

Limites et outils d'optimisation du contrôle acoustique actif

Soutenance d'Habilitation à Diriger des Recherches

Emmanuel Friot *et al.*

CNRS - Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

~~20 novembre 2007~~ 4 décembre 2007

Les objectifs de la soutenance

- présenter l'ensemble de mon activité de recherche ?!

Les objectifs de la soutenance

- présenter l'ensemble de mon activité de recherche ?!
 - impliquerait des redites
 - est fait dans le mémoire
 - au final conduirait à un exposé peu intéressant.

Les objectifs de la soutenance

- présenter l'ensemble de mon activité de recherche ?!
 - impliquerait des redites
 - est fait dans le mémoire
 - au final conduirait à un exposé peu intéressant.
- promouvoir le contrôle acoustique actif !

Les objectifs de la soutenance

- présenter l'ensemble de mon activité de recherche ?!
 - impliquerait des redites
 - est fait dans le mémoire
 - au final conduirait à un exposé peu intéressant.
- promouvoir le contrôle acoustique actif !
 - une friche de problèmes variés, ouverts, au cœur de dialectiques multiples : fondamental vs. appliqué, acoustique physique vs. traitement du signal, audio vs. bruit industriel...

Les objectifs de la soutenance

- présenter l'ensemble de mon activité de recherche ?!
 - impliquerait des redites
 - est fait dans le mémoire
 - au final conduirait à un exposé peu intéressant.
- promouvoir le contrôle acoustique actif !
 - une friche de problèmes variés, ouverts, au cœur de dialectiques multiples : fondamental vs. appliqué, acoustique physique vs. traitement du signal, audio vs. bruit industriel...
 - qui donne lieu à des travaux de pointe au LMA.

- 1 Introduction - Présentation du mémoire
- 2 Sur la contrainte de causalité en contrôle acoustique actif
- 3 Contrôle d'un bruit propagé en écoulement rapide
- 4 Synthèse d'un champ basse fréquence
- 5 Vers l'avenir

Le mémoire

- une synthèse de travaux :
 - ① vers un contrôle spatialement étendu :
utilisation de l'ACP, mise en œuvre de la BPC
 - ② vers le contrôle de sons complexes :
bruits large bande, instationnaires
 - ③ vers des problèmes de contrôle mieux posés :
régularisation et décentralisation
 - ④ vers le contrôle de grandeurs non mesurées :
champ lointain, champ diffracté

Le mémoire

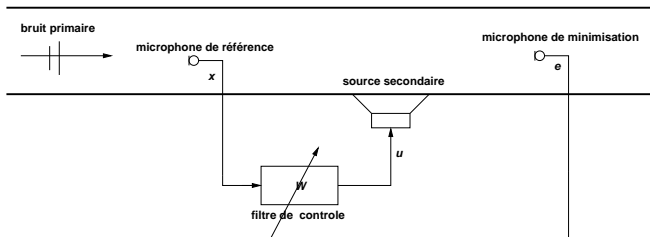
- une synthèse de travaux :
 - ① vers un contrôle spatialement étendu :
utilisation de l'ACP, mise en œuvre de la BPC
 - ② vers le contrôle de sons complexes :
bruits large bande, instationnaires
 - ③ vers des problèmes de contrôle mieux posés :
régularisation et décentralisation
 - ④ vers le contrôle de grandeurs non mesurées :
champ lointain, champ diffracté
- un bilan comptable de mon activité sous toutes ses formes

Le mémoire

- une synthèse de travaux :
 - ① vers un contrôle spatialement étendu :
utilisation de l'ACP, mise en œuvre de la BPC
 - ② vers le contrôle de sons complexes :
bruits large bande, instationnaires
 - ③ vers des problèmes de contrôle mieux posés :
régularisation et décentralisation
 - ④ vers le contrôle de grandeurs non mesurées :
champ lointain, champ diffracté
- un bilan comptable de mon activité sous toutes ses formes
- disponible à l'adresse
<http://www.lma.cnrs-mrs.fr/article282.html>

- 1 Introduction - Présentation du mémoire
- 2 Sur la contrainte de causalité en contrôle acoustique actif**
- 3 Contrôle d'un bruit propagé en écoulement rapide
- 4 Synthèse d'un champ basse fréquence
- 5 Vers l'avenir

