

Qualification des sollicitations aéroacoustiques de grandes structures en mouvement et détermination de la réponse acoustique interne induite : application au TGV

Michel Massenzio,
LVA INSA,
Bât 303,
20, avenue Albert Einstein,
69621 Villeurbanne

Alain Blaise,
Université Claude Bernard,
Bât 721,
43, boulevard du 11 novembre 1918,
69622 Villeurbanne,

Claude Lesueur,
ISAT,
49, rue Mlle Bourgeois,
BP 31,
58027 Nevers

Dans le domaine du transport, l'augmentation de la vitesse et l'allègement des structures sont responsables de la détérioration du confort acoustique. Afin d'intégrer cette notion dès la conception, il est nécessaire de caractériser les sources acoustiques. Dans le cadre d'une application ferroviaire, pour les vitesses considérées (nombre de Mach < 0,35) et pour le domaine des basses fréquences (0-500 Hz), celles-ci sont principalement d'origine aérodynamique.

La démarche retenue repose sur la compréhension des principaux phénomènes physiques mis en jeu dans le cas d'une cavité ouverte sollicitée par un écoulement turbulent. Grâce à une analyse bibliographique critique et à une expérimentation menée en soufflerie sur maquette, nous avons pu identifier puis localiser les sources aéroacoustiques majeures. Les principaux paramètres de l'écoulement et de la cavité ouverte gouvernant ces phénomènes ont été identifiés. Un modèle robuste est proposé et confronté aux résultats obtenus pour les maquettes, puis pour une configuration réelle sur TGV. Celui-ci nous permet d'accéder aux paramètres critiques, vitesse moyenne d'écoulement, fréquences d'émergence aéroacoustiques, pour lesquels le niveau de pression acoustique généré est maximal.

Les sources aéroacoustiques étant identifiées, nous développons un outil numérique RAMCES qui nous permet de calculer la pression acoustique pariétale induite sur toute la structure en mouvement. À cette fin, des modèles de rayonnement sont développés : la méthode des sources images pour le problème intérieur à la cavité et une formulation intégrale en milieu convectif pour le problème extérieur. La mise en œuvre nécessite la connaissance du débit des sources monopolaires équivalentes, estimée à partir d'une grandeur moyenne de l'écoulement, accessible par voie expérimentale ou numérique : l'énergie cinétique de turbulences.

Grâce aux connaissances acquises, nous avons pu dégager une stratégie de réduction du niveau acoustique des sources. Trois solutions techniques proposées sont validées expérimentalement.

Le travail présenté dans cet article est relatif à la caractérisation des sources aéroacoustiques générées par l'interaction entre une structure complexe en mouvement et un fluide environnant. De nombreux domaines d'application sont concernés par ce thème dont l'intérêt scientifique et industriel n'est plus à démontrer. Citons comme exemples d'applications, l'industrie du transport :

- aéronautique, les sources aéroacoustiques associées aux baies de logement de trains d'atterrissage d'un avion en phase d'approche de piste,
- ferroviaire, les sources aéroacoustiques associées aux césures inter-remorques de trains à grande vitesse et aux pantographes,
- automobile, les sources aéroacoustiques associées aux toits ouvrants, rétroviseurs et/ou baies vitrées.

Notre étude trouve une application dans le domaine des transports ferroviaires. Le problème des sources aéro-

acoustiques associées à l'espace inter-remorques (césure) a clairement été identifié sur le plan industriel pour diverses générations de TGV et en particulier pour un prototype de TGV Duplex. En effet, dans ce cas, des mesures sur site ont montré que les niveaux de pression acoustique internes induits par ces interactions sont, à partir d'une certaine vitesse du train, élevés et nuisibles au confort acoustique de l'utilisateur. Ces nuisances acoustiques concernent, pour des vitesses d'exploitations de l'ordre de 350 km/h, essentiellement le domaine des basses fréquences, soit l'intervalle [0 ; 500 Hz]. Les ordres de grandeurs à garder en mémoire sont pour :

- les remorques : des longueurs de quelques dizaines de mètres,

- les cavités (césures) : des dimensions variant du décimètre à quelques mètres. Ordre de grandeur des volumes correspondants de 10^{-4} m^3 à 1 m^3 .

