

Contrôle et Métrologie du Bruit en Ecoulement

Rapport intermédiaire

du projet soutenu par la FNRAE

Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique

Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques

Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Aérodynamique

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine

Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales

Table des matières

1	Introduction	3
2	Contrôle actif du bruit en écoulement à l'aide d'un réseau de haut-parleurs	5
2.1	Contexte et objectifs	5
2.2	La veine d'essai et le dispositif expérimental	5
2.2.1	Description de la veine et du dispositif de contrôle	5
2.2.2	Source primaire	6
2.2.3	Contrôleur FxLMS	7
2.2.4	Tronçon de contrôle	8
2.3	Contrôle	9
2.3.1	Contrôle sans écoulement	9
2.3.2	Contrôle monomodal en écoulement	10
2.3.3	Contrôle multimodal en écoulement	10
2.4	Bilan et perspectives	11
3	Antennerie et Vélométrie LASER Doppler	17
4	Utilisation de matériaux hybrides	19
5	Contrôle actif de l'intensité	21

Chapitre 1

Introduction

Ce rapport rend compte de l'avancement scientifique du projet CoMBE (Contrôle et Métrologie du Bruit en Ecoulement), soutenu par la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace, qui associe le Laboratoire de Mécanique et d'Acoustique à Marseille, le Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques à Poitiers, le laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique à Lyon, le Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine au Mans et l'Office National d'Etudes et de Recherches Aérospatiales à Toulouse.

Le premier chapitre du rapport synthétise les résultats obtenus, sur la veine d'essai commune du projet, lors des premières campagnes de contrôle actif, à l'aide d'un réseau de haut-parleurs, du bruit propagé dans un écoulement rapide ; il présente pour l'essentiel la contribution du LMA à l'avancement du projet pour sa première année. Il a été mis en évidence que les performances du contrôle actif, excellentes en l'absence d'écoulement dans la veine, se dégradent très significativement au point d'être très réduites dans le cas de 6 modes propagatifs à haute vitesse (nombre de Mach $M=0,3$). Ce résultat, qui satisfait un des objectifs majeurs du projet, contribue à expliquer les difficultés rencontrées par le contrôle actif sur des maquettes de moteur d'avion aux cours des programmes européens RANNTAC et SILENCE(R). En revanche on ne peut affirmer à l'heure actuelle quelle variable précise de l'écoulement détermine les performances du contrôle actif ; on ne sait pas encore quel phénomène physique instationnaire ou non-linéaire lié à l'écoulement limite l'efficacité du contrôle. L'objectif scientifique de ces campagnes de contrôle actif pour la deuxième année du projet est donc de préciser quelle est la grandeur de l'écoulement significative vis à vis du contrôle.

Le deuxième chapitre résume les développements menés conjointement par le LEA et le LAUM en antennerie et en Vélocimétrie LASER Doppler pour la mesure de vitesses acoustique dans la veine. Ces développements vont permettre, au cours de la deuxième année du projet, une analyse fine des résultats d'ores et déjà obtenus de réduction par contrôle actif du bruit propagé dans la veine d'essais.

Le troisième chapitre décrit le concept de matériaux hybrides actifs/passifs développé au LMFA pour l'absorption large bande décentralisée du bruit propagé en écoulement. Des cellules hybrides prototypes vont être installées

Enfin le dernier chapitre de ce rapport présente un algorithme de contrôle actif de l'intensité

acoustique développé à l'ONERA. Cet algorithme sera également mis en œuvre au cours de la deuxième année du projet pour la réduction en temps réel, avec des haut-parleurs, du bruit propagé en écoulement dans la veine d'essai.

Outre la poursuite des travaux entamés, la deuxième année du projet verra comme prévu le déplacement au printemps 2008 de la veine d'essais dans la grande chambre anéchoïque du LMA (pour des mesures de bruit rayonné en sortie de la veine d'essai). Enfin, en ce qui concerne les aspects non plus scientifiques mais organisationnels, il faut signaler pour la première année du projet l'embauche au 1er mai 2007 de Martin Glessner, *post-doc* qui se consacre à temps plein au projet CoMBE, et la mise en place du site web du projet accessible à l'adresse <http://www.combe.cnrs-mrs.fr/>; la deuxième année du projet se terminera, elle, par l'organisation d'un *workshop* sur le bruit propagé en écoulement.

Chapitre 2

Contrôle actif du bruit en écoulement à l'aide d'un réseau de haut-parleurs

2.1 Contexte et objectifs

L'application du contrôle actif du bruit à l'aéronautique a émergé dans les années 1990 [1]. Le bruit émis par les réacteurs était précédemment essentiellement dû au bruit de jet large bande. L'évolution technologique a entraîné une émergence du bruit tonal dû aux turbines ouvrant la voie au contrôle actif. Des modèles analytiques du contrôle ont été développés [2, 3, 4]. Cependant, les expériences de contrôle menées sur des modèles réduits de réacteurs ont produit des atténuations décevantes au regard des performances habituelles d'un tel contrôle [5, 6]¹. Le volet "contrôle à l'aide de haut-parleurs" du projet CoMBE vise à reproduire une configuration de contrôle proche des expériences précédente sur une veine d'essai moins coûteuse et offrant une meilleure maîtrise des paramètres d'écoulement et de génération acoustique. L'objectif est, dans un premier temps, de vérifier si une limitation des performances du contrôle lié à la présence d'un écoulement rapide ($M = 0.3$) peut être observée dans cette configuration.

La veine d'essai et son instrumentation pour le contrôle sont présentés dans une première partie. Une seconde partie présente les résultats des expériences de contrôle avec et sans écoulement, avec excitation monomodale et multimodale. Enfin un bilan et quelques perspectives pour la seconde phase du projet sont proposés.

2.2 La veine d'essai et le dispositif expérimental

2.2.1 Description de la veine et du dispositif de contrôle

La veine d'essai est constituée (de l'amont vers l'aval) d'un tronçon de stabilisation de l'écoulement, d'une source primaire générant le bruit harmonique à contrôler, d'une source secondaire générant

¹Des performances intéressantes sont cependant obtenues à l'aide d'absorbeurs hybrides qui font l'objet d'une tâche du projet CoMBE.

le contre-bruit, d'un tronçon destiné à recevoir les microphones de minimisation et enfin d'un tronçon de visualisation (voir figure 2.1). La veine débouche dans un local dont les parois sont traitées acoustiquement. Le guide d'onde utilisé a un diamètre interne de 17,6 cm. Les fréquences de coupure des modes susceptibles de se propager (hors écoulement) sont indiquées dans le tableau 2.1. Une soufflante permet de générer un écoulement dont la vitesse peut atteindre 115 m/s ($M = 0,3$) au centre de la veine.

