

Contribution à l'estimation de la vitesse
acoustique par Vélocimétrie Laser Doppler
&
Application à l'étalonnage de microphones en
champ libre

Anne Degroot

sous la direction de : Bruno Gazengel, Maître de Conférence,
Olivier Richoux, Maître de Conférence,
Laurent Simon, Professeur.

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine
UMR-CNRS 6613

11 octobre 2007

Pourquoi mesurer la vitesse acoustique ?

Caractériser des champs acoustiques complexes

Introduction



Forts écoulements

Faibles écoulements

Pourquoi mesurer la vitesse acoustique ?

Champ acoustique au voisinage de structures vibrantes et de discontinuités géométriques

- Pression acoustique → microphone (intrusif)
- Vitesse acoustique → $\left\{ \begin{array}{l} \text{fil chaud (intrusif)} \\ \text{VLD et PIV (faiblement intrusif)} \end{array} \right.$

Pourquoi mesurer la vitesse acoustique ?

Champ acoustique au voisinage de structures vibrantes et de discontinuités géométriques

- Pression acoustique → microphone (intrusif)
- Vitesse acoustique → $\left\{ \begin{array}{l} \text{fil chaud (intrusif)} \\ \text{VLD et PIV (faiblement intrusif)} \end{array} \right.$

⇒ Contexte de l'étude : caractériser le champ acoustique au voisinage de structures vibrantes par moyens de mesure faiblement intrusifs

Pourquoi étudier l'étalonnage de microphones ?

Contexte : Étalonnage par réciprocité

- Champ clos : petite cavité, modèle physique de la réponse de la cavité [Guianvarc'h, Bruneau, 2005].
- Champ libre : niveau sonore faible, modèle physique équivalent [Barrera-Figueroa, 2003], [Rodrigues, 2006].

Pourquoi étudier l'étalonnage de microphones ?

Contexte : Étalonnage par réciprocité

- Champ clos : petite cavité, modèle physique de la réponse de la cavité [Guianvarc'h, Bruneau, 2005].
- Champ libre : niveau sonore faible, modèle physique équivalent [Barrera-Figueroa, 2003], [Rodrigues, 2006].

Problématique : Étalonnage en champ libre

- Utilisation d'une méthode non intrusive.
- Caractérisation du champ de pression par des mesures de vitesses acoustiques.

Objectifs de la thèse

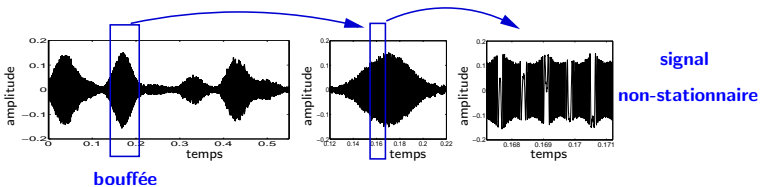
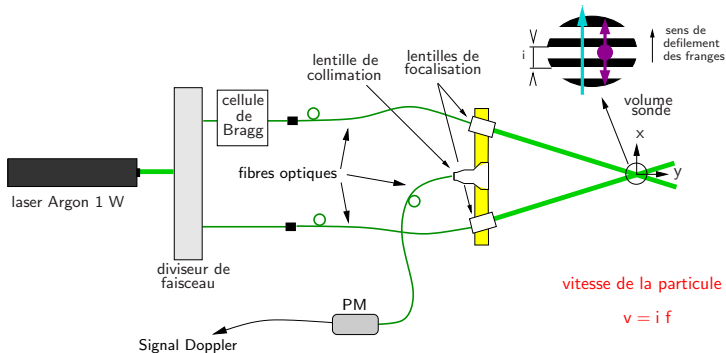
- Étalonnage de microphones en champ libre par VLD en présence de faibles écoulements

Objectifs de la thèse

- Étalonnage de microphones en champ libre par VLD en présence de faibles écoulements
- Améliorer le Traitement du Signal Doppler acoustique en présence de faibles écoulements (de quelques mm/s au m/s)

Dispositif optique

Introduction



Modèle du signal Doppler acoustique

$$s(t) = \sum_q s_q(t)$$

signal de bouffée Doppler analytique $z_q(t)$ de $s_q(t)$

$$z_q(t) = A_q(t) \exp[j\phi_q(t)] \rightarrow \begin{cases} A_q(t) & = \exp\left[-\left(\frac{2x_q(t)}{dx_o}\right)^2\right] \\ \phi_q(t) & = \frac{2\pi x_q(t)}{j} \end{cases}$$

$x_q(t)$: déplacement particulaire

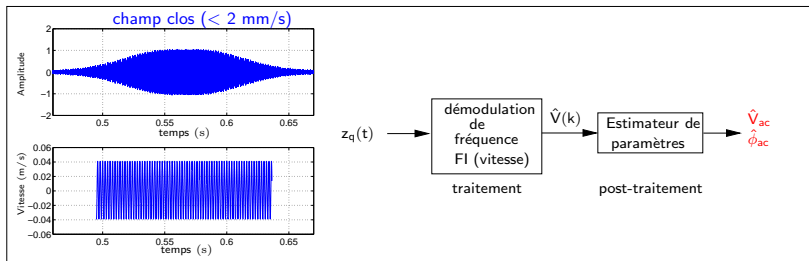
$$x_q(t) = V_{e,q} \times (t - t_{c,q}) + \frac{V_{ac}}{2\pi f_{ac}} \sin(2\pi f_{ac} t + \phi_{ac})$$

- f_{ac} connue
- $t_{c,q}$: date de passage de la particule au centre du volume de mesure

$\hat{V}_{ac}, \hat{\phi}_{ac}$: Paramètres acoustiques
 $\hat{V}_{e,q}$: Vitesse d'écoulement