Dans ce contexte, et compte tenu de la complexité du problème, il apparaît essentiel de développer des outils de type avant-projet, encore inexistant à ce jour, afin de maîtriser dès la conception le niveau de bruit interne de grandes structures évoluant à des vitesses d'exploitation encore plus élevées. À cette fin, la démarche que nous proposons repose d'une part, sur la compréhension des phénomènes physiques mis en jeu, et d'autre part, sur l'élaboration de méthodes d'évaluation des niveaux de pression acoustique.

Pour ce faire, l'étude est menée en deux phases. Il s'agit, en premier lieu, d'aborder la cause principale de l'inconfort : **la source** (Phase 1). Dans notre cas, elle trouve son origine dans l'interaction entre une couche limite turbulente et la présence de cavités ouvertes (césures). Les interactions entre les structures (considérées comme indéformables) et l'écoulement ne sont pas prises en compte.

La seconde phase (Phase 2) traite le problème vibro-acoustique de la structure entière, l'objectif étant le calcul de la pression acoustique interne, les données d'entrée : la pression acoustique pariétale bloquée sont obtenues à l'issue de la phase 1. Concernant la phase 2, nous invitons le lecteur à consulter les références bibliographiques [1, 2]. Suite à une étude bibliographique relative à la phase 1 [3], nous avons recensé trois principaux mécanismes gouvernant la physique des phénomènes impliqués.

Ils sont liés :

- au grondement turbulent,
- à la résonance de la couche tourbillonnaire,
- à la résonance couplée "couche tourbillonnaire - cavité".

Ce dernier mécanisme est de loin le plus pénalisant en terme de niveaux acoustiques émis. Il est caractérisé par une relation liant vitesse de l'écoulement, fréquence discrète d'émergence et niveau de pression acoustique. Les paramètres mis en jeu sont la vitesse moyenne de l'écoulement extérieur (U_∞), la largeur de l'ouverture de la cavité suivant la direction de l'écoulement (L), la profondeur de la cavité (D) et l'épaisseur de quantité de mouvements de la couche de cisaillement (θ). Précisons d'une part que le paramètre "profondeur de la cavité" caractérise ses fréquences propres dans des conditions d'écoulement nul, et d'autre part, que l'épaisseur de quantité de mouvements est un paramètre nécessaire à l'établissement de la relation de dispersion des ondes associées à la couche tourbillonnaire.

Les modèles analytiques recensés ne permettent pas de prédire la résonance couplée "couche tourbillonnaire/cavité" pour une géométrie quelconque de cavité et un large domaine de Mach. D'autre part, ces modèles ne s'appliquent qu'à la relation entre vitesse et fréquence d'émergence. Par conséquent, bien que des éléments existent, ils ne nous permettent pas de répondre dans le cas général, pour une configuration donnée (type d'écoulement et géométrie de cavité - figure 1), aux interrogations suivantes :

