p_{av}(a_m) - p_\ell(a_m) - p_s]$$

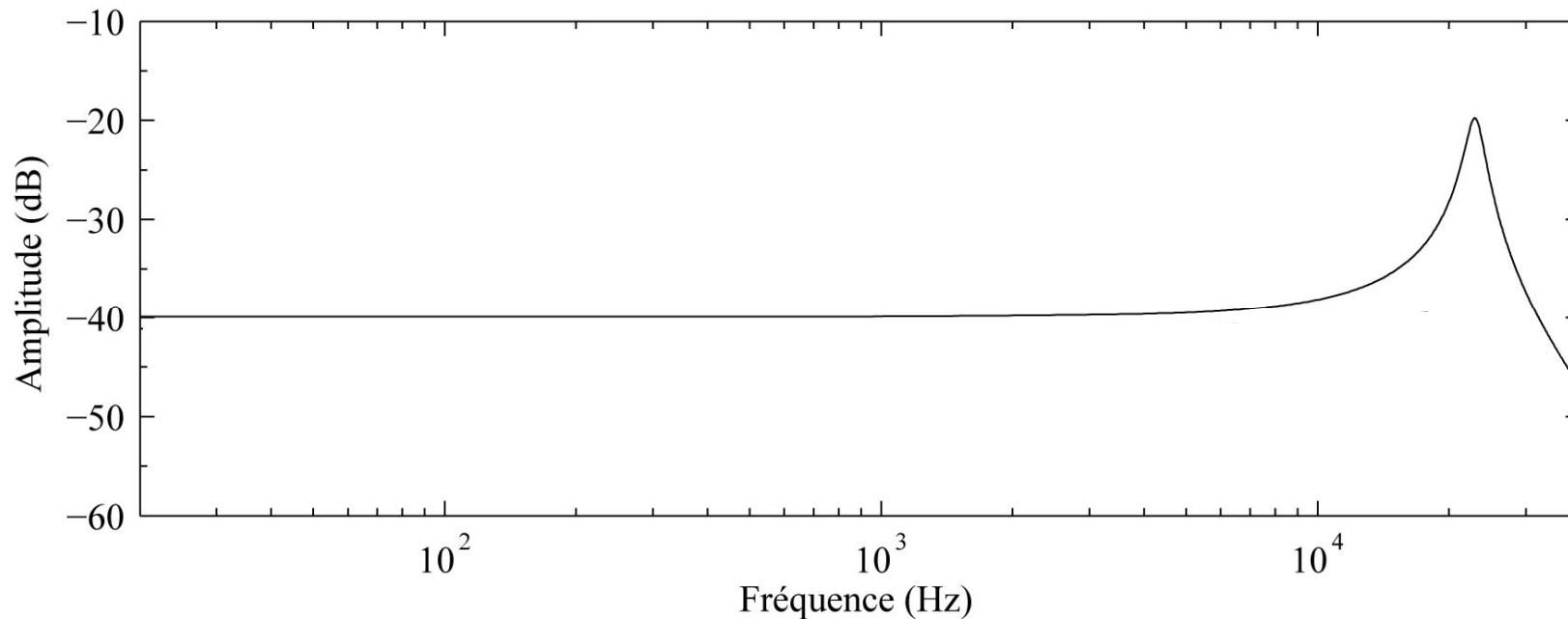
$$\xi(w) = B_0 \left(\frac{J_0(k_w w)}{J_0(k_w a_m)} \right) + \sum_{\mu=0}^{\infty} \xi_\mu \Psi_\mu(w)$$

Modèle du microphone

■ Efficacité en pression (microphone 1/2" Type 4134)

- ✓ Champ de **pression** à l'avant de la membrane **uniforme**

$$M_P = \frac{u_{r0}}{p_{av}} \longrightarrow \begin{array}{l} \text{Tension en circuit ouvert : } u_{r0} = \frac{2\pi U_0}{S_{el}\epsilon} \int_0^{a_{el}} \xi(w)w dw \\ \text{Pression à l'avant de la membrane} \end{array}$$



Modèle du microphone

■ Efficacité en pression (microphone 1/2" Type 4134)