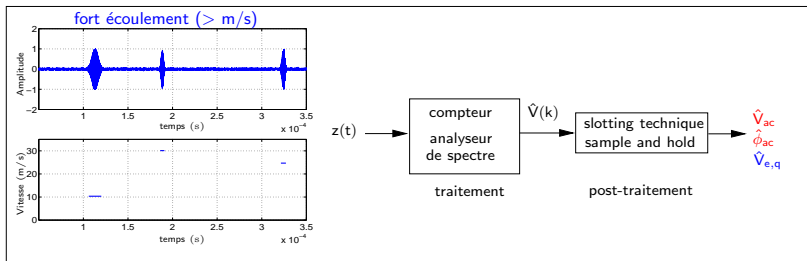
État de l'art

Introduction



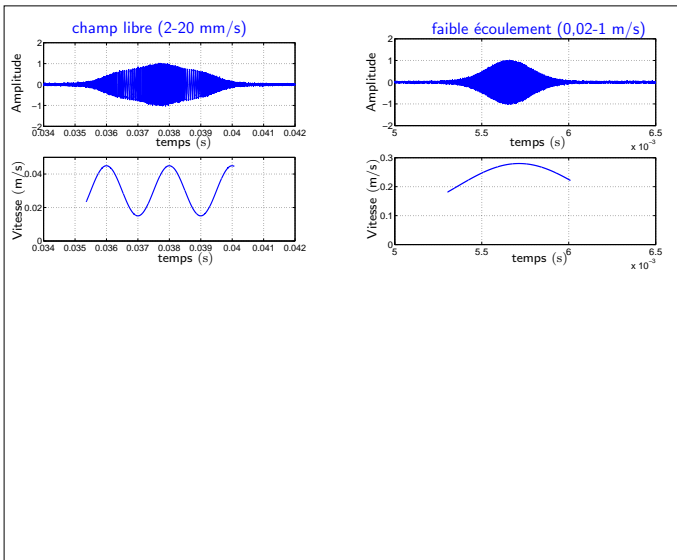
État de l'art

Introduction

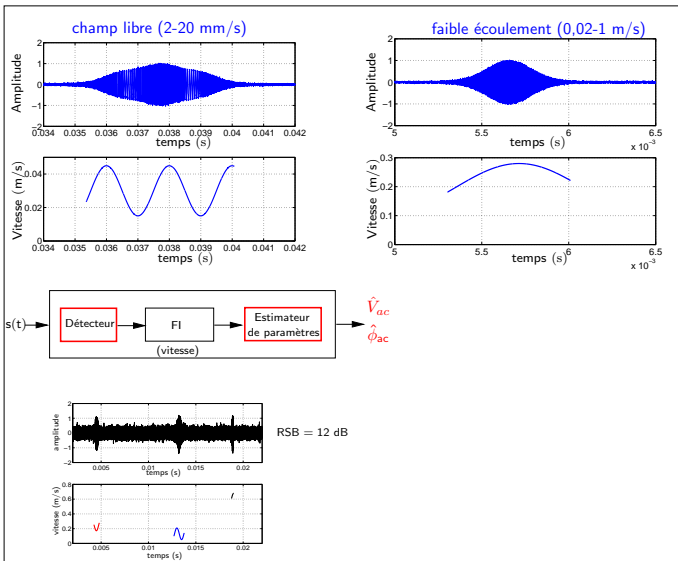


Besoins

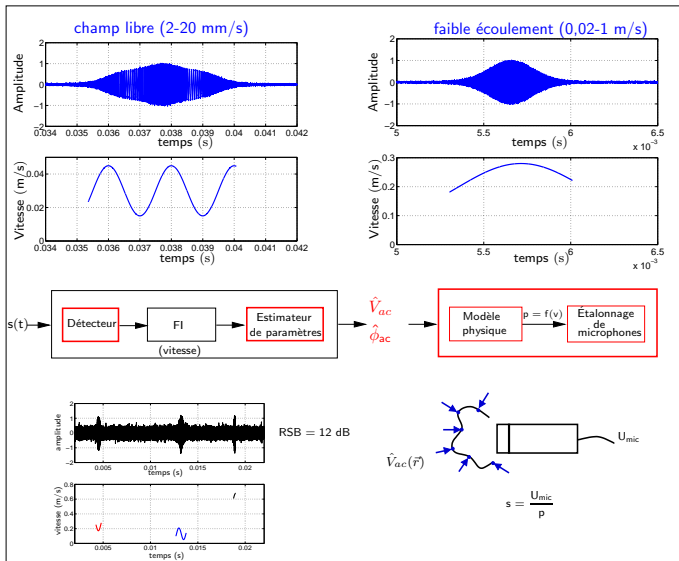
Introduction



Besoins



Besoins



Plan

Introduction

- Introduction
- Partie I : Détection de bouffées Doppler pour l'estimation de la vitesse acoustique en présence d'écoulement
- Partie II : Étalonnage de microphones
- Perspectives

Problématique

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinee

Classification

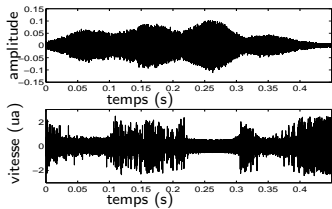
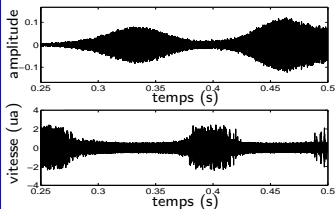
Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions



Problématique

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affine

Classification

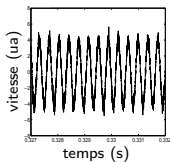
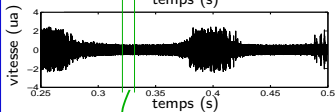
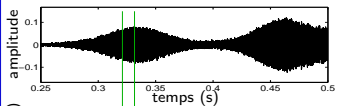
Validation et Résultats

Courbes ROC

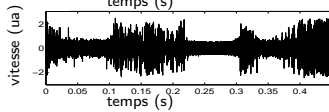
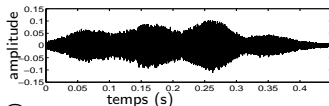
Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions



$$\hat{V}_{ac}, \hat{\phi}_{ac}$$
$$\hat{V}_{e,q}$$



Problématique

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinee

Classification

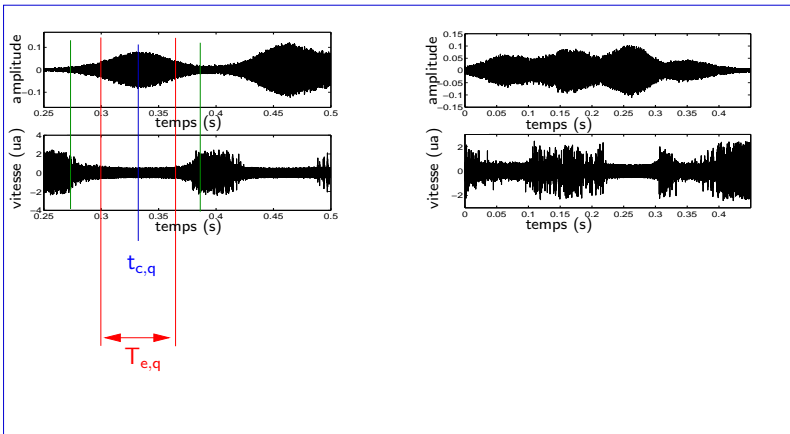
Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions