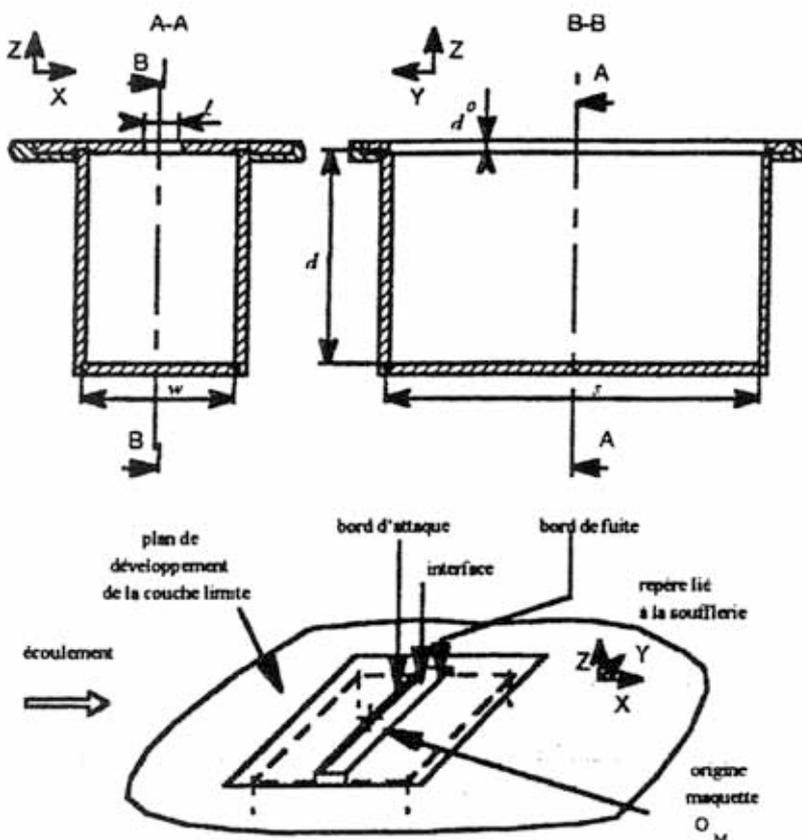


Figure 1 : configuration (type d'écoulement et géométrie de cavité) du modèle.



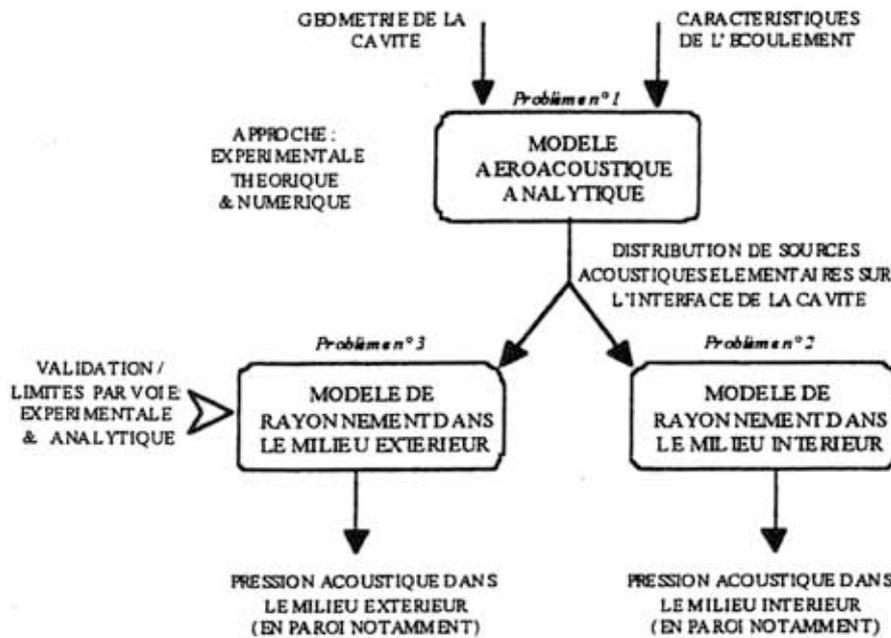


Figure 2 : schéma de la démarche scientifique utilisée

- Quel est le couple vitesse critique (U_{cr}) - fréquence critique (f_{emcr}) pour lequel le niveau de pression acoustique généré est maximum? Quel est le niveau de pression acoustique correspondant, dans la cavité et dans l'écoulement? En d'autres termes, comment peut-on dimensionner les sources aéroacoustiques?

- D'une manière générale, quelle est la relation entre la vitesse d'écoulement extérieure, une fréquence d'émergence et le niveau de pression acoustique pour les nombres de Mach inférieurs à 0,4?

Pour amener des éléments de réponse à ces questions, puis calculer la pression acoustique induite sur la structure, nous envisageons la démarche scientifique schématisée sur la figure n° 2 qui consiste à scinder le problème initial en trois "sous-problèmes".