- ✓ Champ de **pression** à l'avant de la membrane **uniforme**

$$M_P = \frac{u_{r0}}{p_{av}}$$

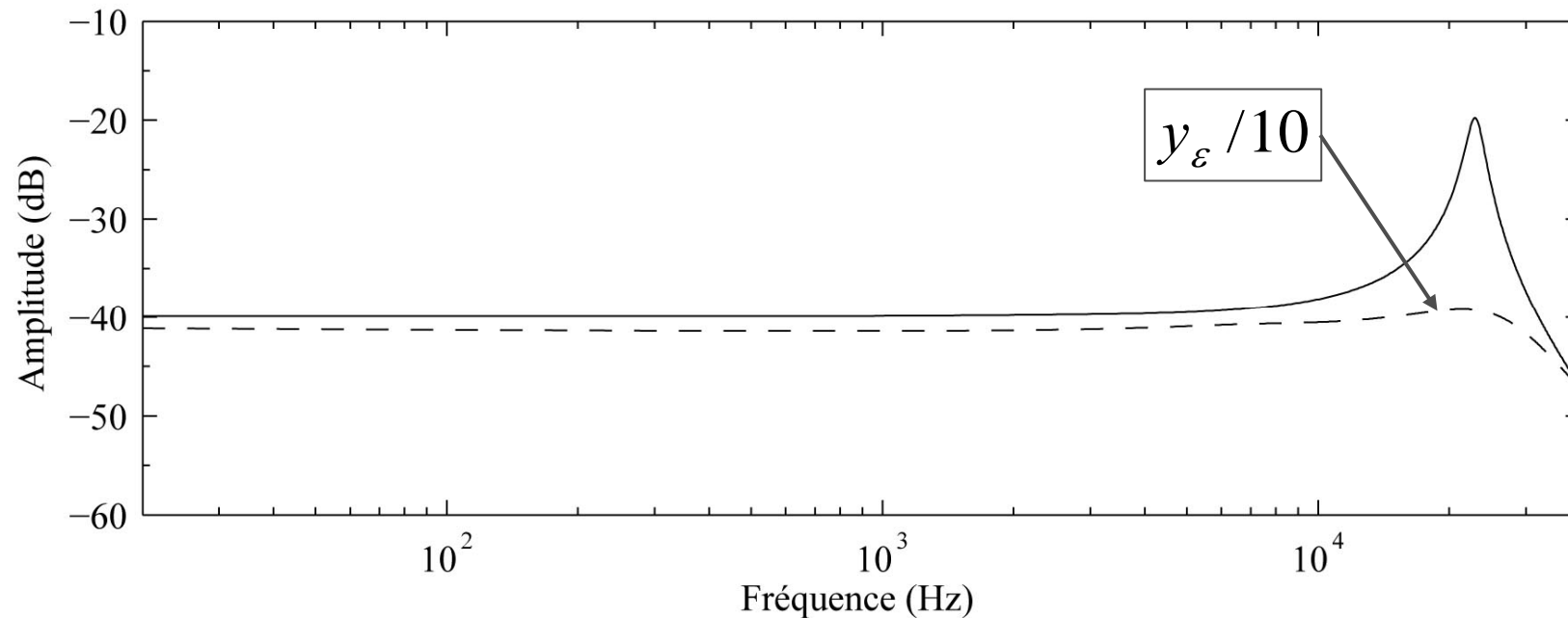


Tension en circuit ouvert : $u_{r0} = \frac{2\pi U_0}{S_{el}\epsilon} \int_0^{a_{el}} \xi(w)w dw$