détection

localiser

★ temps de vol

★ temps central

Problématique

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

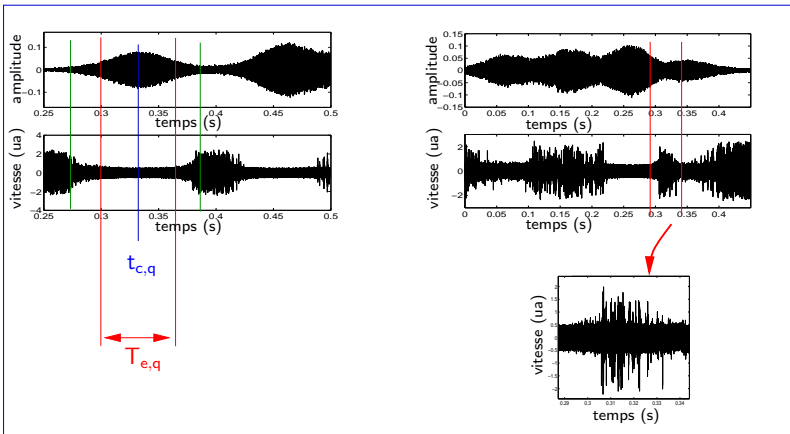
Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions



détecter

localiser

★ temps de vol

★ temps central

classifier
(mono ou multi)

Informations a priori sur le signal Doppler et test de détection

- Signal Doppler : aléatoire et non-stationnaire
- Bruit non Gaussien

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

Validation et

Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

Informations a priori sur le signal Doppler et test de détection

- Signal Doppler : aléatoire et non-stationnaire
- Bruit non Gaussien



$H_0 : z(t) = b(t)$ → portion **bruitée** de signal

$H_1 : z(t) = b(t) + z_q(t)$ pour $q = 1$ → **mono** bouffée

$H_2 : z(t) = b(t) + \sum_{q>1}^N z_q(t)$ → **multi** bouffée

Informations a priori sur le signal Doppler et test de détection

- Signal Doppler : aléatoire et non-stationnaire
- Bruit non Gaussien



$H_0 : z(t) = b(t)$ → portion **bruitée** de signal

$H_1 : z(t) = b(t) + z_q(t)$ pour $q = 1$ → **mono** bouffée

$H_2 : z(t) = b(t) + \sum_{q>1}^N z_q(t)$ → **multi** bouffée



comparaison d'une **représentation du signal** à un niveau de **référence de bruit**

Similitudes entre ondelette et bouffée Doppler

Ondelette

$$\Delta t = k/f_0$$

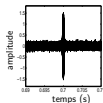
composantes HF de courte durée

composantes BF de longue durée

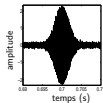
Bouffée

$$T_{e,q} = K/F_q$$

$$T_{e,q} = \Delta T \quad \text{et} \quad F_q = V_{e,q}/i$$



$V_{e,q}$ grand \rightarrow HF
bouffée courte



$V_{e,q}$ faible \rightarrow BF
bouffée longue

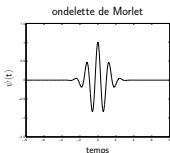
Similitudes entre ondelette et bouffée Doppler

Ondelette

$$\Delta t = k/f_0$$

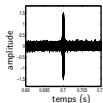
composantes HF de courte durée

composantes BF de longue durée

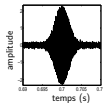


Bouffée

$$T_{e,q} = K/F_q$$
$$T_{e,q} = \Delta T \quad \text{et} \quad F_q = V_{e,q}/i$$



$V_{e,q}$ grand \rightarrow HF
bouffée courte



$V_{e,q}$ faible \rightarrow BF
bouffée longue

Quelle ondelette ?

$$\psi(t) = (\pi\sigma_0^2)^{-1/4} \exp\left(-\frac{1}{2}\left[\frac{t}{\sigma_0}\right]^2\right) \exp(j\omega_0 t)$$

Représentation en ondelettes

Coefficient d'ondelette

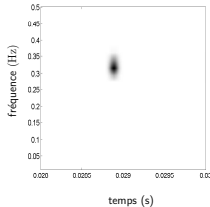
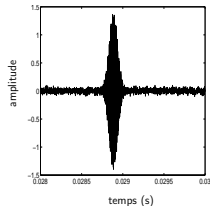
$$W_z(t_0, a) = \int_{-\infty}^{+\infty} z(t) \frac{1}{\sqrt{a}} \psi^* \left(\frac{t - t_0}{a} \right) dt.$$

Scalogramme

$$|W_z(t_0, a)|^2$$

temps-échelle ou temps-fréquence
(analogie : $f \equiv f_0/a$)

f_0 : fréquence centrale de la TF de
 $\psi(t)$ (ondelette mère)



Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinee

Classification

Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

Intérêt de la transformée en ondelettes ?

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affine

Classification

Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

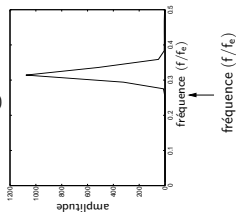
Partie I :

Conclusions

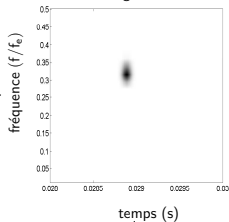
informations fréquentielles

marginale fréquentielle (1D)

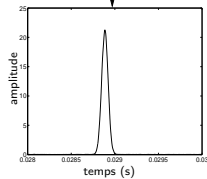
$$\int_t |W_{zt,f}|^2 dt$$



scalogramme



temps (s)



informations temporelles

marginale temporelle (1D)

$$\int_f |W_{zt,f}|^2 df$$

Intérêt de la transformée en ondelettes ?

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affine

Classification

Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

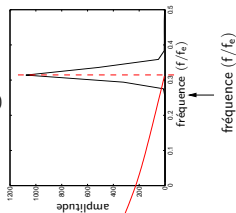
Partie I :

Conclusions

informations fréquentielles

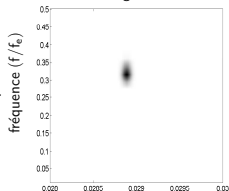
marginale fréquentielle (1D)

$$\int_t |W_{zt,f}|^2 dt$$

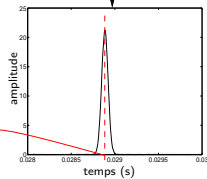


$V_{e,q}/i$

scalogramme



temps (s)