Problème n° 1 - Caractérisation des sources aéroacoustiques

Il s'agit de caractériser et de modéliser les interactions de nature aéroacoustique entre écoulement et cavité ouverte. Les études réalisées, sur des configurations de base en laboratoire, ont comme objectifs :

- la mise en évidence et la caractérisation des phénomènes aéroacoustiques entre écoulement et cavité ouverte.

- la mise en évidence et la caractérisation des phénomènes aéroacoustiques sur des configurations de laboratoire, figure 1, ainsi que la constitution d'une base de données expérimentales en vue de valider les codes de calcul développés,

- la mise en évidence des paramètres géométriques liés à la cavité, gouvernant les résonances aéroacoustiques,

- la mise en évidence de l'influence du type d'écoulement sur l'apparition des résonances aéroacoustiques et la mise en évidence de l'effet dispersif lié à l'écoulement sur l'interface,

- la localisation des sources aéroacoustiques du point de vue spatial,

- la caractérisation du mouvement du fluide sur l'ouverture de la cavité en vue de mettre en évidence une relation entre des grandeurs moyennes de l'écoulement et des grandeurs acoustiques. L'objectif final est de proposer une démarche en vue de dimensionner le débit des sources aéroacoustiques,

- la proposition d'une première technique de réduction du niveau des sources aéroacoustiques. Il s'agit dans ce cas de modifier certaines dimensions caractéristiques de la cavité ouverte afin de décaler le domaine de vitesse d'écoulement pour lequel les phénomènes de résonances aéroacoustiques sont forts.

Une étude numérique, grâce aux codes de calcul dédiés à la mécanique des fluides, autorise des visualisations locales de l'écoulement moyen dans des zones où la mesure est difficile (dans la cavité). Ces codes dans le contexte qui nous préoccupe ne nous permettent pas encore d'accéder à la part "acoustique" des fluctuations de vitesse ou de pression : l'ordre de grandeur de ces qualités étant inférieur à la précision du calcul. Nous montrons [3], comment extraire des informations importantes pour le modèle aéroacoustique ; à partir des grandeurs moyennes de l'écoulement fournies par un code mécanique des fluides.

Les données d'entrée sont les caractéristiques géométriques de la structure et les caractéristiques de l'écoulement moyen. Les modèles, développés dans le cadre d'une

étude analytique, doivent nous permettre de prévoir l'apparition des résonances aéroacoustiques : vitesse d'écoulement et fréquence d'émergence. Ils doivent en outre nous permettre de dimensionner les sources aéroacoustiques mises en jeu.

Problème n° 2 - Calcul de la pression acoustique induite dans la cavité

Les sources aéroacoustiques étant définies, il s'agit de développer un outil de calcul de rayonnement de ces sources dans la cavité : milieu intérieur de géométrie pouvant être complexe, avec des parois pouvant être absorbantes et dont le fluide n'est a priori pas au repos.

Problème n° 3 - Calcul de la pression acoustique induite dans l'écoulement

Les sources aéroacoustiques sont les mêmes que pour le problème n° 2. Il s'agit de développer un outil de calcul de rayonnement de ces sources dans l'écoulement : milieu infini mais en mouvement (couche limite turbulente). Le code développé est validé de manière expérimentale à l'aide des mesures effectuées en soufflerie.

Moyens et configurations d'essais

Définition de la configuration expérimentale

Pour être représentative des phénomènes rencontrés in situ, notre configuration expérimentale est définie de manière à respecter les deux points suivants :

- Pour les structures qui nous intéressent, l'écoulement est de type couche limite turbulente. Nous avons donc développé une configuration expérimentale mettant en jeu ce type d'écoulement. Rappelons, que la plupart des études expérimentales proposent des résultats obtenus avec un écoulement du type jet. En effet, pour des petites configurations, les moyens expérimentaux à mettre en œuvre sont moins importants dans le cas du jet. De plus, les problèmes liés au bruit de fond et aux conditions aux limites (champ libre) sont plus simples à résoudre.

- Compte tenu de nos moyens d'essai, les maquettes que nous avons étudiées sont dimensionnées de manière à rester le plus proche possible de l'échelle réelle. L'ordre de grandeur est le décimètre. Rappelons que le problème de la similitude n'est pas encore résolu. Il est subordonné à la compréhension des principaux phénomènes et à l'identification des paramètres les gouvernant.