mode	type de mode	fréquence de coupure
p_{00}	mode plan	
p_{10}	mode azimutal	$f_{10} = 1144$ Hz
p_{20}	mode azimutal	$f_{20} = 1898$ Hz
p_{01}	mode radial	$f_{01} = 2381$ Hz
p_{30}	mode azimutal	$f_{30} = 2611$ Hz

TAB. 2.1 – Fréquence de coupure des modes susceptibles de se propager dans le conduit

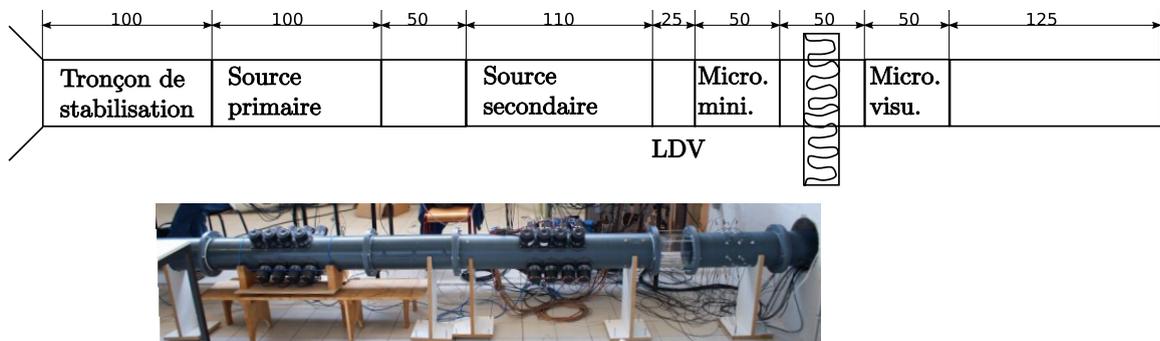


FIG. 2.1 – La veine d'essai.

L'instrumentation de la veine d'essai est schématisé en figure 2.2. Un couple de microphones placés de part et d'autre du conduit sur le tronçon de source primaire fournit, après sommation, le signal à maximiser. Ce signal est utilisé par un contrôleur Novacs pour calculer les signaux de commande de la source primaire maximisant le niveau du mode plan. Le contrôle est effectué à l'aide d'un contrôleur multi-processeur Compars. Les signaux d'erreurs sont fournis par une antenne de 8 microphones (microphones de minimisation), la référence utilisée pour le contrôle feedforward est fournie par le générateur de fonction alimentant la source primaire. Les commandes calculées par le contrôleur sont fournies, après amplification, au réseau de sources secondaires. Une seconde antenne, de 15 microphones est placée en aval du tronçon de contrôle permet de visualiser les effets du contrôle. Les tronçons d'antenne permettent de recevoir 16 microphones régulièrement espacés sur deux couronnes.

2.2.2 Source primaire

La source primaire est constituée d'un réseau de 8 paires de haut-parleurs. Chaque paire de haut-parleurs peut être excitée en phase (+) ou, dans le cas des quatre dernières paires seulement, en opposition de phase (-). La configuration du réseau de source doit être choisie de façon

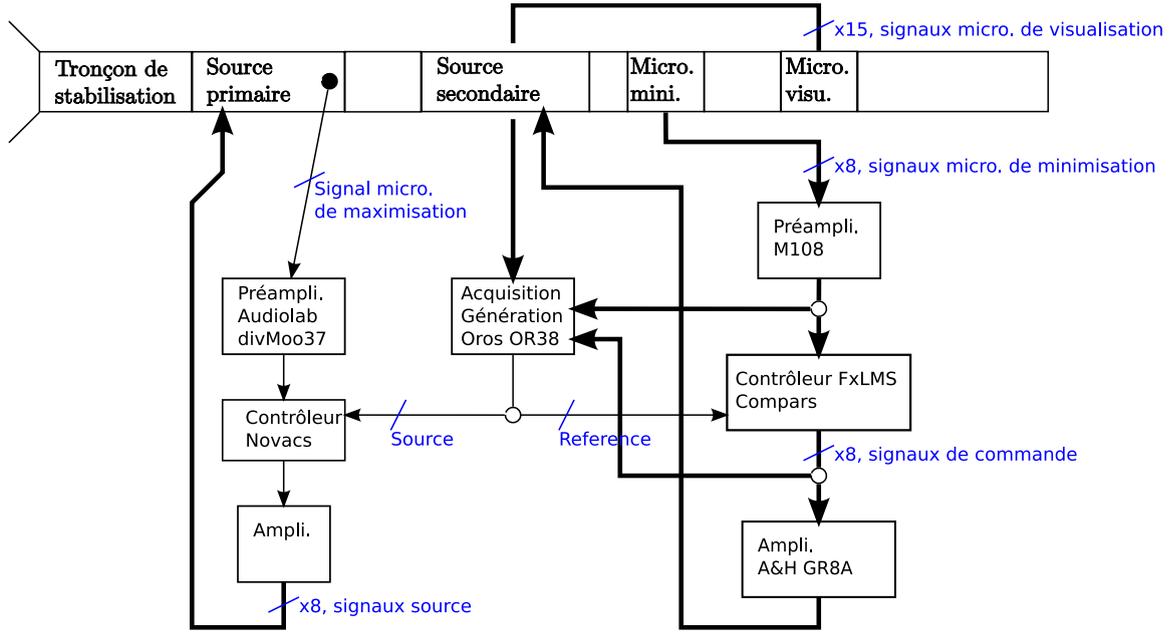


FIG. 2.2 – Instrumentation de la veine d’essai.

à exciter un maximum de modes propagatifs. En pratique, le nombre de modes linéairement indépendants se propageant dans un conduit peut être estimé à partir de la mesure de la matrice de transfert entre un ensemble de sources acoustiques et un ensemble de capteurs. En effet, la décomposition en valeurs singulières (DVS) de cette matrice permet d’apprécier le nombre de modes qui contribuent significativement aux transferts d’énergie. La décomposition de la matrice de transfert entre 12 sources (+ + + + ± ± ± ±) et 31 microphones est présentée en figure 2.3a. Cette décomposition permet d’estimer avec quelle efficacité relative chaque mode serait excité par une source “virtuelle”, exploitant toutes les capacités du réseau de haut-parleurs, dont les quatre dernières paires seraient excitées à la fois en phase et en opposition de phase. Cette figure montre l’augmentation du rang de la matrice de transfert à chaque fréquence de coupure des modes du conduit (de façon moins évidente pour les seconds modes azimutaux rotatif et contra-rotatif et pour le mode radial). Cette DVS est à comparer avec celle de la matrice de transfert entre la configuration de source retenue (+ + + + + - -) et les mêmes 31 microphones (figure 2.3b). Aucune différence significative n’est observable en ce qui concerne l’amplitude relative des valeurs singulières. Étant donnée la source, la configuration choisie peut donc être considérée comme optimale pour l’excitation des modes d’ordre supérieurs du conduit.