$t_{c,q}$

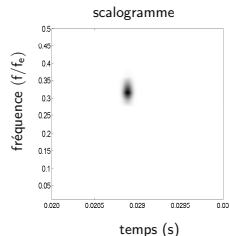
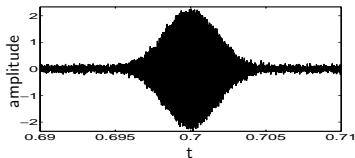
informations temporelles

marginale temporelle (1D)

$$\int_f |W_{zt,f}|^2 df$$

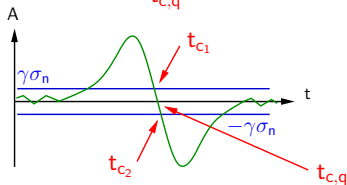
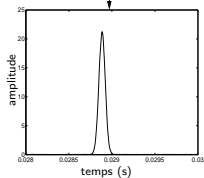
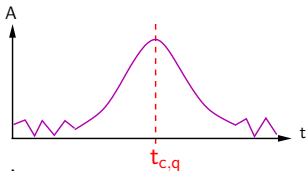
Représentation temporelle du signal : principe de la détection et localisation

Bouffée



Représentation temporelle

- ★ enveloppe
- ★ ondelettes



informations temporelles
marginale temporelle (1D)

$$\int_f |W_{zt,f}|^2 df$$

γ : seuil de détection

Procédure de détection
Temps central

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

Validation et Résultats

Courbes ROC

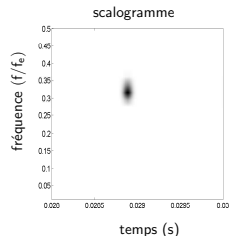
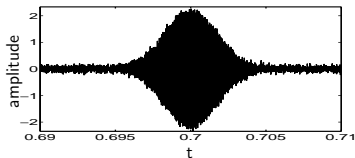
Taux d'Insertion

Partie I :

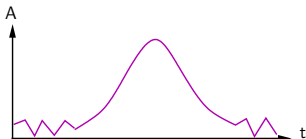
Conclusions

Représentation temporelle du signal : principe de la détection et localisation

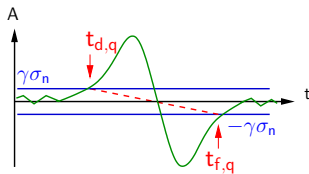
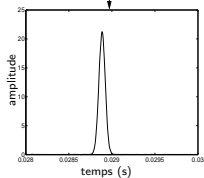
Bouffée



Représentation temporelle



- ★ enveloppe
- ★ ondelettes



Localisation temporelle

informations temporelles
marginale temporelle (1D)

$$\int_f |W_{z_t, f}|^2 df$$

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

Représentation fréquentielle et localisation temporelle : localisation affinée

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

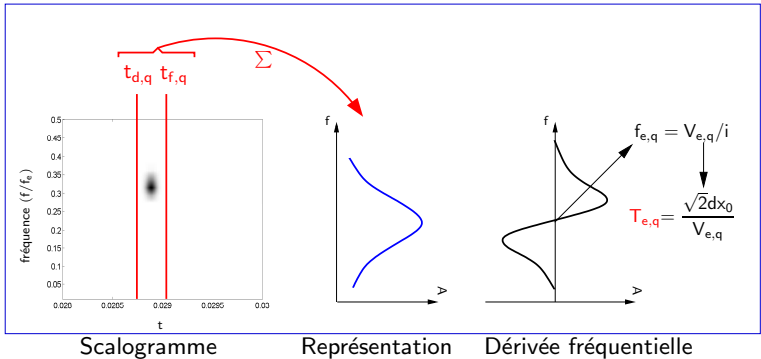
Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions



Localisation temporelle

Temps central $t_{c,q}$ → représentation temporelle

Temps de vol $T_{e,q}$ → représentation fréquentielle

Estimation temps début : $\bar{t}_{d,q} = t_{c,q} - \frac{T_{e,q}}{2}$

Estimation temps fin : $\bar{t}_{f,q} = t_{c,q} + \frac{T_{e,q}}{2}$

Distinction mono/multi :

analyse des dates de début et de fin estimées des événements détectés

2 bouffées détectés (t_{d,q_1} , t_{f,q_1}) et (t_{d,q_2} , t_{f,q_2})

Si $t_{f,q_1} > t_{d,q_2}$

2 bouffées = 1 multi bouffée

Synthèse des outils développés

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

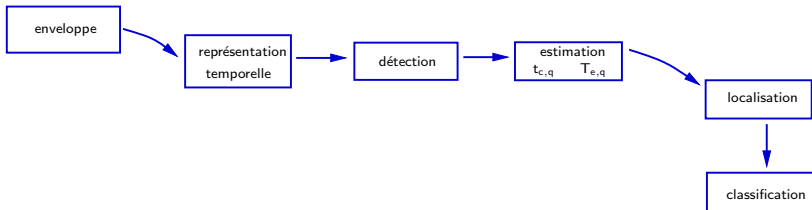
Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions



Synthèse des outils développés

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

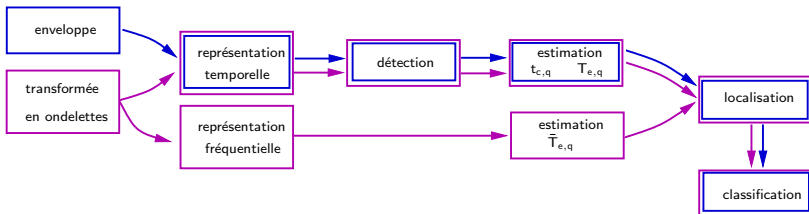
Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions



Plan d'expérience

- enveloppe
- ondelette $\omega_0 = 5$
- ondelette $\omega_0 = 10$

- Amplitude des bouffées : statistique de Rayleigh
- 1260 événements (1/3 H_0 , 1/3 H_1 et 1/3 H_2) pour 1 simulation

Paramètres du signal

L (dB _{SPL})	V _{ac} (mm/s)	f _{ac} (Hz)	< V _{e,q} > (mm/s)
80	0.484	1000	20
100	4.84	125	15
120	48.4	500	100

1 jeu de paramètres testé pour 4 RSB : -5, 0, 5 et 10 dB

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

Validation et Résultats

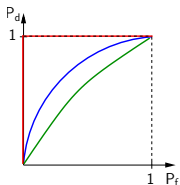
Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

Courbes ROC : performances d'un détecteur binaire



P_d : probabilité de détection

P_f : probabilité de fausse alarme

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affine

Classification

Validation et

Résultats

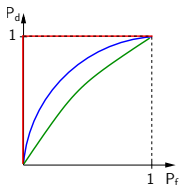
Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

Courbes ROC : performances d'un détecteur binaire



P_d : probabilité de détection
 P_f : probabilité de fausse alarme

Test à 3 hypothèses

$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Bruit} & H_0 \\ \text{Mono} & H_1 \\ \text{Multi} & H_2 \end{array} \right.$