La représentation usuelle de la contrainte de causalité



«Pour annuler un bruit imprédictible, il faut le détecter avec une avance supérieure aux retards présents dans le transfert électro-acoustique secondaire»

Calcul du contrôle optimal causal

- sans contrainte de causalité : $W = -\frac{1}{H} \frac{S_{xd}}{S_{xx}}$

Calcul du contrôle optimal causal

- sans contrainte de causalité : $W = -\frac{1}{H} \frac{S_{xd}}{S_{xx}}$
- avec contrainte de causalité : $W = -\frac{1}{H_{min}G} \left\{ \frac{S_{xd}}{H_{all}G^*} \right\}_+$
avec $H = H_{all}H_{min}$ et $S_{xx} = GG^*$

Calcul du contrôle optimal causal

- sans contrainte de causalité : $W = -\frac{1}{H} \frac{S_{xd}}{S_{xx}}$
- avec contrainte de causalité : $W = -\frac{1}{H_{min}G} \left\{ \frac{S_{xd}}{H_{all}G^*} \right\}_+$
avec $H = H_{all}H_{min}$ et $S_{xx} = GG^*$
- en contrôle monovoie on dispose d'un algorithme efficace de factorisation spectrale via des FFT
- en contrôle multivoies on sait calculer des contrôleurs sous-optimaux

Calcul du contrôle optimal causal

- sans contrainte de causalité : $W = -\frac{1}{H} \frac{S_{xd}}{S_{xx}}$
- avec contrainte de causalité : $W = -\frac{1}{H_{min}G} \left\{ \frac{S_{xd}}{H_{all}G^*} \right\}_+$
avec $H = H_{all}H_{min}$ et $S_{xx} = GG^*$
- en contrôle monovoie on dispose d'un algorithme efficace de factorisation spectrale via des FFT
- en contrôle multivoies on sait calculer des contrôleurs sous-optimaux
- parfois le contrôle s'avère peu performant...
- ... mais s'améliore indéfiniment quand l'avance de détection augmente !

Inversion d'un transfert acoustique quelconque

- L'avance dans un transfert inverse peut être très supérieure au retard dans le transfert direct [Neely&Allen, JASA 1979].

Inversion d'un transfert acoustique quelconque

- L'avance dans un transfert inverse peut être très supérieure au retard dans le transfert direct [Neely&Allen, JASA 1979].
- exemple avec un écho : $H(\omega) = e^{-j\omega\tau_1} + \alpha e^{-j\omega\tau_2}$

Inversion d'un transfert acoustique quelconque

- L'avance dans un transfert inverse peut être très supérieure au retard dans le transfert direct [Neely&Allen, JASA 1979].
- exemple avec un écho : $H(\omega) = e^{-j\omega\tau_1} + \alpha e^{-j\omega\tau_2}$
- si $\alpha < 1$:

$$H^{-1} = \frac{1}{e^{-j\omega\tau_1} + \alpha e^{-j\omega\tau_2}} = e^{j\omega\tau_1} [1 - \alpha e^{-j\omega(\tau_2 - \tau_1)} + \alpha^2 e^{-2j\omega(\tau_2 - \tau_1)} - \dots]$$

Inversion d'un transfert acoustique quelconque

- L'avance dans un transfert inverse peut être très supérieure au retard dans le transfert direct [Neely&Allen, JASA 1979].

- exemple avec un écho : $H(\omega) = e^{-j\omega\tau_1} + \alpha e^{-j\omega\tau_2}$

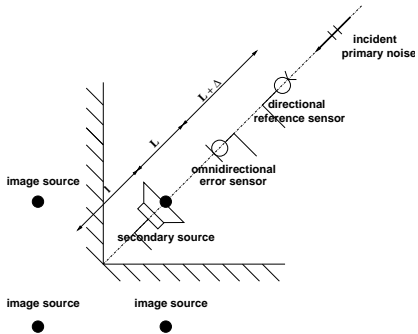
- si $\alpha < 1$:

$$H^{-1} = \frac{1}{e^{-j\omega\tau_1} + \alpha e^{-j\omega\tau_2}} = e^{j\omega\tau_1} [1 - \alpha e^{-j\omega(\tau_2 - \tau_1)} + \alpha^2 e^{-2j\omega(\tau_2 - \tau_1)} - \dots]$$