2.2.3 Contrôleur FxLMS

Dans la situation de contrôle considérée ici, un signal de référence $x(t)$, décrivant le bruit primaire sans être affecté par les sources secondaires est disponible. Un contrôle par *feedforward* basé sur un algorithme FxLMS est donc mis en place. Les commandes $\mathbf{u}(t)$ à envoyer au réseau de sources secondaires pour minimiser les signaux d’erreur $\mathbf{e}(t)$ sont calculées par filtrage linéaire du signal de référence $x(t)$: $\mathbf{u} = \mathbf{W}.x(t)$. Le coefficient k du vecteur de filtres RIF \mathbf{W} est calculé à l’aide

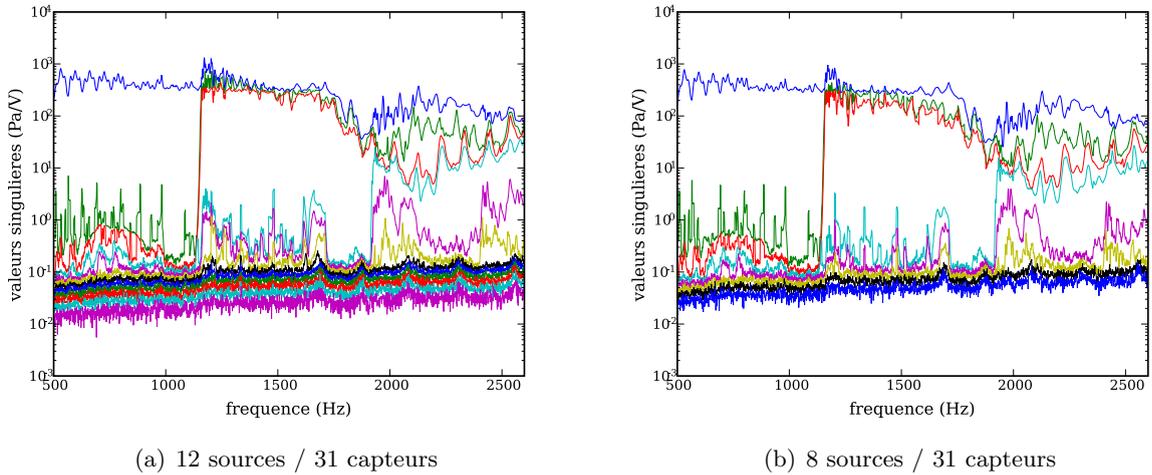


FIG. 2.3 – Décomposition en valeurs singulières de la matrice de transfert entre les sources primaires et 31 microphones.

la formule de récurrence suivante :

$$\mathbf{W}_k(n+1) = \mathbf{W}_k(n) - \beta. (\mathbf{H}.x(n-k))^t \mathbf{e}(n) \quad (2.1)$$

où \mathbf{H} est une estimation RIF de la matrice de transfert entre les sources secondaires et les capturs de minimisation et β est un coefficient ajustable. Pour plus d'information sur l'algorithme FxLMS, se référer à la référence [7]. L'algorithme temps-réel correspondant est implémenté dans un système multi-processeurs COMPARS. La fréquence d'échantillonnage est fixée à 9 kHz. Dix coefficients sont utilisés pour modéliser les transferts secondaires (au lieu des 2 coefficients théoriquement requis dans le cas d'un bruit tonal) de façon à améliorer la convergence de l'algorithme.

2.2.4 Tronçon de contrôle

Le tronçon de contrôle est constitué d'une antenne de microphones mesurant les signaux de minimisation \mathbf{e} et d'une source secondaire pilotée par les signaux de commande \mathbf{u} . Le contrôle est dit "global" s'il permet d'annuler la pression en tout points du conduit. Les deux conditions suffisantes et non nécessaires pour obtenir un contrôle global sont les suivantes (dans l'hypothèse où N modes sont excités par la source primaire) :

- Les sources secondaires doivent exciter les N modes d'une façon indépendante.
- Les points de mesure (microphones de minimisation) doivent être capables "d'observer" tout les modes.

Dans le cadre du projet CoMBE, les sources primaire et secondaire sont identiques. La première condition ne devrait donc pas poser de problème. En revanche les microphones de minimisation devront être positionnés avec soin. La DVS de la matrice de transfert entre 16 sources secondaires ($\pm \pm \pm \pm \pm \pm \pm \pm$) et la configuration de 8 microphones retenue est présentée en figure 2.4. Le niveau relatif satisfaisant des différentes valeurs singulières significatives permet de confirmer que tout les mode sont "vus" par l'antenne microphonique.

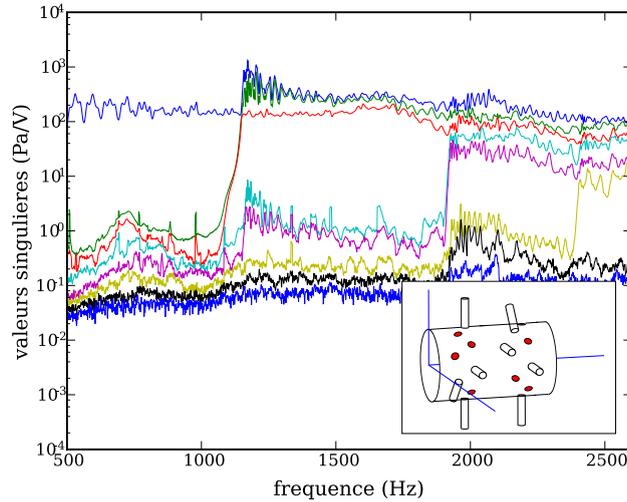


FIG. 2.4 – Décomposition en valeurs singulières de la matrice de transfert 16 sources ($\pm \pm \pm \pm \pm \pm \pm \pm$) et les 8 microphones de minimisation.

Un certain nombre de critères de positionnement des microphones de minimisation peuvent être énoncés (cette problématique est également traitée, en terme de nombre total de capteurs nécessaires, dans la contribution de l'ISVR au rapport final du projet RANNTAC [8]).

- Le nombre total de microphones doit être supérieur ou égal au nombre de modes propagatifs linéairement indépendants (mode azimutaux rotatif et contra-rotatif inclus).
- Afin de séparer les composantes rotative et contra-rotative d'un mode azimutal d'ordre n , l'incrément angulaire séparant deux microphones ne pourra prendre exclusivement la valeur $k\pi/n_{max}$ où k est un entier.
- Afin de séparer le mode plan des différents modes radiaux (d'ordre maximal μ_{max}), l'antenne devra être constituée de $\mu_{max} + 1$ couronnes de microphones situées à des abscisses différentes le long du conduit.

Ainsi, les microphones sont placés sur deux couronnes à des position axiales différentes afin de séparer le mode plan du premier mode radial. Le pas angulaire de $\pi/4$ observé entre certains microphones permet de séparer les modes azimutaux d'ordre 2 rotatifs et contrarotatifs.