Nous avons mené un ensemble d'études préalables de mises au point dans une soufflerie de type Eiffel, afin d'optimiser et de qualifier notre configuration expérimentale et nos moyens d'essais. Nous avons développé un moyen de mesure capable de réaliser, de manière localisée et simultanément, des acquisitions de la vitesse totale du fluide en un point (partie moyenne et fluctuante), et la pression acoustique en un autre point. Il s'agit d'un système d'acquisition mixte traitant simultanément les signaux de vitesse du fluide, et de la pression acoustique :

- de vitesse instantanée totale du fluide en un point (le capteur est une sonde "fils chauds" droite et à deux fils croisés),
- de vitesse moyenne d'écoulement (le capteur est le tube de Pitot),
- de pression acoustique en différents points (les capteurs sont des microphones).

Afin d'obtenir une base de données expérimentales la plus générale possible, nous avons choisi de produire un écoulement de type couche limite turbulente établie, avec comme référence le cas d'une couche limite turbulente développée sur une plaque plane. Notre objectif, atteint, est de réaliser un écoulement propre, fiable et reproductible, afin de pouvoir comparer par la suite des configurations mettant en jeu différents types de maquettes de cavités ouvertes. La couche limite turbulente a été caractérisée finement. On rappelle synthétiquement que la couche limite turbulente produite à un taux d'épaissement supérieur aux observations courantes. Les causes sont identifiées.

La forme et l'évolution des profils de vitesse, tant pour les valeurs moyennes que fluctuantes, sont tout à fait en accord avec les lois classiques. Par ailleurs, les fluctuations de pression acoustique pariétale liées à l'écoulement concordent aussi avec la théorie. L'étude en laboratoire des phénomènes aéroacoustiques est conduite sur des cavités ouvertes de forme géométrique simple. Un nombre important de maquettes a été étudié. Elles sont réparties en deux groupes :

Groupe 1 : les configurations géométriques de base

Le volume de la cavité principale est parallélépipédique, l'ouverture est rectangulaire. Suite à l'étude bibliographique, on peut se contenter dans un premier temps d'une étude expérimentale bidimensionnelle (on s'intéresse au plan de normale g). Parmi les configurations du groupe 1, on distingue trois types de géométrie suivant le rapport longueur sur profondeur de la cavité : les cavités profondes ($w/d \ll 1$), les cavités élancées ($w/d \gg 1$), et les cavités nominales ($w/d \approx 1$).

Le tableau 1 présente une synthèse de l'ensemble des paramètres caractérisant les trois types de configurations de base, à savoir : leurs dimensions, leurs premières fréquences propres (sans écoulement), et leur position sur le plan de développement de la couche limite turbulente. Les fréquences propres sont déterminées expérimentalement en chambre anéchoïque donc sans écoulement. Seules sont présentées les fréquences propres conduisant à des résonances aéroacoustiques observées durant l'étude expérimentale en soufflerie.

Groupe 2 : les configurations géométriques de base modifiées

Des modifications géométriques locales sont apportées sur la base des configurations du groupe 1 ; l'objectif étant de proposer une seconde technique de réduction du niveau des sources aéroacoustiques. Il s'agit cette fois de minimiser les interactions entre l'écoulement et la cavité ouverte en agissant localement sur la configuration expérimentale.

Résultats et interprétations des phénomènes

Nous ne présentons que les résultats expérimentaux relatifs à la maquette CN1. Ceux-ci sont représentatifs des résultats concernant l'ensemble des configurations du groupe 1. Ils nous permettent de mettre en évidence et caractériser de manière expérimentale les mécanismes aéroacoustiques. Les autres résultats des configurations du groupe 1 sont synthétisés dans le tableau 1.