Pression à l'avant de la membrane

$$u_{r0} = \frac{2\pi U_0}{S_{el}\epsilon} \int_0^{a_{el}} \xi(w)w dw$$



Modélisation globale du système d'étalonnage

■ Efficacité en pression

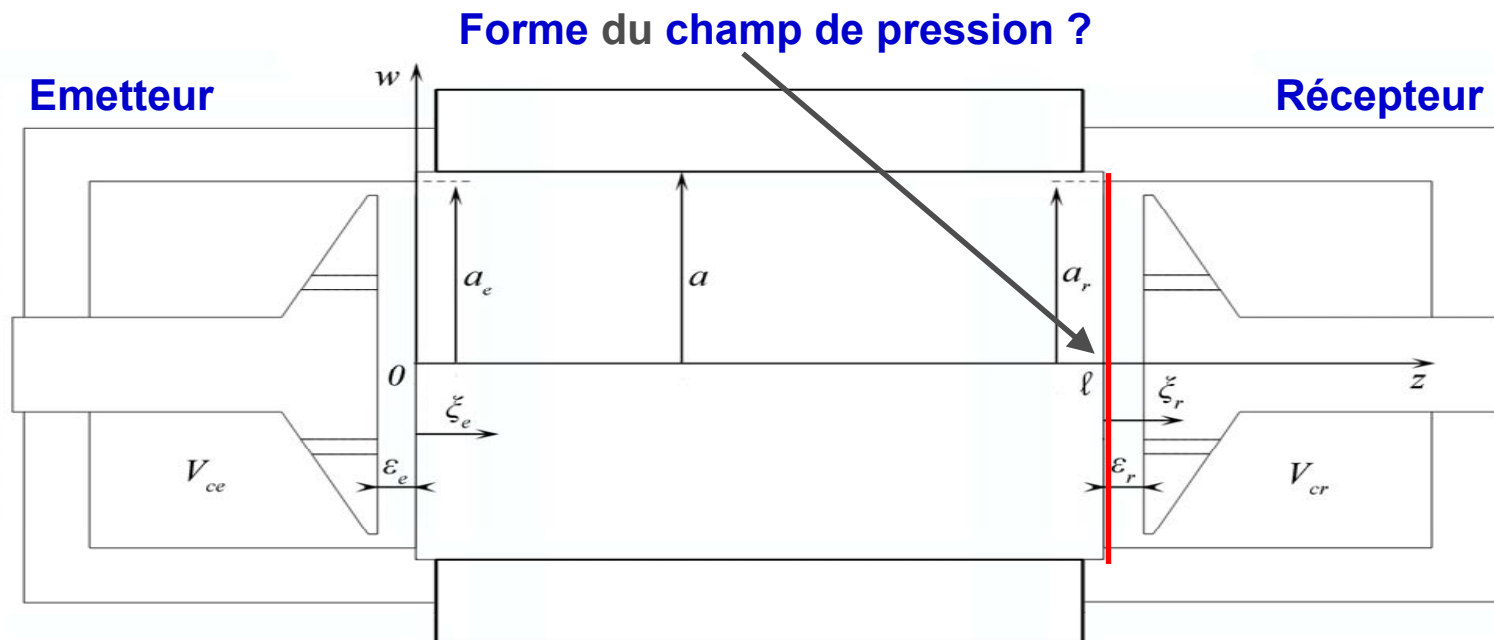
✓ Champ de **pression** à l'avant de la membrane **non uniforme**

• Pression **moyenne**

$$M_P = \frac{u_{r0}}{\langle p_{av}(w) \rangle_m}$$

• Pression **moyenne pondérée**

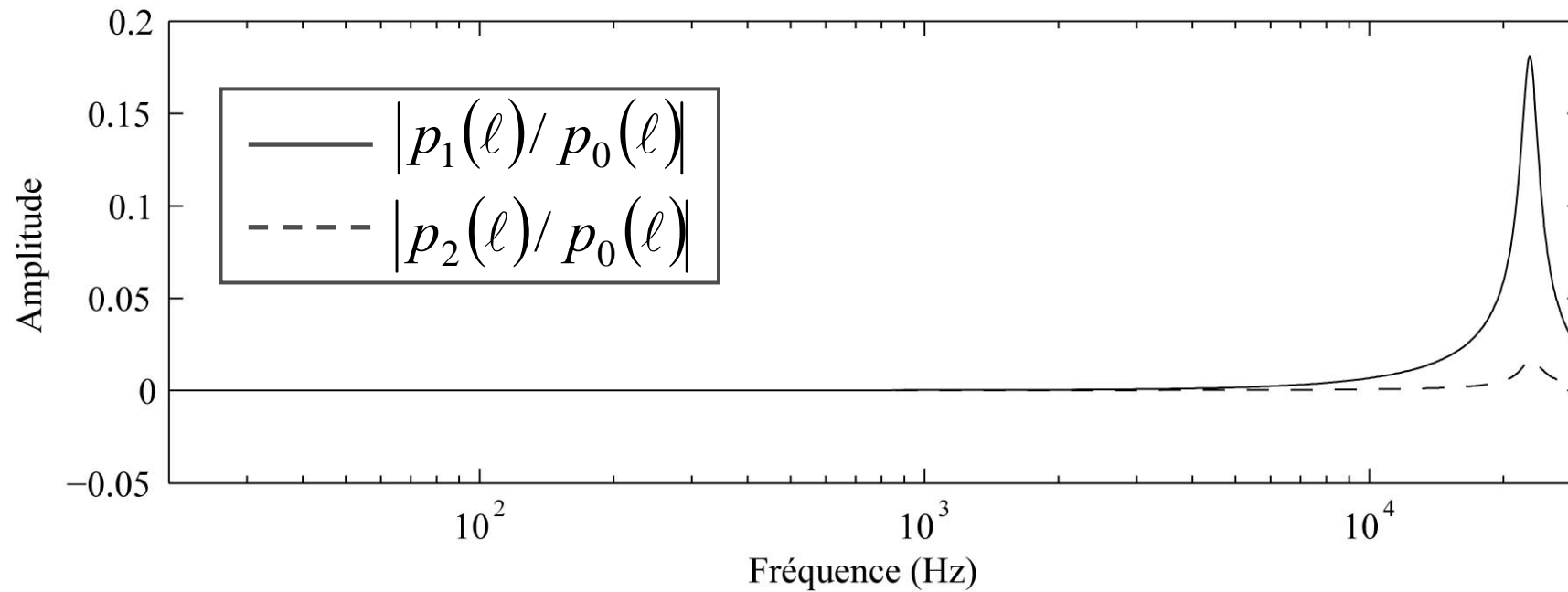
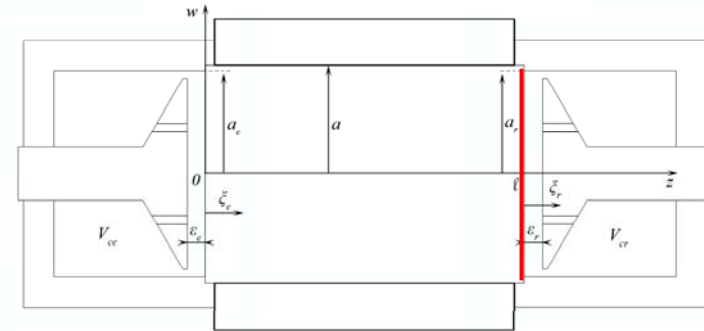
$$M_P = \frac{u_{r0}}{\langle \bar{v}(w) p_{av}(w) \rangle_m}$$