2.3 Contrôle

Les expériences de contrôle sont effectuées pour deux fréquences d'excitation de la source primaire : 800 Hz (mode plan seul) et 2450 Hz (6 modes propagatifs, voir tableau 2.1).

2.3.1 Contrôle sans écoulement

Le résultat des expériences de contrôle dans la veine sans écoulement sont présentés en figure 2.5 sous forme de graphe en barre. Les microphones de minimisation sont numérotés de 1 à 8, ceux de visualisation sont numérotés de 9 à 23. Les niveaux moyens calculés sur ces deux groupes de

microphones sont représentés en trait pointillé pour les niveaux avant contrôle et en trait plein pour les niveaux après contrôle. Les résultats sont résumés dans le tableau 2.2.

Microphones	800 Hz		2450 Hz	
	minimisation	visualisation	minimisation	visualisation
Niveau moyen sans contrôle	133 dB	134 dB	108 dB	110 dB
Niveau moyen après contrôle	85 dB	85 dB	76 dB	79 dB
Atténuations moyennes	48 dB	49 dB	32 dB	31 dB

TAB. 2.2 – Résumé des résultats des expériences de contrôle sans écoulement.

Le contrôle est global pour les deux fréquences d’excitation de la source primaire. Les atténuations obtenues suggèrent que le contrôle est optimal et que les performances sont limitées par la précision numérique du contrôleur et non par un problème de contrôle mal posé. Ces expériences sans écoulement valident donc le dispositif utilisé pour le contrôle.

2.3.2 Contrôle monomodal en écoulement

Dans la suite du document, les performances du contrôle seront évaluées, dans chaque configuration, en comparant le niveau de la raie (en moyenne sur les microphones de minimisation et de visualisation) à la fréquence d’excitation (i) sans bruit primaire (bruit de fond), (ii) avant contrôle et (iii) après contrôle. L’amplitude relative des commandes fournies à la source secondaire est également représentée (cette amplitude relative étant définie comme le rapport entre la tension en volts à la sortie du contrôleur et la tension maximale que délivre ce dernier).

La figure 2.6 présente les résultats obtenus pour une fréquence d’excitation de 800 Hz et pour une vitesse d’écoulement dans la veine variant entre 0 et 115 m/s. Entre 0 et 15 m/s, l’écoulement ne semble pas influencer sur le contrôle. L’atténuation d’environ 50 dB obtenue est, a priori, limitée par la précision numérique du contrôleur. Entre 15 et 65 m/s, le niveau de la raie du primaire est constant et l’atténuation décroît à mesure que le bruit de fond dû à l’écoulement augmente. Le niveau des commandes est important, un nombre croissant de voies participent au contrôle à mesure que la vitesse de l’écoulement augmente. Entre 65 et 110 m/s, Le niveau du primaire est diminué par l’opérateur. En conséquence, le niveau des commandes baisse. L’atténuation due au contrôle semble constante dans cette plage de vitesse d’écoulement. Le bruit de fond augmente peu.

Le contrôle est parfaitement global jusqu’à $M=0,3$ ($U=115$ m/s). A cette vitesse, l’atténuation due au contrôle est d’environ 30 dB. Le niveau des commandes étant relativement faible, le contrôle semble limité par la présence de l’écoulement dans la veine.

2.3.3 Contrôle multimodal en écoulement

Le réseau de source primaire est maintenant excité sans optimisation par un signal harmonique à 2450 Hz. Six modes sont susceptibles de se propager dans le conduit à cette fréquence.

En fonction de la vitesse d'écoulement. La figure 2.7 présente les résultats obtenus pour une vitesse d'écoulement dans la veine variant entre 0 et 115 m/s. Le niveau du bruit primaire est moins important à cette fréquence (la source n'est pas optimisée), le niveau des commandes est donc relativement modeste. Pour des vitesses d'écoulement supérieures à 40 m/s, l'efficacité du contrôle est relativement limitée, ne dépassant pas quelques dB. L'atténuation obtenue est en moyenne 5 dB plus importante sur les microphones de minimisation que sur les microphones de visualisation.

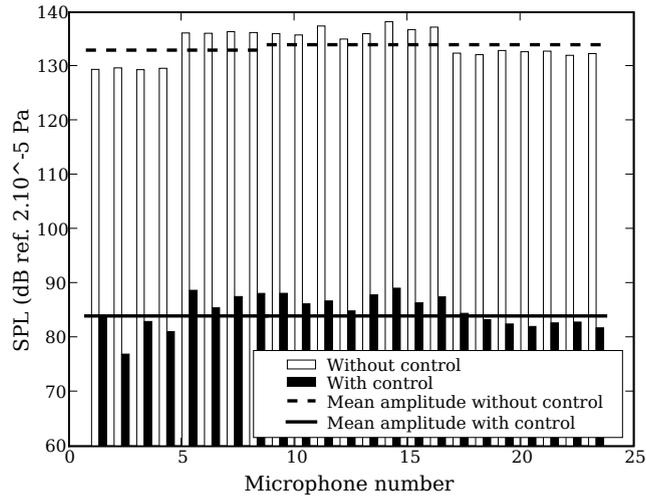
Il est étonnant que le niveau des commandes correspondant aux paires de sources fonctionnant en opposition de phase chute de façon importante dès que l'écoulement atteint une vitesse de 40 m/s (figure 2.7b). En effet, ces paires de sources permettent de contrôler préférentiellement les modes azimutaux. Une analyse modale des résultats du contrôle est donc à envisager dans la prochaine phase du projet afin de quantifier l'effet du contrôle sur les différents modes propagés dans le conduit.

En fonction de l'amplitude de la source primaire La figure 2.8 présente les résultats obtenus, à une vitesse d'écoulement donnée (39 m/s), pour une tension d'alimentation de la source primaire variant entre 12.5 mV et 400 mV. L'atténuation obtenue grâce au contrôle ne semble pas dépendre du niveau de la source primaire.

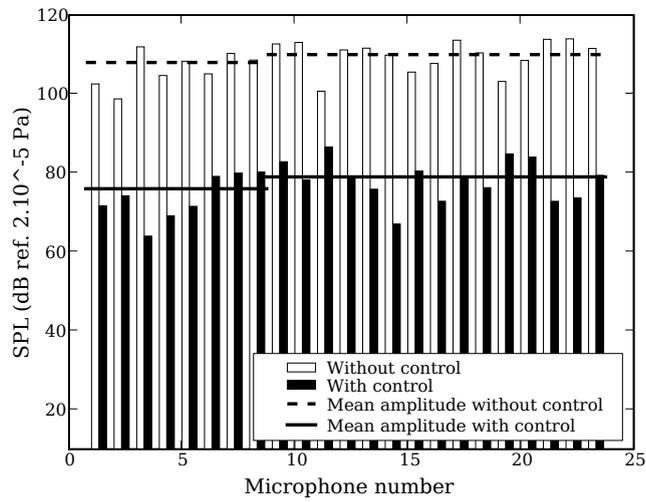
2.4 Bilan et perspectives

Une veine d'essai destinée à reproduire de façon simplifiée le champ propagatif au sein d'une turbine est présentée. La veine est instrumentée pour le contrôle d'un bruit harmonique de fort niveau. Le dispositif de contrôle présente des performances satisfaisantes hors écoulement (atténuation de 50 dB en monomodal et 30 dB en multimodal). Une dégradation des performances du contrôle est observée en présence de l'écoulement. Le dispositif expérimental permet donc de reproduire les limites de contrôle observées précédemment sur des dispositifs plus réalistes.