Phénomènes aéroacoustiques pour une vitesse d'écoulement particulière

Nous présentons, figure 3, un exemple de spectre fréquentiel obtenu à partir de mesures de pression acoustique réalisées dans la cavité principale de la maquette CN1, pour la vitesse d'écoulement de 28 m/s. On relève sur ce spectre la présence de trois "émergences" à des fréquences discrètes. Ces émergences sont périodiques. On relève le fondamental à la fréquence de 205 Hz, et les harmoniques 1 et 2 aux fréquences respectives de 410, et 615 Hz. Par ailleurs, on constate que les émergences sont supprimées, si l'on ferme l'ouverture de la cavité, ou bien si l'on modifie le schéma modal acoustique de la cavité. Pour ce dernier point, nous avons comparé les niveaux de pression acoustique des configurations CN1 et CE2 qui diffèrent de part leur profondeur, et qui par conséquent n'ont pas les mêmes fréquences propres.

Ces résultats expérimentaux mettent en évidence un couplage aéroacoustique entre l'écoulement et la cavité ouverte. Par conséquent, les "émergences" relevées sur la figure 3 sont qualifiées "d'émergences aéroacoustiques".

Évolution des phénomènes aéroacoustiques avec la vitesse d'écoulement

Afin de qualifier l'évolution des phénomènes aéroacoustiques en fonction de la vitesse d'écoulement nous avons, pour un microphone placé dans la cavité principale de la maquette CN1¹ réalisé l'acquisition d'une série de 39 spectres en bande fine de pression acoustique correspondant à 39 vitesses d'écoulement comprises entre 0 et 34 m/s. La figure 4 présente une synthèse des résultats relatifs à l'ensemble des 39 spectres obtenus.

Les différentes émergences aéroacoustiques, observées pour la maquette CN1, excitées par la couche limite turbulente dans le domaine de vitesse [0, 34 m/s] sont les suivantes :

Émergences A⁰

Les émergences relatives aux niveaux de pression acoustique les plus élevés pour le domaine de vitesse de la soufflerie [0, 34 m/s] sont notées A⁰ sur la figure 4. Ces émergences sont caractérisées par une relation liant la vitesse d'écoulement, les fréquences discrètes d'émergence et les niveaux de pression acoustique. La relation entre la vitesse d'écoulement et la fréquence d'émergence est linéaire par morceaux. En effet, on observe une rupture de pente pour la vitesse de 24 m/s. On définit par conséquent deux domaines de vitesse notés A⁰₁ et A⁰₂ sur la figure 4. Pour chacun des deux domaines de vitesse, la relation entre la fréquence d'émergence et la vitesse d'écoulement s'écrit sous la forme :

$$f_{em} = a \cdot U_{\infty} + b \quad (1)$$

Noms des maquettes	Dimensions des maquettes (Cf. figure 1)					Fréquences propres des maquettes		Position des maquettes sur le plan de la CLT
	ℓ	d	d_0	w	s	indice	f_i	Distance $O_M O_S$ en mm (Cf. figure 1)
	mm	mm	mm	mm	mm	i	Hz	x
Cavité Profonde :								
CP1	8	120	2	40	28	0	533	222
CP2	16	240	4	80	56	0	253	233
CP3	16	240	2	80	56	0	265	233
Cavité Nominale :								
CN1	56	187	3	165	400	0 1	216 278	225
Cavité Elancée :								
CE1	52	115	10	330	500	0 1	208 244	270
CE2 (config. CN1 avec $d=30$ mm)	56	30	3	165	400	0	≈475	225

Tableau 1 : Les 6 maquettes du groupe 1

¹ Des acquisitions de pression acoustique dans l'écoulement et sur le plan du développement de la couche limite turbulente conduisent aux mêmes observations. Seuls les niveaux de pression acoustique diffèrent de ceux présentés pour un microphone dans la cavité. Les mesures correspondantes sont présentées par la suite.