Modélisation globale du système d'étalonnage

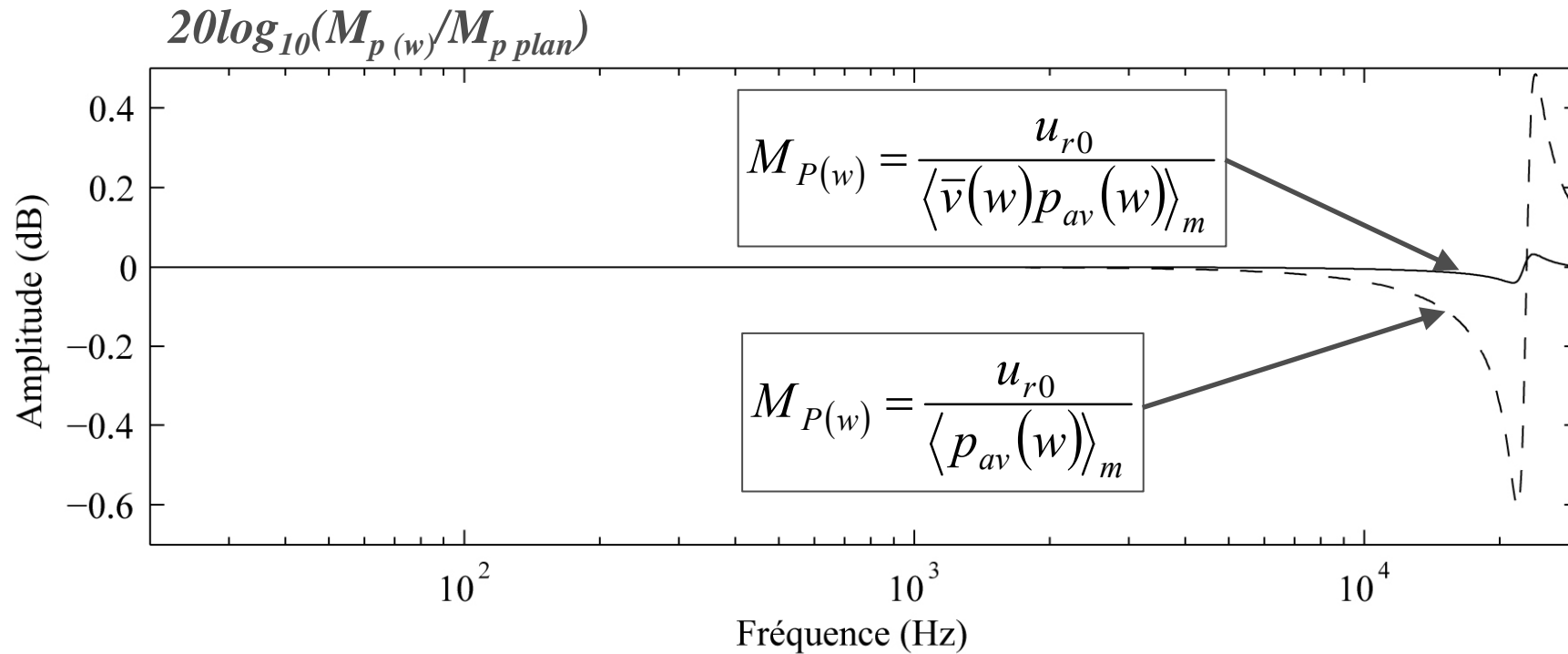
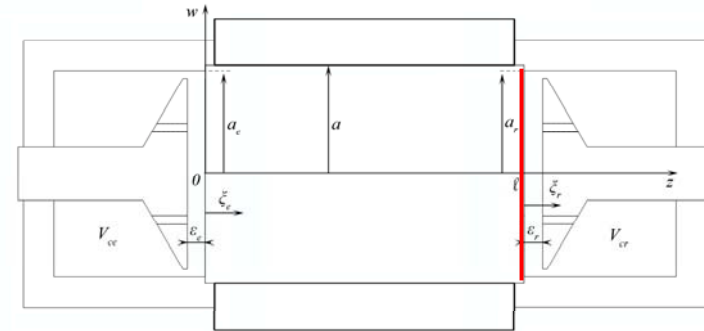
- Forme du champ de pression à l'avant de la membrane du microphone récepteur