La principale perspective pour la suite du projet CoMBE est l'explication de cette dégradation des performances du contrôle en présence d'écoulement. Cette dégradation est probablement due à une baisse de la cohérence entre le signal de référence et les signaux de minimisation. Cette hypothèse est à vérifier et à relier avec la physique de la propagation en milieu turbulent (notamment à l'aide des mesures effectuée dans le cadre des autres tâches du projet par le LEA et le LAUM). Une meilleure compréhension des résultats de contrôle pourra également être obtenue en effectuant une analyse modale de ces derniers.

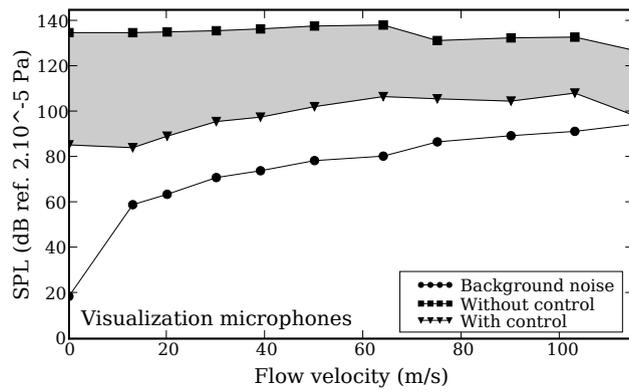
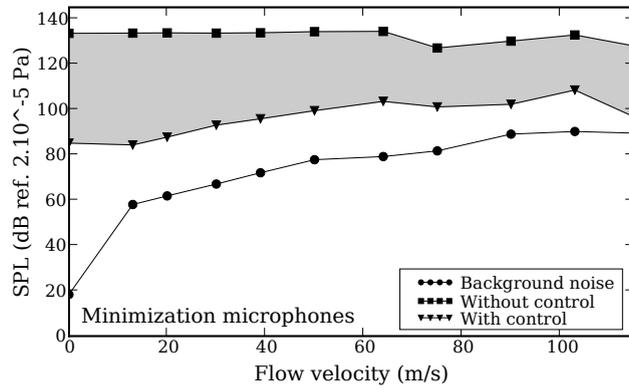


(a) $f=800$ Hz

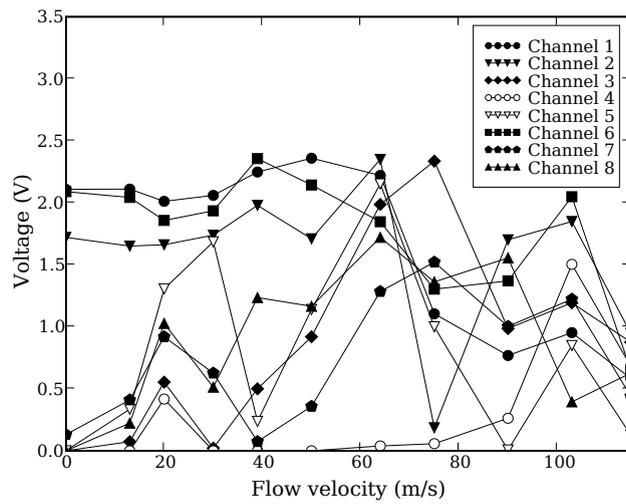


(b) $f=2450$ Hz

FIG. 2.5 – Résultat des expériences de contrôle sans écoulement

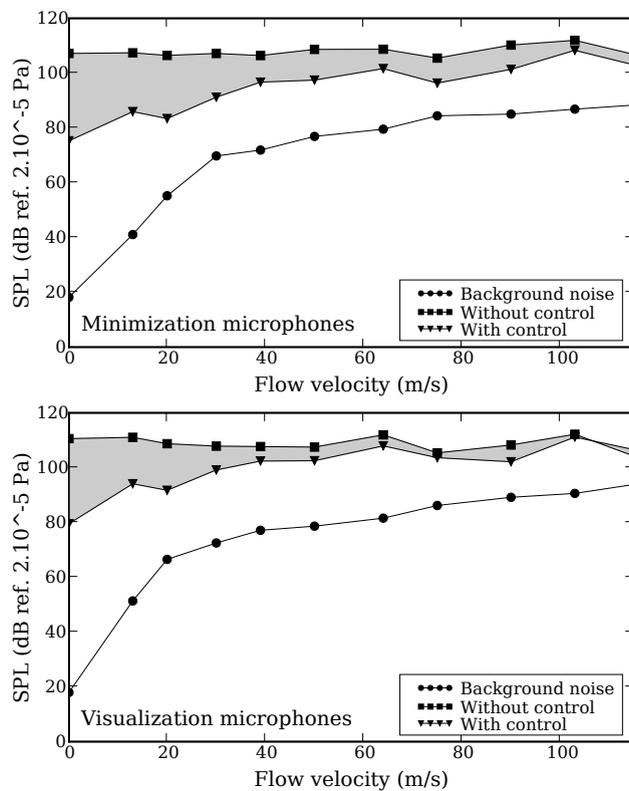


(a) Niveau de pression

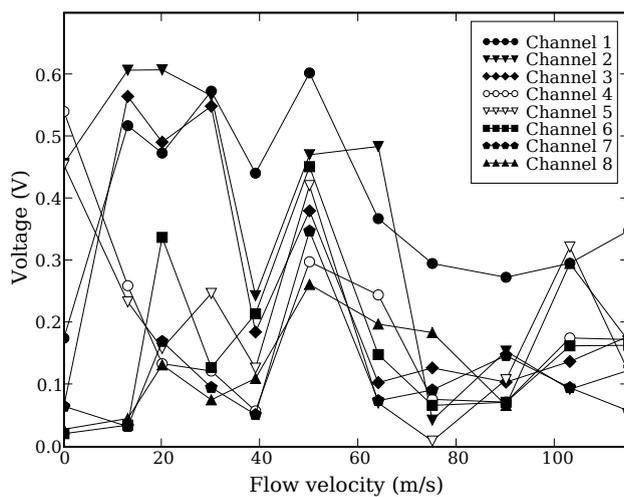


(b) Niveau des commandes

FIG. 2.6 – Contrôle à 800 Hz en fonction de la vitesse d'écoulement.