\Rightarrow

Test à 2 hypothèses

$\left\{ \begin{array}{ll} \text{Bruit} & H_0 \\ \text{Mono et Multi} & H_{1,2} \end{array} \right.$

$$P_d = \frac{N_1 + N_2 + N_{1|2} + N_{2|1}}{N_{T,1+2}}$$

$$P_f = \frac{N_{1|0} + N_{2|0}}{N_{T,0}}$$

Courbes ROC : résultats

Jeu de paramètres : $80 \text{ dB}_{\text{SPL}}$, $f_{\text{ac}} = 1000 \text{ Hz}$, $V_{e,q} = 20 \text{ mm/s}$

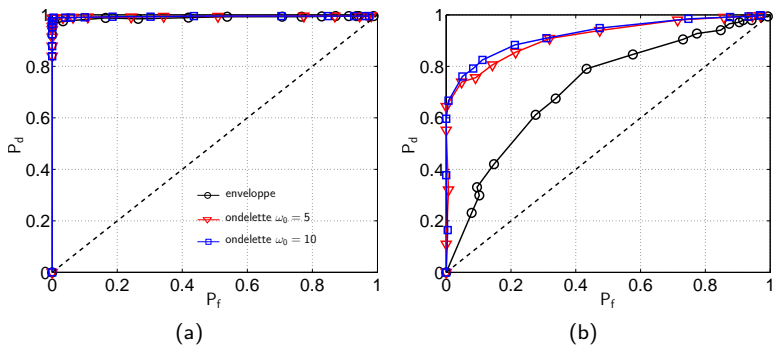


FIG.: (a) $\text{RSB} = 10 \text{ dB}$ et (b) $\text{RSB} = -5 \text{ dB}$

Taux d'Insertion : performances d'un détecteur multi-hypothèses

Capacités du détecteur à identifier les mono et multi bouffées.

Taux d'Insertion :

$$TI = \frac{N_3 + N_4 + N_5}{N_{T,1+2}}$$

$$N_3 = N_{1|2} + N_{2|1} \quad \rightarrow \text{substitutions,}$$

$$N_4 = N_{T,1+2} - N_1 - N_2 \quad \rightarrow \text{suppressions,}$$

$$N_5 = N_{1|0} + N_{2|0} \quad \rightarrow \text{créations.}$$

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

Taux d'Insertion : performances d'un détecteur multi-hypothèses

Capacités du détecteur à identifier les mono et multi bouffées.

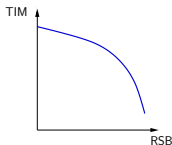
Taux d'Insertion :

$$TI = \frac{N_3 + N_4 + N_5}{N_{T,1+2}}$$

$$N_3 = N_{1|2} + N_{2|1} \quad \rightarrow \text{substitutions,}$$

$$N_4 = N_{T,1+2} - N_1 - N_2 \quad \rightarrow \text{suppressions,}$$

$$N_5 = N_{1|0} + N_{2|0} \quad \rightarrow \text{créations.}$$



1 RSB \Rightarrow 1 Taux d'Insertion Minimum (TIM)

Taux d'Insertion Minimum : résultats

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affine

Classification

Validation et Résultats

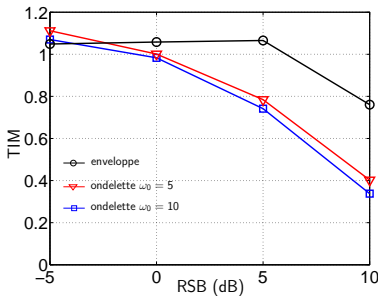
Courbes ROC

Taux d'Insertion

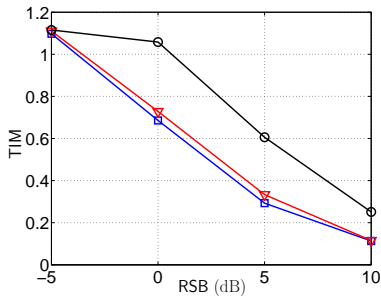
Partie I :

Conclusions

120 dB_{SPL}, $f_{ac} = 500$ Hz,
 $\langle V_{e,q} \rangle = 100$ mm/s



80 dB_{SPL}, $f_{ac} = 1000$ Hz,
 $\langle V_{e,q} \rangle = 20$ mm/s



Traitement du
signal

Détection

Ondelettes

Détection et
localisation

Principe

Localisation
affinée

Classification

Validation et
Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

Résultats : détection, localisation et classification

- Ondelette plus performante Enveloppe
- Meilleures performances à mesure que le niveau sonore diminue

Conclusions et discussion (traitement du signal)

Traitement du signal

Détection

Ondelettes

Détection et localisation

Principe

Localisation affinée

Classification

Validation et Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

Résultats : détection, localisation et classification

- Ondelette plus performante Enveloppe
- Meilleures performances à mesure que le niveau sonore diminue

Perspectives

- Signal Doppler \rightarrow RSB=10 dB \rightarrow enveloppe (détection)
- Tester l'influence de la localisation sur l'estimation de \hat{V}_{ac} , $\hat{\phi}_{ac}$ et $\hat{V}_{e,q}$
- Tester l'influence de la classification sur toute la chaîne de traitement

Traitement du
signal

Détection

Ondelettes

Détection et
localisation

Principe

Localisation
affinée

Classification

Validation et
Résultats

Courbes ROC

Taux d'Insertion

Partie I :

Conclusions

- Introduction
- Partie I : Détection de bouffées Doppler pour l'estimation de la vitesse acoustique en présence d'écoulement
- Partie II : Étalonnage de microphones
- Perspectives

Plan Partie II

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique
Etude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

- Étalonnage de microphones en pression : estimation de la pression acoustique par mesure de vitesse acoustique à 1D
- Étalonnage de microphones en champ libre : champ acoustique au voisinage de la membrane

Contexte de l'étude

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

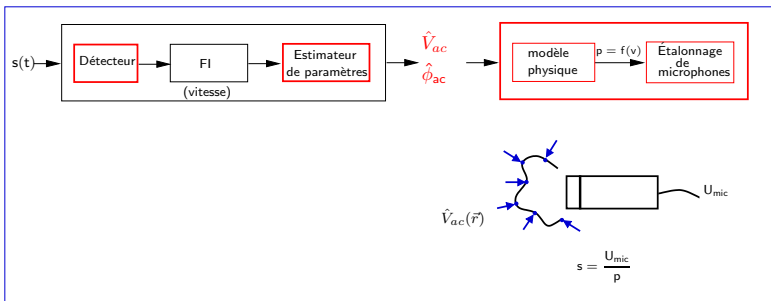
Estimation de la
pression
acoustique

Etude
expérimentale

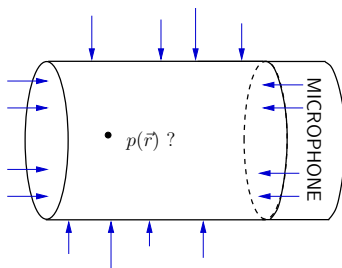
Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions