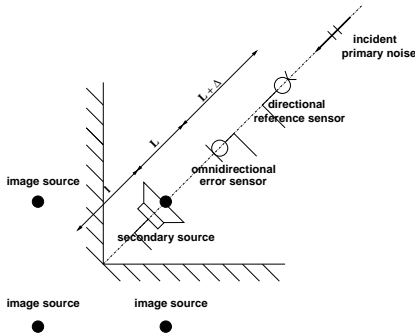
- si $\alpha > 1$:

$$H^{-1} = \frac{\frac{1}{\alpha} e^{j\omega\tau_2}}{1 + \frac{1}{\alpha} e^{-j\omega(\tau_1 - \tau_2)}} = \frac{1}{\alpha} e^{j\omega\tau_2} \left[1 - \frac{1}{\alpha} e^{j\omega(\tau_2 - \tau_1)} + \frac{1}{\alpha^2} e^{2j\omega(\tau_2 - \tau_1)} - \dots \right]$$

Une configuration pathologique pour la causalité

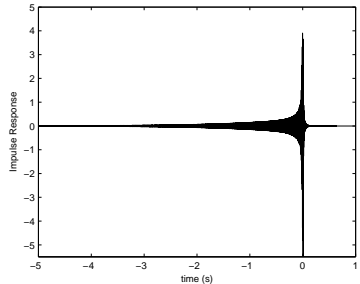
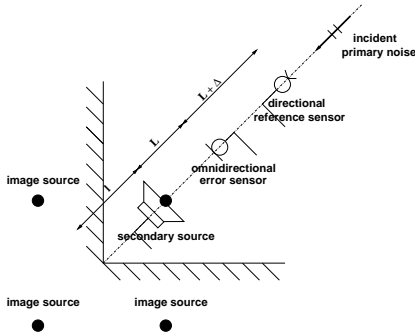


Une configuration pathologique pour la causalité



$$W = -H^{-1}F = -\frac{4\pi}{\rho} \frac{e^{-j\omega(L+\Delta)/c} + e^{-j\omega(3L+2l+\Delta)/c}}{\frac{e^{-j\omega L_1/c}}{L_1} + \frac{2e^{-j\omega L_2/c}}{L_2} + \frac{e^{-j\omega L_3/c}}{L_3}}$$

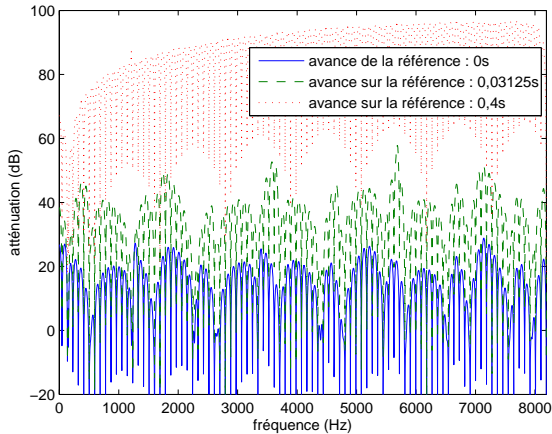
Une configuration pathologique pour la causalité



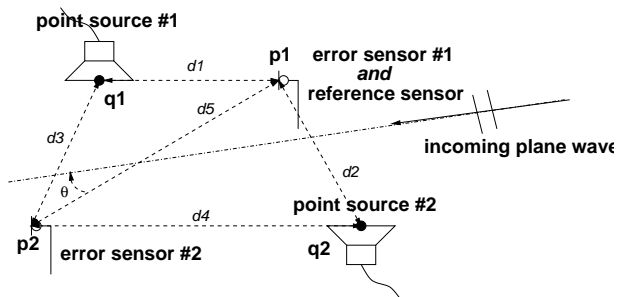
$$W = -H^{-1}F = -\frac{4\pi}{\rho} \frac{e^{-j\omega(L+\Delta)/c} + e^{-j\omega(3L+2l+\Delta)/c}}{\frac{e^{-j\omega L_1/c}}{L_1} + \frac{2e^{-j\omega L_2/c}}{L_2} + \frac{e^{-j\omega L_3/c}}{L_3}}$$

Performance du contrôle dans un coin

en fonction de l'avance avec laquelle on détecte le bruit :