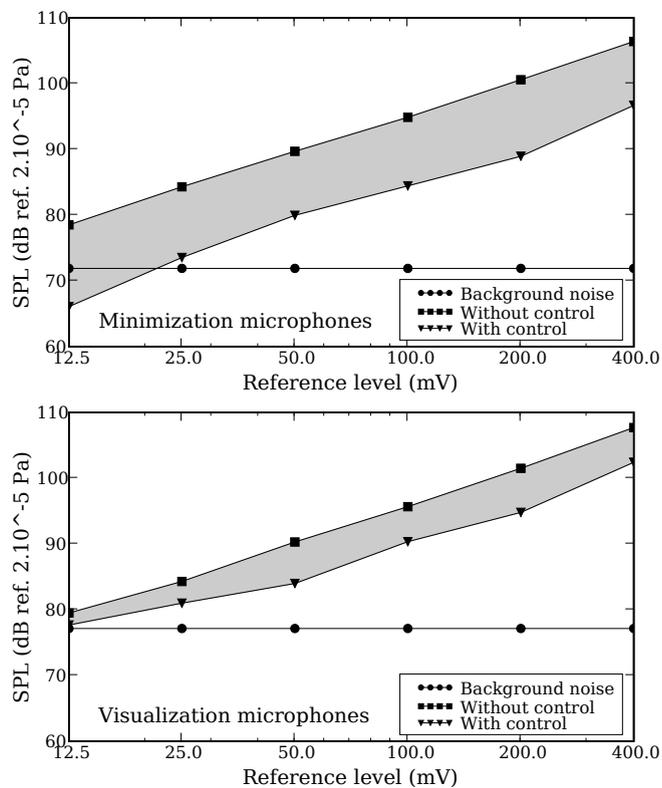


(a) Niveau de pression

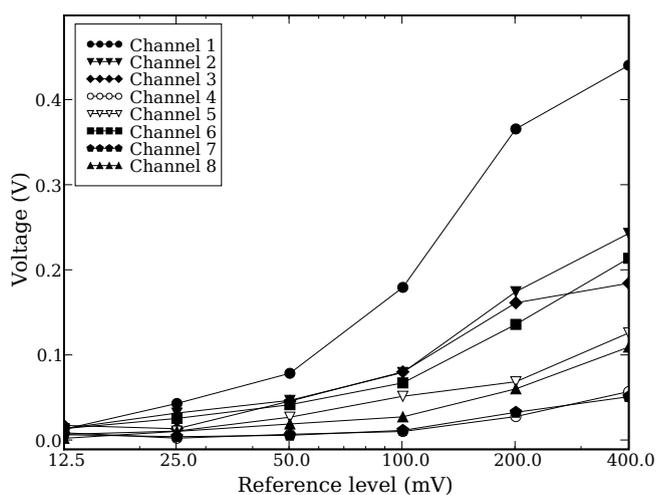


(b) Niveau des commandes

FIG. 2.7 – Contrôle à 2450 Hz en fonction de la vitesse d'écoulement.



(a) Niveau de pression



(b) Niveau des commandes

FIG. 2.8 – Contrôle à 2450 Hz avec un écoulement de 39 m/s en fonction du niveau du signal de référence.

Bibliographie

- [1] R. H. Thomas, R. A. Burdisso, C. R. Fuller, and W. F. O'Brien. Preliminary experiments on active control of fan noise from a turbofan engine. *Journal of Sound and Vibration*, 161(3) :532–537, March 1993.
- [2] John D. Risi, Ricardo A. Burdisso, and Chris R. Fuller. Analytical investigation of active control of radiated inlet fan noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 99(1) :408–416, 1996.
- [3] P. Joseph, P. A. Nelson, and M. J. Fisher. Active control of fan tones radiated from turbofan engines. i. external error sensors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(2) :766–778, 1999.
- [4] P. Joseph, P. A. Nelson, and M. J. Fisher. Active control of fan tones radiated from turbofan engines. ii. in-duct error sensors. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 106(2) :779–786, 1999.
- [5] R. Maier, J. Zillman, A. Roure, M. Winninger, L. Enghardt, U. Tapken, W. Neise, H. Antoine, and E. Bouty. Active control of fan tone noise from aircraft engines. In *7th AIAA/CEAS Aeroacoustics Conference*, Maastricht, Netherlands, 2001.
- [6] E Friot, H Bailliet, R Boucheron, J-P Dalmont, R Guillermin, P Herzog, J Laumonier, P-O Mattei, S Meunier, G Poignand, G Rabau, A Roure, J Tartarin, J-C Valière, and M Winninger. Modélisation, contrôle actif et évaluation psycho-acoustique du bruit de soufflante. Rapport final, Réseau Recherche Aéronautique sur le Supersonique, 2003.
- [7] S. Elliott. *Signal Processing for Active Control*. Academic Press, London, 2001.
- [8] E. Fruteau, P.F. Joseph, and P.A. Nelson. Final report on the reduction of aircraft noise by nacelle treatment an active control (ranntac). Contract Report 00/36, ISVR, 2000.

Chapitre 3

Antennerie et Vélocimétrie LASER Doppler

Au cours de cette première année du programme CoMBE, le LEA a adapté et amélioré une veine d'essai de laboratoire reproduisant de façon contrôlée les caractéristiques du bruit de soufflante (contenu spatial et fréquentiel...) et de sa propagation (multimodale, en présence d'un taux de turbulence donné). Une instrumentation variée (antennerie, vélocimétrie laser) est mise en oeuvre et les effets spécifiques de l'écoulement sur la propagation acoustique sont actuellement testés.

Dans la première année du projet, l'équipe s'est concentrée sur deux aspects : Optimisation du post traitement des données laser, Analyse modale par antennerie du champ acoustique. Ainsi, une première campagne de mesure LDV a permis de réaliser des profils de vitesse acoustique en présence d'écoulement et de progresser dans le développement de différentes méthodes d'extraction de la composante acoustique. Dans l'exemple de résultat présenté figure 1, deux techniques d'extraction sont comparées : La détection synchrone à temps aléatoire et l'estimation de pic basée sur le calcul d'une densité spectrale de puissance. Les résultats montrent qu'en présence d'écoulement, la détection synchrone est moins robuste que la technique d'estimation de pic, le profil obtenu par la méthode d'estimation de pic (en rouge) étant nettement plus plat. Les fréquences de détections pour les deux méthodes sont pratiquement du même ordre que la fréquence d'excitation de la source (700 Hz) ce qui témoigne de la fiabilité des méthodes. D'autres mesures ont été réalisées pour des vitesses d'écoulement plus élevées, les résultats satisfaisants ont été obtenus pour des vitesses jusqu'à Mach 0,1. Nos efforts doivent être poursuivis afin de tester d'autres méthodes, d'obtenir une estimation de la vitesse acoustique en conditions expérimentales plus sévères (jusqu'à Mach 0,3), d'appliquer la ou les méthodes retenues à une situation de propagation multimodale et d'extraire les profils de vitesse pour les comparer aux estimations par prise de pression pariétale. Une campagne de mesure débute qui devrait permettre de se rapprocher de ces objectifs.