Principe général



Champ de pression acoustique sous la forme intégrale
(pas de sources $f(\vec{r}_0) = 0$)

$$p(\vec{r}) = \iint_S [G(\vec{r}, \vec{r}_0) \partial_{n_0} p(\vec{r}_0) - p(\vec{r}_0) \partial_{n_0} G(\vec{r}, \vec{r}_0)] dS_0$$

$G(\vec{r}, \vec{r}_0)$: fonction de Green du volume

$$\Rightarrow \partial_{n_0} G(\vec{r}, \vec{r}_0) = 0$$

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique

Etude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

Principe général

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique
Etude
expérimentale

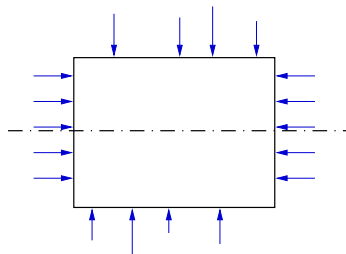
Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions



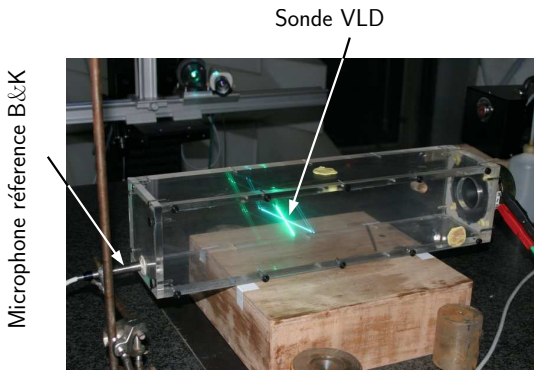
- onde plane
- 1D



- hypothèse :
symétrie de révolution
- 2D

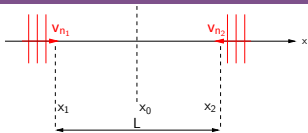
Principe de l'expérience

- Guide d'onde fermé excité par haut-parleur (ondes planes) - fréquence de coupure 1720 Hz
- Pression de référence : mesurée à l'extrémité du tube
- Pression estimée : deux mesures de vitesses dans le tube
- Comparaison des pressions de référence et estimée



Modèle de la pression à 1D

$$x_0 = \frac{x_1 + x_2}{2}$$



Conservation de la masse processus adiabatique

$$j\omega \bar{P}(x) = -\rho c^2 \frac{d\bar{V}(x)}{dx}$$

dérivée spatiale de la vitesse en x_0

$$\bar{P}(x_0) = j\rho c \frac{\Delta \bar{V}}{2 \sin(kL/2)}$$

$$\Delta \bar{V} = v_{n1} + v_{n2} \quad (\text{convention formulation intégrale})$$

Formulation Green

$$\bar{P}(x) = \frac{j\omega}{k \sin(kL)} \cos[k(x-L)] v_{n1} + \frac{j\omega}{k \sin(kL)} \cos(kx) v_{n2}$$

v_{n1} (en x_1) et v_{n2} (en x_2) uniformes

Pression mesurée en $x_0 = (x_1 + x_2)/2$

$$\bar{P}(x_0) = j\rho c \frac{v_{n1} + v_{n2}}{2 \sin(kL/2)}$$

Incertitudes minimales sur la pression estimée : formulation générale

- **Module**

$$\frac{\delta|\bar{P}|}{|\bar{P}|} = \left[\left(\frac{\delta\rho_0}{\rho_0} \right)^2 + \left(\frac{\delta c_0}{c_0} \right)^2 + \left(\frac{\delta V}{V} \right)^2 + \left(\frac{\delta g}{g} \right)^2 \right]^{1/2}$$

- $\delta V/V$: incertitude sur l'écart de vitesse (traitement du signal)

$$\frac{\delta V}{V} = \frac{\delta|\Delta\bar{V}(x)|}{|\Delta\bar{V}(x)|}$$

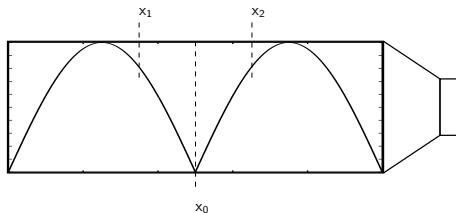
- $\delta g/g$: incertitude géométrique (rapport espacement Δx / longueur d'onde acoustique λ)

- **Phase**

$$\delta\Phi_{\bar{P}} = \delta\Phi_{\Delta\bar{V}}$$

Conception de l'expérience

Configuration expérimentale :
minimisation des incertitudes sur la pression estimée



profil de vitesse

$$\bar{V}_1 = -\bar{V}_2 \Rightarrow |\bar{V}_1| = |\bar{V}_2| \text{ et } \Delta\phi = \pi$$

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique

**Etude
expérimentale**

Étalonnage 2D

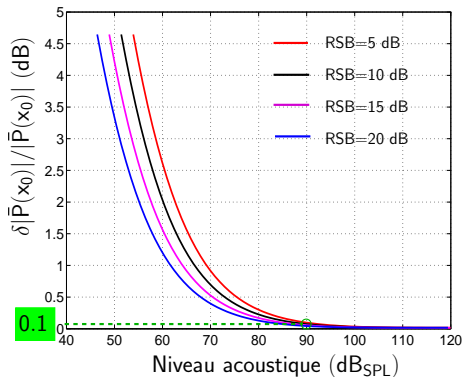
Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

Incertitudes relatives minimales sur la pression acoustique estimée par VLD

$$f_{ac} = 680 \text{ Hz et } \Delta x = 6.25 \text{ cm}$$

Incertitude sur l'amplitude



Incertitude minimale sur la pression :

bornes de Cramér Rao (CRB)
⇒ incertitude minimale sur la vitesse [Le Duff, 2003]

Contexte et problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la pression acoustique

Etude expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats théoriques

Partie II :
Conclusions

Configuration expérimentale

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique

Etude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

Paramètres testés

f_{ac} (Hz)	$x_0(kx_0 = \pi)$ (cm)	Level (dB _{SPL})		Δx (cm)		
680	25	90	120	6.25	12.5	25
1360	12.5	90	120	3.125	6.25	12.5