Un cas multivoies en champ libre



$$\begin{bmatrix} p_1 \\ p_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-jkd_5 \cos \theta} \end{bmatrix} x + \frac{\rho_0}{4\pi} \begin{bmatrix} \frac{e^{-jkd_1}}{d_1} & \frac{e^{-jkd_2}}{d_2} \\ \frac{e^{-jkd_3}}{d_3} & \frac{e^{-jkd_4}}{d_4} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} x$$

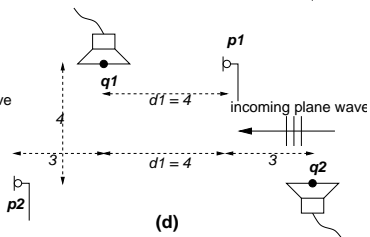
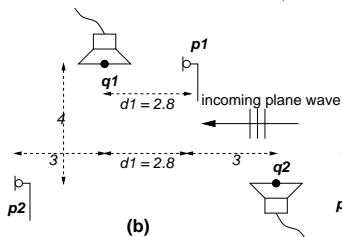
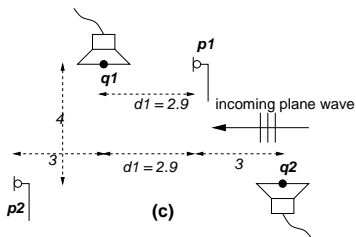
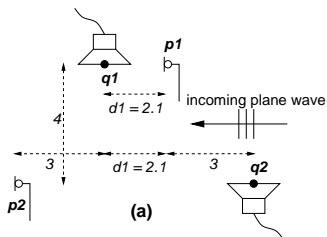
Contrôle optimal 2x2

Si $d_1 d_4 < d_2 d_3$

alors avec $\alpha = d_1 d_4 / d_2 d_3$ et $D = d_2 + d_3 - d_1 - d_4$:

$$\begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \end{bmatrix} = - \frac{4\pi d_1 d_4}{\rho_0} (1 + \alpha e^{-jkD} - \alpha^2 e^{-j2kD} + \dots)$$
$$\begin{bmatrix} \frac{e^{jk d_1}}{d_4} & - \frac{e^{jk(d_1+d_4-d_2)}}{d_2} \\ - \frac{e^{jk(d_1+d_4-d_3)}}{d_3} & \frac{e^{jk d_4}}{d_1} \end{bmatrix}$$

Cherchez l'intrus !



- 1 Introduction - Présentation du mémoire
- 2 Sur la contrainte de causalité en contrôle acoustique actif
- 3 Contrôle d'un bruit propagé en écoulement rapide**
- 4 Synthèse d'un champ basse fréquence
- 5 Vers l'avenir

Contrôle actif du bruit de soufflante

- bruit «de raies» dominant en approche ; propagation multimodale ; 140dB dans $M > 0,4$
- travaux VPI/Pratt & Whitney ; ISVR/Rolls-Royce ; SNECMA + labos français
- programmes européens RANNTAC et SILENCE(R)
- bancs d'essais coûteux - résultats de contrôle mitigés
- veine d'essai LMA-LEA-LAUM «Supersonique II» : 120dB sur 500-3000Hz, $M=0,3$

Le projet CoMBE

Contrôle et Métrologie du Bruit en Ecoulement

<http://www.combe.cnrs-mrs.fr>

- soutenu par la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace.

Le projet CoMBE

Contrôle et Métrologie du Bruit en Ecoulement

<http://www.combe.cnrs-mrs.fr>

- soutenu par la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace.
- 5 partenaires : LMA, LEA, LMFA, LAUM, ONERA
- 2 ans, 300k€, 1 veine d'essai commune et un post-doc de 18 mois