$$p(z, w) = \sum_{\mu=0}^{\infty} p_{\mu}(z) \Xi_{\mu}(w)$$



Modélisation globale du système d'étalonnage

- **Influence des modes radiaux sur l'efficacité en pression du microphone récepteur**



Etalonnage en pression des microphones

■ Discussion et conclusion

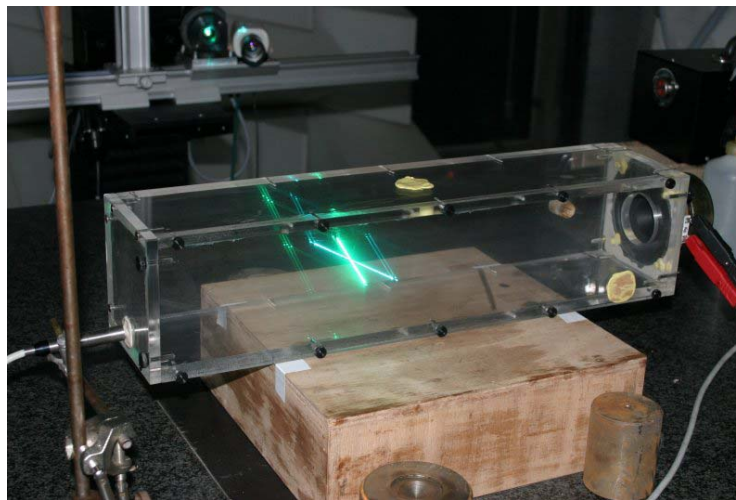
- ✓ **Influence** des **modes radiaux** sur les résultats de l'étalonnage non négligeable
- ✓ K. Rasmussen propose de corriger les effets de la **non uniformité** du **champ de pression** à l'aide d'un facteur de **pondération** appliqué au champ de pression à l'avant de la membrane du microphone
- ✓ Le bien fondé du **facteur de pondération** retenu, pour **corriger les effets liés à la non uniformité du champ de pression** à l'avant de la membrane du microphone dans l'expression de son efficacité, a été vérifié
- ✓ Une **modélisation** approchée d'un **microphone électrostatique** conduit à une **efficacité** conforme au résultat attendu en basses fréquences, mais s'en écarte aux fréquences supérieures à 10 kHz



Modélisation par éléments finis

Perspectives

- **Mesure de la vitesse particulaire** par des **méthodes optiques non intrusives**
 - ✓ Technologies envisagées
 - Vélocimétrie Laser Doppler (**VLD**)
 - Vélocimétrie par Image de Particule (**PIV**)
 - ✓ **Perspectives nouvelles** pour la métrologie acoustique :
 - **Étalonnage** primaire des microphones étalons en **pression** et en **champ libre**
 - **Étalonnage** des **sondes intensimétriques**



Mesure de la vitesse particulaire par VLD

Perspectives

- **Modélisation par éléments finis de l'acoustique en fluide thermovisqueux**
 - ✓ Les **modélisations** actuelles en **méetrologie acoustique** reposent sur des formulations **analytiques**
 - Les modèles rendent compte des phénomènes de résonances acoustiques, des effets liés à la **diffusion thermique** et à la **viscosité** de l'air
 - ✓ Ces modèles ne permettent pas de rendre compte de tous les **détails** de la **géométrie** des systèmes
 - ✓ Ces insuffisances constituent les **limites** des **systèmes d'étalonnage** actuels