- Mesure avec une seule sonde VLD : déplacement de x_1 à x_2
- Microphone de référence : précision de ± 0.2 dB_{SPL}

- type de particule :
mélange d'eau (90 %), d'alcool et de substances résiduelles (colorants...) [Safex Fog Fluid "super"]
- diamètre moyen d_p des particules :
 $1 \mu\text{m}$ (compris entre $0,05 \mu\text{m}$ et $2,45 \mu\text{m}$)
- suivi du mouvement du fluide (jusqu'à 4 kHz) :
 - $d_p < 1 \mu\text{m}$: écart entre vitesses fluide et particules $< 0,5 \%$
 - $d_p < 0,5 \mu\text{m}$: écart entre vitesses fluide et particules $< 0,03 \%$
- méthode d'ensemencement :
manuelle, bouteille de 500 mL par 1/2 h
- temps de diffusion et d'homogénéisation : 15 mn

Résultats : mesures de la pression estimée (VLD)

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique

**Etude
expérimentale**

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

- **Biais maximal de 1,07 dB**
→ mauvais étalonnage du microphone de référence ou mauvais réglages de la sonde VLD

Résultats : mesures de la pression estimée (VLD)

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique

Étude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

- Biais maximal de 1,07 dB
→ mauvais étalonnage du microphone de référence ou mauvais réglages de la sonde VLD
- Pression estimée VLD

	incertitude minimale relative théorique	incertitude relative expérimentale
$\simeq 90 \text{ dB}_{\text{SPL}}$	0,019 dB (90 dB _{SPL} , RSB=15 dB)	0,033 à 0,11 dB
$\simeq 120 \text{ dB}_{\text{SPL}}$	0,0047 dB (120 dB _{SPL} , RSB=15 dB)	0,013 à 0,055 dB

Comment exprimer la pression à deux dimensions ?

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

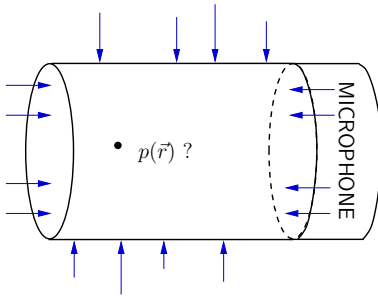
Estimation de la
pression
acoustique

Etude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions



$$\partial_{n_0} G(\vec{r}, \vec{r}_0) = 0$$

Caractérisation expérimentale du champ de vitesse

Contexte et
problématique

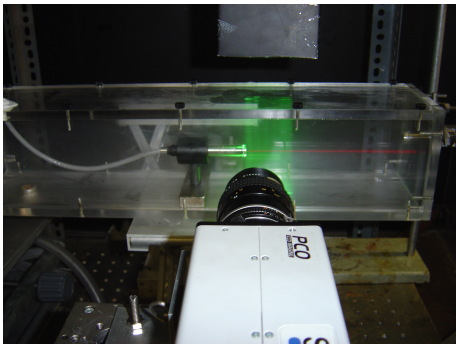
Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique
Etude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions



Dispositif expérimental
(PIV + microphone)

$$f_{ac} = 680 \text{ Hz}$$

Champ de vitesse acoustique

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique

Étude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

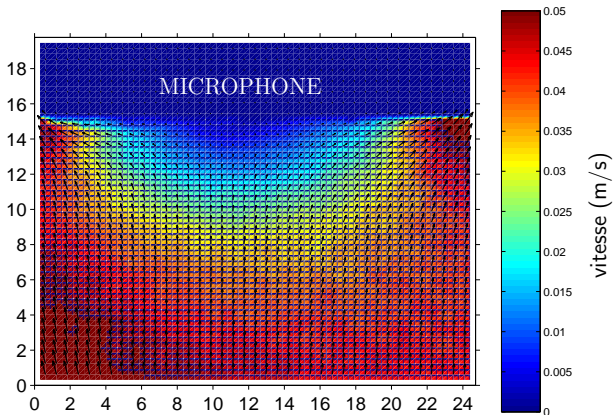
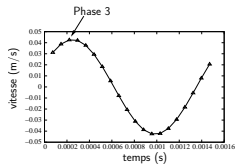


Image PIV



Modèle analytique du champ de pression : définition du domaine d'étude

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

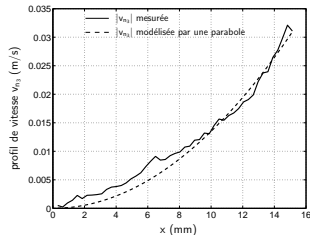
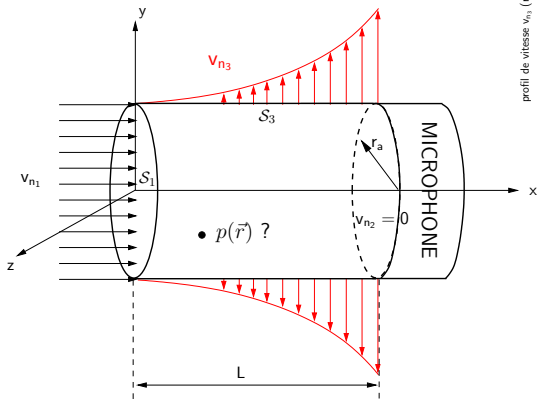
Estimation de la
pression
acoustique

Étude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions



volume d'étude "fluide" (= air)
Hypothèse : symétrie de révolution

Pression acoustique dans le volume : voisinage de la membrane microphonique

Champ de pression acoustique :

$$p(r, x) = p_1(x) + p_3(r, x)$$

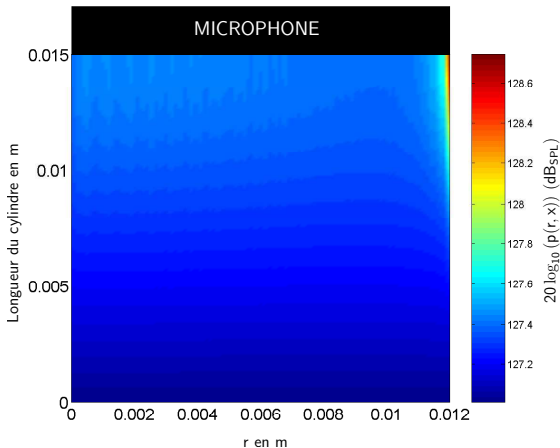
- $p_1(x)$: champ de pression dû à la vitesse v_{n_1} sur la surface S_1

$$p_1(x) = j\omega\rho \frac{\cos[k(x-L)]}{k \sin(kL)} v_{n_1}$$

- $p_3(r, x)$: champ de pression dû à la vitesse v_{n_3} sur la surface S_3

$$p_3(r, x) = \frac{j\omega 2\rho}{r_a} \sum_{\nu=0}^{\infty} \frac{J_0\left(\frac{\gamma_{0\nu}}{r_a} r\right)}{J_0(\gamma_{0\nu})} \frac{1}{k_{x0\nu} \sin(k_{x0\nu} L)} \\ \times \left\{ \cos[k_{x0\nu}(x-L)] \int_0^x v_{n_3}(x_0) \cos(k_{x0\nu} x_0) dx_0 \right. \\ \left. + \cos(k_{x0\nu} x) \int_x^L v_{n_3}(x_0) \cos[k_{x0\nu}(x_0 - L)] dx_0 \right\}$$