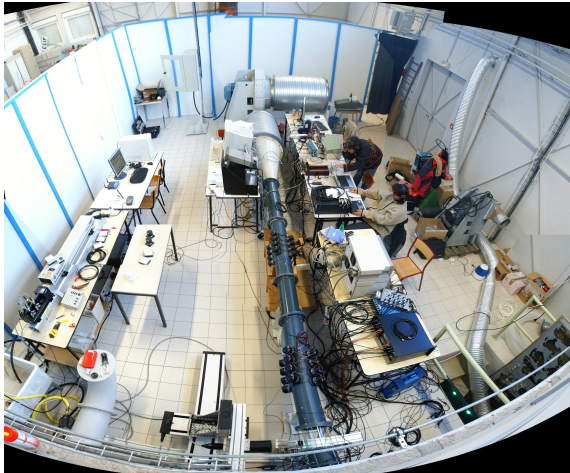
Le projet CoMBE

Contrôle et Métrologie du Bruit en Ecoulement

<http://www.combe.cnrs-mrs.fr>

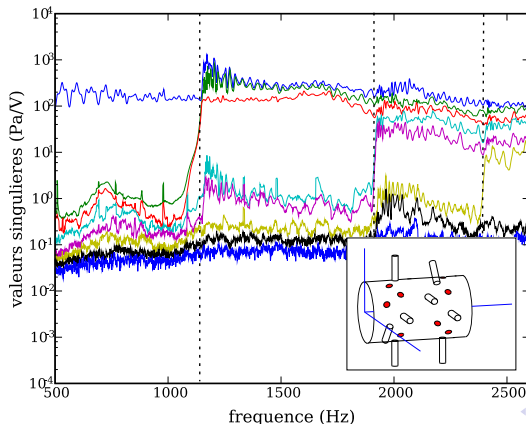
- soutenu par la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace.
- 5 partenaires : LMA, LEA, LMFA, LAUM, ONERA
- 2 ans, 300k€, 1 veine d'essai commune et un post-doc de 18 mois
- première campagne de mesures en juillet 2007

La veine d'essai



Caractérisation de la propagation sans écoulement

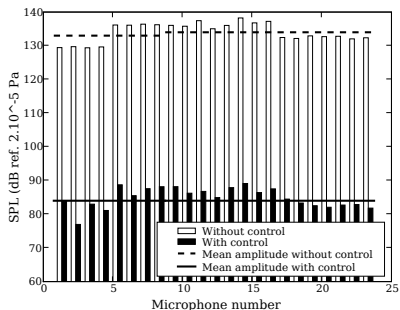
Valeurs singulières de la matrice de transfert entre les 8 voies de contrôle et les 8 microphones de minimisation :



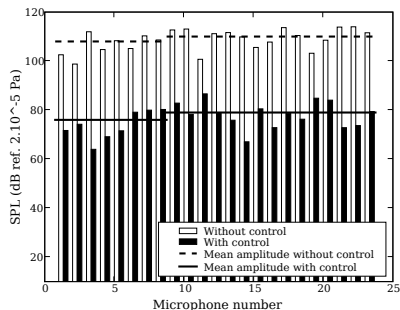
Résultats de contrôle sans écoulement

8 micros de minimisation - 8 micros de visualisation en aval

à 800Hz :

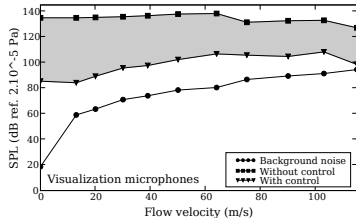
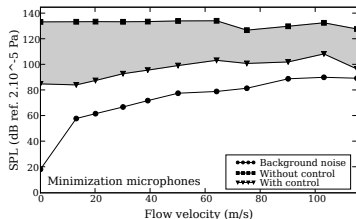


à 2450Hz :

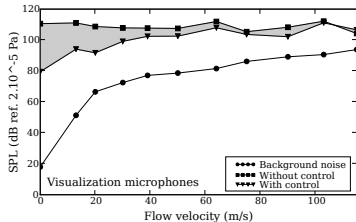
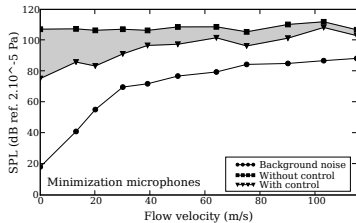


Contrôle avec écoulement

niveaux moyens à 800Hz :



à 2450Hz :



Conclusions des premiers essais

- sans écoulement on sait optimiser et prédire le contrôle

Conclusions des premiers essais

- sans écoulement on sait optimiser et prédire le contrôle
- sans écoulement c'est le conditionnement de la matrice de transfert qui limite les performances du contrôle
- un «préconditionnement» automatique est possible :
formation de voies + FXLMS décentralisé

Conclusions des premiers essais

- sans écoulement on sait optimiser et prédire le contrôle
- sans écoulement c'est le conditionnement de la matrice de transfert qui limite les performances du contrôle
- un «préconditionnement» automatique est possible :
formation de voies + FXLMS décentralisé
- avec écoulement on contrôle 6 modes à $M=0,3$ (!)