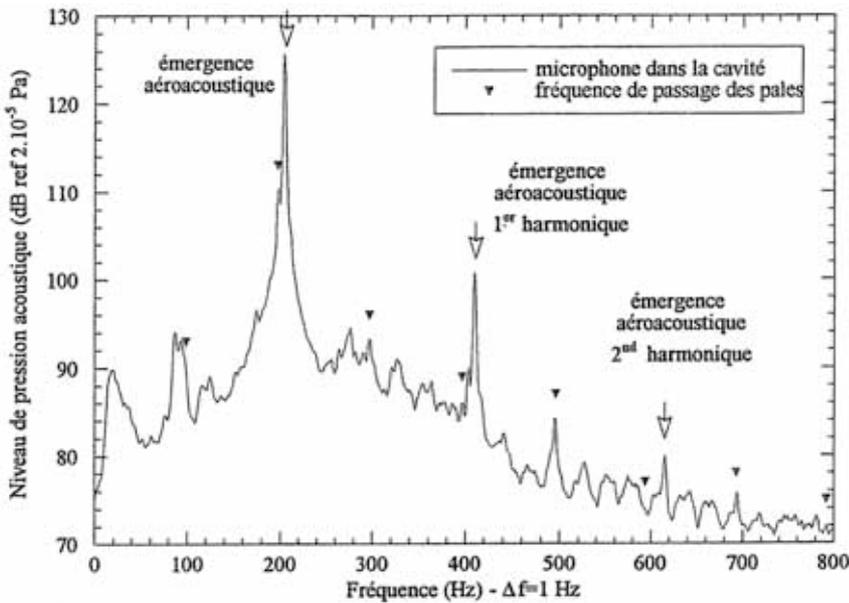


Figure 3 : Niveau de pression acoustique dans la cavité - Maquette CN1 - $U_{\infty} = 28$ m/s

Les émergences A^0_1 et A^0_2 sont respectivement observées pour les domaines de vitesse d'écoulement [11, 24 m/s] et [24, 34 m/s] (34 m/s constituant la limite de vitesse haute pour la soufflerie). Les fréquences d'émergences évoluent linéairement en fonction de la vitesse d'écoulement entre 87 et 191 Hz à A^0_1 , et 191 et 218 Hz pour A^0_2 . Le coefficient directeur (a) et l'ordonnée à l'origine (b) de la relation affine entre la fréquence d'émergence et la vitesse d'écoulement (équation (1)) sont :

$$\text{Pour } A^0_1 : a = 8,0 \text{ Hz/(m/s)} \text{ et } b = -0,6 \text{ Hz} \quad (2a)$$

$$\text{Pour } A^0_2 : a = 2,9 \text{ Hz/(m/s)} \text{ et } b = 122 \text{ Hz} \quad (2b)$$

Par conséquent, on peut considérer que pour le phénomène A^0_1 , la fréquence d'émergence est directement proportionnelle à la vitesse d'écoulement ($b \approx 0$). Par ailleurs, la rupture de pente entre A^0_1 et A^0_2 traduit un changement de comportement pour les phénomènes aéroacoustiques mis en jeu. L'évolution de la fréquence d'émergence en fonction de la vitesse d'écoulement est plus importante dans le cas de A^0_1 que dans celui de A^0_2 . On constate par ailleurs que les niveaux de pression acoustique dans la cavité pour A^0_2 sont plus importants que ceux pour A^0_1 .

Émergences A^1

De la même manière que pour les émergences A^0 , on distingue deux types de comportement pour les émergences A^1 : soient A^1_1 et A^1_2 . Les émergences A^1_1 et A^1_2 sont caractérisées par une relation entre la fréquence d'émergence et la vitesse d'écoulement qui est linéaire. Pour une vitesse d'écoulement donnée, la fréquence d'émergence de A^1 correspond à l'harmonique 1 de la fréquence d'émergence de

A^0 . Par conséquent, pour A^1_1 et A^1_2 , les paramètres a et b de la relation affine (équation (1)) entre la fréquence d'émergence et la vitesse d'écoulement sont le double de ceux calculés respectivement pour A^0_1 (équation (2a)) et A^0_2 (2b)). Pour une vitesse d'écoulement donnée, le niveau de pression acoustique de l'émergence A^1 est observé pour un domaine de vitesse plus restreint que celui relatif aux émergences A^0 : [21, 34 m/s]. En deçà de 21 m/s, le niveau de pression acoustique de l'émergence A^1 est du même ordre de grandeur que celui du fond continu du spectre.