D'autre part, en collaboration étroite avec le LAUM, le système d'antennerie développé au Mans a été dupliqué et implémenté au LEA de sorte que toute mesure de vitesse particulière sera désormais couplée à une mesure de pression acoustique et à l'analyse modale associée. La comparaison profils de vitesse/estimations par prise de pression pariétale évoquée ci-dessus peut

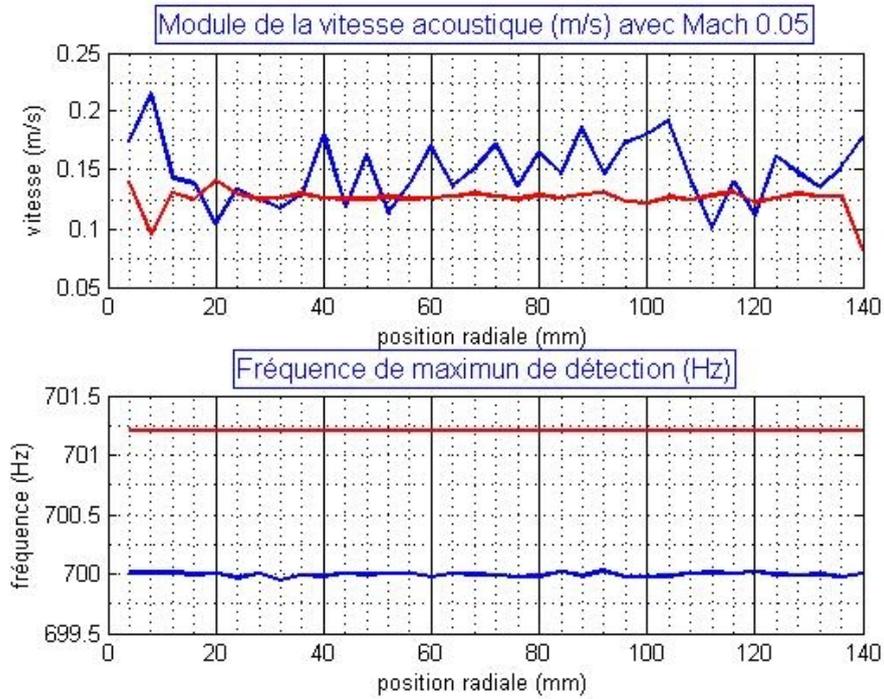


FIG. 3.1 – Profil radial de la vitesse acoustique (en bleu : détection synchrone, en rouge : estimation de pic) à 17 m/s.

donc être envisagée dans l'espoir d'aboutir à une meilleure compréhension des phénomènes de propagation en présence d'écoulement réel. Enfin, dans la dernière partie de la campagne de mesure débutante, des mesures par anémométrie laser et analyse modale par antennerie seront à nouveau effectuées mais cette fois avec contrôle actif dans l'espoir que les analyses physiques associées à la connaissance des quantités acoustiques guident le contrôle vers une efficacité accrue.

Chapitre 4

Utilisation de matériaux hybrides

Le LMFA développe depuis une dizaine d'années des traitements absorbants hybrides combinant absorption passive et contrôle actif, adaptés aux applications en présence d'écoulement. Leur principe de fonctionnement est le suivant (voir Fig. 4.1) : le contrôle actif est utilisé pour réduire la pression à l'arrière d'un matériau poreux de manière à produire par transfert en face avant, une impédance proche de la valeur optimale (celle qui produit la réduction de bruit la plus élevée) prédéterminée par le calcul. Les avantages d'un tel système sont multiples. En premier lieu, ces matériaux peuvent fonctionner de manière hybride : la présence du matériau poreux assure une bonne absorption passive dans le domaine des hautes fréquences, le contrôle actif sert à l'augmenter uniquement dans le domaine des basses fréquences. Ensuite, le système de contrôle (actionneur et capteur) est protégé de l'écoulement grâce à la présence du matériau poreux. Enfin, la réalisation de traitements de surfaces étendues est rendue possible par la conception même du système, basée sur l'assemblage de cellules fonctionnant de manière indépendante des autres (voir Fig. 4.2).

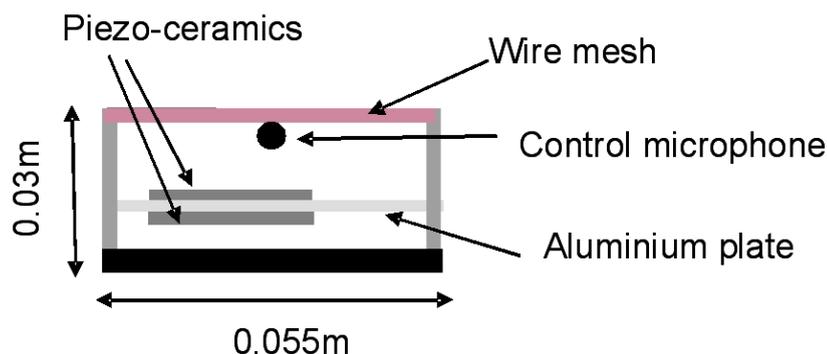


FIG. 4.1 – Cellule hybride passive/active.

Les travaux ont été menés dans le cadre du projet européen SILENCE(R) pour l'optimisation de tels absorbants en vue d'une application aux nacelles de turboréacteurs. Une méthodologie a été développée et validée pour conduire à la réduction de bruit maximale dans l'application visée. Le processus d'optimisation concerne aussi bien la partie passive de l'absorbant (choix du matériau,

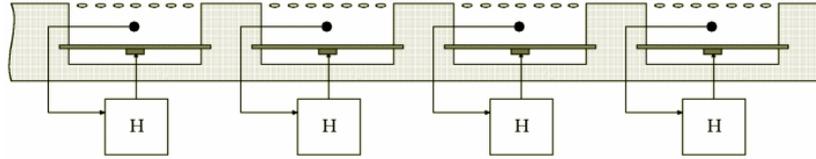


FIG. 4.2 – Extension de la surface de traitement.

de la géométrie, ..) que la partie active (actionneur, contrôleur, algorithme, ...). Les résultats montrent qu'on peut définir une fréquence de coupure séparant le domaine des basses fréquences où le contrôle actif permet d'améliorer les performances de l'absorbant, du domaine des hautes fréquences où le matériau se comporte comme un absorbant classique passif. Les réductions de bruit mesurées sont très importantes et tout à fait conformes aux prédictions lorsque la vitesse de l'écoulement est faible. Cependant, des mesures effectuées en écoulement rapide ont conduit à des performances moindres.