Conclusions des premiers essais

- sans écoulement on sait optimiser et prédire le contrôle
- sans écoulement c'est le conditionnement de la matrice de transfert qui limite les performances du contrôle
- un «préconditionnement» automatique est possible :
formation de voies + FXLMS décentralisé
- avec écoulement on contrôle 6 modes à $M=0,3$ (!)
- avec écoulement la dégradation des performances ne vient pas d'un problème de «bruit de mesure» mais de la propagation non linéaire

Conclusions des premiers essais

- sans écoulement on sait optimiser et prédire le contrôle
- sans écoulement c'est le conditionnement de la matrice de transfert qui limite les performances du contrôle
- un «préconditionnement» automatique est possible :
formation de voies + FXLMS décentralisé
- avec écoulement on contrôle 6 modes à $M=0,3$ (!)
- avec écoulement la dégradation des performances ne vient pas d'un problème de «bruit de mesure» mais de la propagation non linéaire
- quel paramètre de l'écoulement pilote l'atténuation ?

CoMBE = un cocktail exemplaire du contrôle actif :

- de l'acoustique physique : fonctions de cohérence en écoulement turbulent ?

CoMBE = un cocktail exemplaire du contrôle actif :

- de l'acoustique physique : fonctions de cohérence en écoulement turbulent ?
- de l'algorithmie temps-réel

CoMBE = un cocktail exemplaire du contrôle actif :

- de l'acoustique physique : fonctions de cohérence en écoulement turbulent ?
- de l'algorithmie temps-réel
- une mise en oeuvre technologique (transducteurs et contrôleur)

CoMBE = un cocktail exemplaire du contrôle actif :

- de l'acoustique physique : fonctions de cohérence en écoulement turbulent ?
- de l'algorithmie temps-réel
- une mise en oeuvre technologique (transducteurs et contrôleur)
- un enjeu industriel

CoMBE = un cocktail exemplaire du contrôle actif :

- de l'acoustique physique : fonctions de cohérence en écoulement turbulent ?
- de l'algorithmie temps-réel
- une mise en oeuvre technologique (transducteurs et contrôleur)
- un enjeu industriel
- une recherche en collaboration modérément coûteuse

- 1 Introduction - Présentation du mémoire
- 2 Sur la contrainte de causalité en contrôle acoustique actif
- 3 Contrôle d'un bruit propagé en écoulement rapide
- 4 Synthèse d'un champ basse fréquence**
- 5 Vers l'avenir

La cabine de reproduction du bang



programme «Supersonique III» : 120dB à 3Hz

Reproduction de champ par *Boundary Pressure Control*

- 1 maillage d'une surface capable d'entourer un auditeur

Reproduction de champ par *Boundary Pressure Control*

- 1 maillage d'une surface capable d'entourer un auditeur
- 2 calcul ou enregistrement d'un champ de pression «cible»

Reproduction de champ par *Boundary Pressure Control*

- 1 maillage d'une surface capable d'entourer un auditeur
- 2 calcul ou enregistrement d'un champ de pression «cible»
- 3 mesure de la matrice de transfert entre les sources et la pression aux nœuds

Reproduction de champ par *Boundary Pressure Control*

- 1 maillage d'une surface capable d'entourer un auditeur
- 2 calcul ou enregistrement d'un champ de pression «cible»
- 3 mesure de la matrice de transfert entre les sources et la pression aux nœuds
- 4 à chaque fréquence inversion régularisée de la matrice de transfert

Reproduction de champ par *Boundary Pressure Control*

- 1 maillage d'une surface capable d'entourer un auditeur
- 2 calcul ou enregistrement d'un champ de pression «cible»
- 3 mesure de la matrice de transfert entre les sources et la pression aux nœuds
- 4 à chaque fréquence inversion régularisée de la matrice de transfert
- 5 synthèse et envoi des signaux de commande

Reproduction de champ par *Boundary Pressure Control*

- 1 maillage d'une surface capable d'entourer un auditeur
- 2 calcul ou enregistrement d'un champ de pression «cible»
- 3 mesure de la matrice de transfert entre les sources et la pression aux nœuds
- 4 à chaque fréquence inversion régularisée de la matrice de transfert
- 5 synthèse et envoi des signaux de commande