Résultats : champ acoustique dans la cavité (2D)



Paramètres :

★ coefficient parabolique

$135 \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

★ rayon du cylindre :

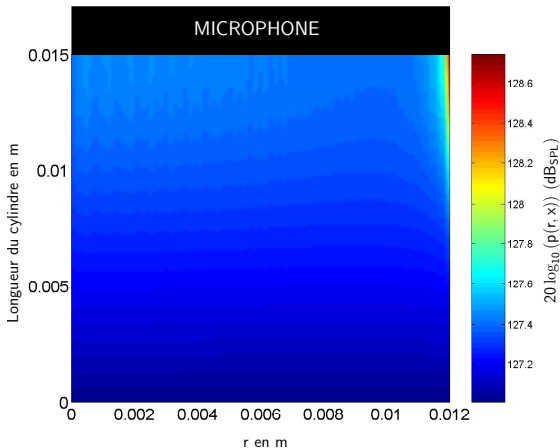
$r_a = 12 \text{ mm}$

★ fréquence acoustique :

680 Hz

- Mode plan propagatif ; modes supérieurs évanescents

Résultats : champ acoustique dans la cavité (2D)



Paramètres :

★ coefficient parabolique

$135 \text{ m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$

★ rayon du cylindre :

$r_a = 12 \text{ mm}$

★ fréquence acoustique :

680 Hz

- Mode plan propagatif ; modes supérieurs évanescents
- Recomposition modale de l'onde (plane) incidente sur l'arête du microphone : redistribution de l'énergie acoustique sur tous les modes

Conclusions et discussion (étalonnage de microphones)

Estimation de la pression acoustique par mesures de vitesse (1D)

- Niveaux acoustiques élevés : $> 120 \text{ dB}_{\text{SPL}}$
- Besoin de RSB (signaux Doppler) élevés
- Écart entre expérience et théorie : non-synchronisation des mesures de vitesses (variation de l'état du système)

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique

Etude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

Conclusions et discussion (étalonnage de microphones)

Estimation de la pression acoustique par mesures de vitesse (1D)

- Niveaux acoustiques élevés : $> 120 \text{ dB}_{\text{SPL}}$
- Besoin de RSB (signaux Doppler) élevés
- Écart entre expérience et théorie : non-synchronisation des mesures de vitesses (variation de l'état du système)

Champ acoustique au voisinage de la membrane (2D)

- 1 modèle physique : estimée de la pression sur la membrane
- Augmentation locale de la pression au niveau des arêtes du microphone
- Interprétation : recomposition modale de l'onde incidente sur l'arête du microphone

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique
Etude
expérimentale

Étalonnage 2D

Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

Conclusions et discussion (étalonnage de microphones)

Estimation de la pression acoustique par mesures de vitesse (1D)

- Niveaux acoustiques élevés : $> 120 \text{ dB}_{\text{SPL}}$
- Besoin de RSB (signaux Doppler) élevés
- Écart entre expérience et théorie : non-synchronisation des mesures de vitesses (variation de l'état du système)

Champ acoustique au voisinage de la membrane (2D)

- 1 modèle physique : estimée de la pression sur la membrane
- Augmentation locale de la pression au niveau des arêtes du microphone
- Interprétation : recomposition modale de l'onde incidente sur l'arête du microphone

⇒ Possibilité d'estimer une pression sur la membrane par mesure de vitesses (VLD) en considérant des niveaux sonores élevés

Plan

Contexte et
problématique

Étalonnage 1D

Estimation de la
pression
acoustique
Etude
expérimentale

Étalonnage 2D

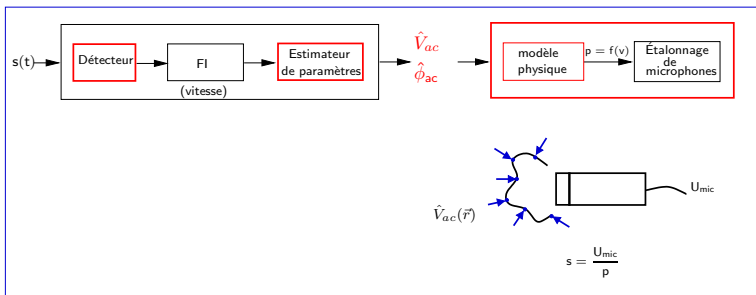
Modélisation
Résultats
théoriques

Partie II :
Conclusions

- Introduction
- Partie I : Détection de bouffées Doppler pour l'estimation de la vitesse acoustique en présence d'écoulement
- Partie II : Étalonnage de microphones
- Perspectives

Conclusion générale

Conclusion
Perspectives



Perspectives (traitement du signal)

Conclusion

Perspectives

- Tester le détecteur sur des données réelles
- Tester l'influence de la détection et localisation des bouffées sur la qualité d'estimation des paramètres acoustiques
- Recherche de procédures de détection plus abouties dans des contextes applicatifs différents

Perspectives (étalonnage de microphones)

Conclusion

Perspectives

- Considérer la déformée de la membrane dans la modélisation de la pression
- Considérer le couplage de la membrane avec la cavité arrière
- Développer un modèle analytique (p, v) considérant la diffraction d'une onde plane sur un cylindre

Remerciements

- Collaboration avec Silvio Montrésor (maître de conférence) au Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine
- Une partie de ce travail a été réalisée dans le cadre d'un Plan d'Action Intégré (PAI Alliance) financé par l'association Egide et le *British Council*
- Collaboration avec Robert MacDonald (doctorant) et Murray Campbell (professeur) de l'*Acoustics and fluid dynamics group* d'Edimbourg

Contribution à l'estimation de la vitesse
acoustique par Vélocimétrie Laser Doppler
&
Application à l'étalonnage de microphones en
champ libre

Anne Degroot

sous la direction de : Bruno Gazengel, Maître de Conférence,
Olivier Richoux, Maître de Conférence,
Laurent Simon, Professeur.

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine
UMR-CNRS 6613

11 octobre 2007