Dans le projet CoMBE l'étude que nous proposons a pour premier objectif de mieux appréhender le fonctionnement d'un absorbant de type hybride en présence d'un écoulement rapide ou d'un fort niveau acoustique.

Les essais auront lieu en 2008 au LEA à Poitiers, et nous sommes actuellement en phase de conception du tronçon comportant les cellules hybrides qui devra être inséré sur le banc de mesure.

Les points suivants ont été déjà décidés : quatre cellules au plus seront réalisées et disposées sur une couronne. De cette manière on pourra utiliser le contrôleur du LMFA les actionneurs secondaires des cellules seront des haut-parleurs, de manière à délivrer un niveau acoustique suffisant différentes toiles métalliques seront testées pour réaliser les cellules. A priori une toile de résistance proche de Z_0 (impédance caractéristique de l'air) et une toile de résistance plus faible seront testées.

Il est envisagé de procéder à des mesures de vitesse acoustique au voisinage de l'absorbant de manière à mieux appréhender les champs acoustiques à proximité de ces couches poreuses. Pour cela un hublot pourrait être inséré dans la couronne des cellules entre deux. Ce point reste à préciser, en collaboration avec le LEA.

Chapitre 5

Contrôle actif de l'intensité

Dans la plupart des études, les fonctions coût correspondent à une minimisation de la pression acoustique réalisée par des méthodes adaptatives en temps réel. Néanmoins, en présence d'ondes stationnaires, les champs de pression étant complexes, la minimisation de la pression acoustique à l'aide d'un unique microphone peut conduire à la modification du champ sans réelle diminution globale (voire à une augmentation) si la position du microphone n'est pas adéquate. Une façon d'éviter cet écueil est de minimiser l'intensité acoustique active, quantité vectorielle représentative de l'énergie propagée.

De façon pratique, le contrôle proposé par l'ONERA porte sur l'intensité acoustique instantanée $I(n)$ à chaque instant n , dépendant de la pression acoustique et de la vitesse particulaire locale suivant une direction donnée \mathbf{e}_x , soit :

$$\mathbf{I}(n) = pu_x \mathbf{e}_x$$

En l'absence d'écoulement et pour un signal harmonique donné, l'équation d'Euler permet d'approximer l'intensité acoustique instantanée, en fonction de deux signaux de pression e_1 et e_2 proches, disposés dans la direction \mathbf{e}_x (voir Fig. 5.1 et Tableau 5.1), de la façon suivante :

$$I(n) = A\gamma(n) [3\delta(n) - 4\delta(n-1) + \delta(n-2)]$$

avec $\gamma(n) = e_1(n) + e_2(n)$ et $\delta(n) = e_1(n) - e_2(n)$.

$P_j(z)$ = chemins primaires (j = 1..2)
$S_j(z)$ = chemins secondaires
$\hat{S}_j(z)$ = chemins secondaires identifiés
$W(z)$ = filtre adaptatif
$x'_j(n) = \sum_{k=0}^{N_p-1} x(n-k) \cdot \hat{s}(k)$
$e_j(n)$ = erreurs

= références filtrées

TAB. 5.1 – Nomenclature pour l'algorithme FXLMS / fonction coût $I(n)^2$

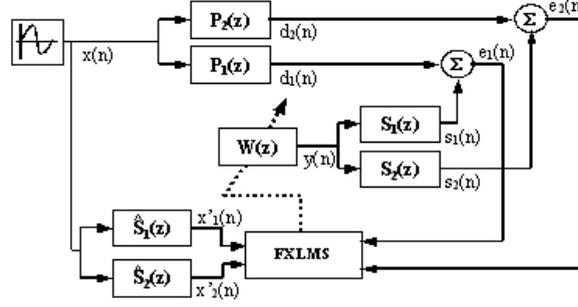


FIG. 5.1 – Diagramme de l’algorithme FXLMS avec $I(n)^2$ comme fonction coût.

On suppose qu’une source harmonique de signal de référence $x(n)$ produit une intensité acoustique primaire que l’on cherche à minimiser à l’aide d’une source secondaire $y(n)$.

Pour assurer la convergence d’un l’algorithme adaptatif de type FXLMS, la fonction coût doit être une fonction quadratique des coefficients du filtre adaptatif. Or, $I(n)$ peut présenter des alternances négatives, que l’on soit en champ proche ou lointain. C’est pourquoi nous utilisons : $J = I(n)^2$.

La fonction coût J est utilisée pour calculer les coefficients du filtre adaptatif W :

$$W_i(n+1) = W_i(n) + \mu \frac{\partial J(n)}{\partial W_i(n)}$$

avec μ le coefficient de convergence et le gradient de J calculé de la manière suivante, avec $\alpha = x'_1(n) + x'_2(n)$ et $\beta = x'_1(n-1) - x'_2(n-1)$:

$$\frac{\partial J(n)}{\partial W_i(n)} = 2 \cdot l_m(n) \cdot \frac{\partial l_m(n)}{\partial W_i(n)} = 2\Phi^2 y(n) \cdot [3\delta(n) - 4\delta(n-1) + \delta(n-2)] \cdot \left[\begin{array}{l} y(n) \cdot \{-4\beta(n-1-i) + \beta(n-2-i)\} \\ + \alpha(n-i) \cdot \{-4\delta(n-1) + \delta(n-2)\} \\ + 6 \{ e_2(n) \cdot x'_2(n-i) - e_1(n) \cdot x'_1(n-i) \} \end{array} \right]$$

La valeur du coefficient μ devra être fixée, sans aucune adaptation possible au nombre de coefficients du filtre, à la fréquence, ou au niveau du signal primaire.

Cet algorithme de contrôle d’intensité instantanée permet une convergence vers une intensité minimale en l’absence d’écoulement porteur.

Il sera susceptible d’être employé en présence d’un écoulement faible à l’aide des transducteurs hybrides, développés par le LMFA, en complément des méthodologies de contrôle du LMFA.

Néanmoins, son utilisation dans le cadre d’une propagation d’ondes en présence de turbulence pourrait s’avérer inadéquate (instabilité, divergence).

De plus, la présence d’un écoulement de vitesse moyenne u_0 modifie théoriquement l’intensité

instantanée comme suit :

$$\mathbf{I}(n) = (p + \rho u_0 u_x) \left(u_x + \frac{u_0}{\rho c^2} p \right) \mathbf{e}_x$$

Il pourra donc être envisagé d'adapter l'algorithme de contrôle de façon à le rendre robuste vis-à-vis de la turbulence et à minimiser l'intensité définie en présence d'écoulement.

L'importance du "bruit" de mesure, le temps de convergence et la stabilité temporelle seront des paramètres d'études, dans la suite du projet CoMBE.