Le champ est bien reproduit à l'intérieur du maillage
pour $f \lesssim \frac{c}{2\Delta}$ et $f \neq f_k$

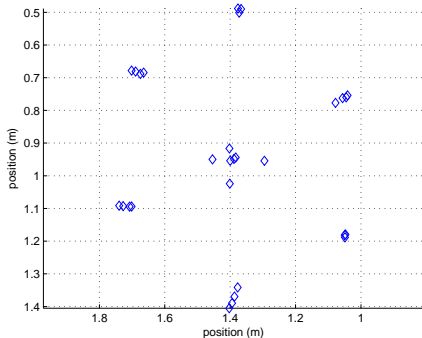
Simulation de synthèse dans la cabine



Le dispositif de reproduction

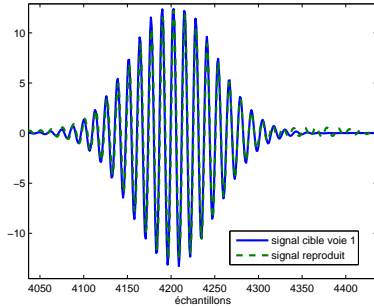


Position des microphones :
(vue de dessus)

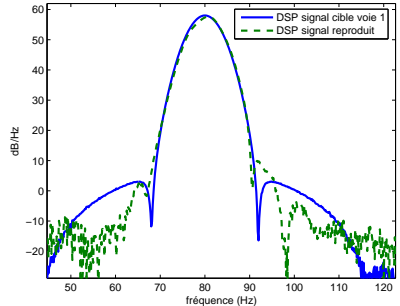


Reproduction d'impulsions gaussiennes

signaux temporels :

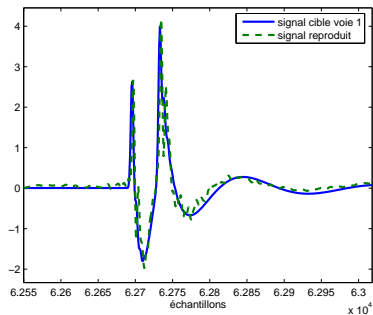


DSP :

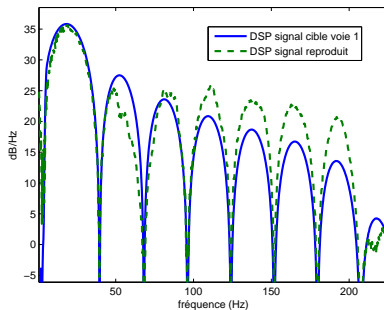


Reproduction de bangs filtrés

signaux temporels :

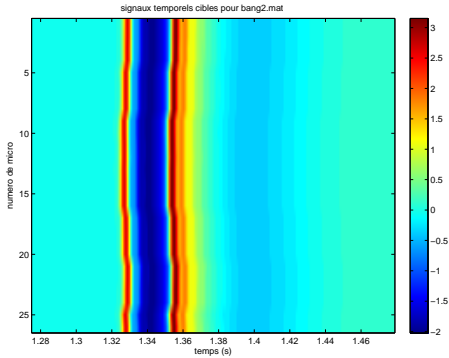


DSP :

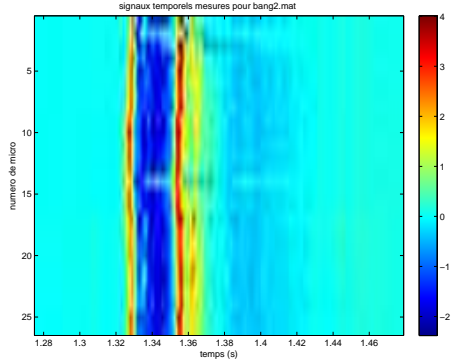


Représentation temps vs. position des microphones

signaux temporels cibles :

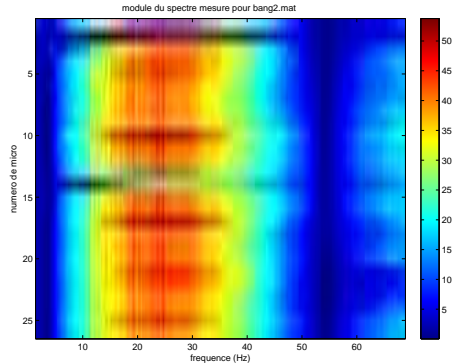
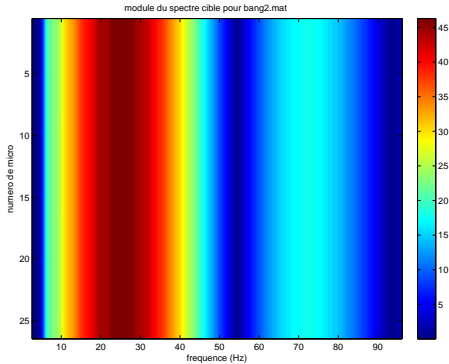


signaux temporels reproduits :



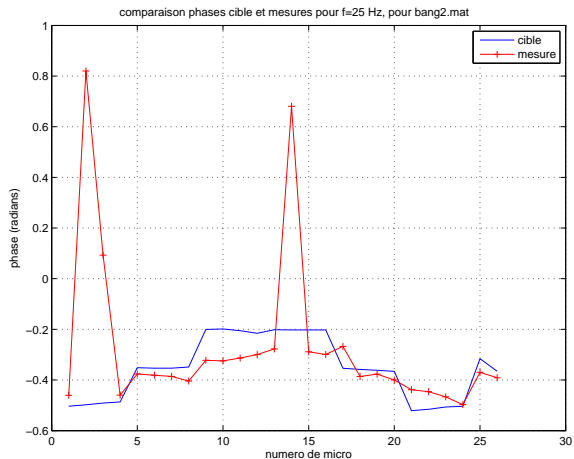
Représentation TTF signaux vs. position des microphones

modules des FFT des signaux cibles : modules reproduits :



Représentation transferts/position des microphones (2)

Phases des FFT des signaux cibles :



- 1 Introduction - Présentation du mémoire
- 2 Sur la contrainte de causalité en contrôle acoustique actif
- 3 Contrôle d'un bruit propagé en écoulement rapide
- 4 Synthèse d'un champ basse fréquence
- 5 Vers l'avenir

Nouveaux cadres de projets en 2008

Sont envisagées :

- une participation au projet UE *Level 2* OPENAIR :
contrôle «décentralisé» du bruit propagé en conduit avec
écoulement

Nouveaux cadres de projets en 2008

Sont envisagées :

- une participation au projet UE *Level 2* OPENAIR :
contrôle «décentralisé» du bruit propagé en conduit avec
écoulement
- une participation à une proposition à l'ANR sur la
«spatialisation»

Nouveaux cadres de projets en 2008

Sont envisagées :

- une participation au projet UE *Level 2* OPENAIR :
contrôle «décentralisé» du bruit propagé en conduit avec écoulement
- une participation à une proposition à l'ANR sur la
«spatialisation»
- une proposition d'«ANR blanche» pour la chambre sourde active :
Contrôle Actif des Réflexions Acoustiques sur les Parois
Absorbantes des ChambrEs Sourdes

Le contrôle actif au LMA

- A l'instant t :
 - 1 CR et 2 IR à temps plein, 2 fractions de CR et d'AI, 2 post-docs, 3 thésards
 - en tant que coordinateur 1 projet FNRAE + 1 projet ANR

Le contrôle actif au LMA

- A l'instant t :
 - 1 CR et 2 IR à temps plein, 2 fractions de CR et d'AI, 2 post-docs, 3 thésards
en tant que coordinateur 1 projet FNRAE + 1 projet ANR
- depuis 2000 : 1 PR, 2 IR, 1 IE partis en retraite

Le contrôle actif au LMA

- A l'instant t :
1 CR et 2 IR à temps plein, 2 fractions de CR et d'AI, 2 post-docs, 3 thésards
en tant que coordinateur 1 projet FNRAE + 1 projet ANR
- depuis 2000 : 1 PR, 2 IR, 1 IE partis en retraite
- le 4 janvier 2009 : un départ d'IR en retraite.

Le contrôle actif au LMA

- A l'instant t :
1 CR et 2 IR à temps plein, 2 fractions de CR et d'AI, 2 post-docs, 3 thésards
en tant que coordinateur 1 projet FNRAE + 1 projet ANR
- depuis 2000 : 1 PR, 2 IR, 1 IE partis en retraite
- le 4 janvier 2009 : un départ d'IR en retraite.
- Le LMA demeure un endroit privilégié pour la recherche en contrôle actif.
Pour combien de temps ?