Émergences A^2

Il s'agit de l'harmonique 2 des émergences A^0 . En fait, seul l'harmonique 2 du phénomène A^0_2 est observé : A^2_2 . Les paramètres a et b de la relation affine entre la fréquence d'émergence et la vitesse d'écoulement sont donc ceux correspondants à A^0_2 (équation (2b)) multipliés par 3. Pour une vitesse d'écoulement donnée, le niveau de pression acoustique de l'émergence A^2 est inférieur en moyenne de 45 dB à celui de l'émergence A^0 . Les phénomènes A^2 sont observés pour le domaine de vitesse [26, 32 m/s].

Émergences B^0

De la même manière que pour les émergences A^0 , les émergences notées B^0 sont caractérisées par une relation linéaire entre la fréquence d'émergence et la vitesse d'écoulement. Le coefficient directeur (a) et l'ordonnée à l'origine (b) de la relation affine entre la fréquence d'émergence et la vitesse d'écoulement (équation (1)) sont :

$$a = 5,8 \text{ Hz/(m/s)} \quad \text{et} \quad b = 163 \text{ Hz} \quad (3)$$

Les fréquences mises en jeu ne sont pas des harmoniques des émergences notées A^0 . Les émergences B^0 sont observées pour le domaine de vitesse [17, 23 m/s]. Les fréquences d'émergences sont comprises entre 271 et 299 Hz.

Phénomènes critiques

Dans le cas de la configuration CN1, on observe deux types d'émergences aéroacoustiques :

A ($A = \{A^0_1, A^0_2, A^1_1, A^1_2, A^2_2\}$) et B ($B = \{B^0\}$).

Pour chaque type d'émergence, nous définissons comme point de fonctionnement critique le couple : vitesse d'écoulement critique ($U_{\infty cr}$)/fréquence d'émergence critique (f_{emcr}), pour lequel les niveaux de pression acoustique mesurés sont maximum. Les phénomènes critiques sont signalés sur la figure 4.

Pour les émergences aéroacoustiques du type A, le phénomène critique concerne les émergences notées A^0_2 . Le niveau de pression acoustique du phénomène critique est de 127 dB (réf. $4 \cdot 10^{-10}$ Pa²/Hz) dans la cavité. Le couple vitesse d'écoulement critique - fréquence d'émergence critique est :

$$U_{\infty cr} = 29,7 \text{ m/s} - f_{emcr} = 210 \text{ Hz} \quad (4)$$

Dans le cas des émergences aéroacoustiques du type B, le niveau de pression acoustique du phénomène critique est de 102 dB (réf. $2 \cdot 10^{-10}$ Pa²/Hz) dans la cavité. Le couple vitesse d'écoulement critique-fréquence d'émergence critique est :

$$U_{\infty cr} = 20,5 \text{ m/s} - f_{emcr} = 279 \text{ Hz} \quad (5)$$

Synthèse des résultats relatifs aux configurations du groupe 1

Le tableau 2 présente une synthèse des résultats relatifs à l'ensemble des 6 configurations du groupe 1. Pour chaque configuration sont mentionnés :

- les phénomènes critiques : vitesse d'écoulement critique, fréquence d'émergence critique et niveau de pression acoustique correspondant mesuré dans la cavité. Nous précisons aussi le type d'émergence pour lequel le phénomène critique est observé (Émergence du type X^i_j).

- La relation linéaire entre le fondamental de la fréquence d'émergence et la vitesse acoustique autour d'un phénomène critique.

- Le domaine de vitesse d'écoulement pour lequel les émergences du type X^i_j sont observées.

- Des commentaires concernant la présence ou non d'harmoniques (X^i_2, X^i_3, \dots) et concernant l'observation éventuelle d'émergence du type X^0_1 .

Interprétation des phénomènes aéroacoustiques observés

L'interprétation des phénomènes que nous présentons est effectuée dans le cas de la maquette CN1. Cette configuration est représentative de l'ensemble des résultats concernant les maquettes du groupe 1, qui sont synthétisés dans le tableau 2. Dans le cas de la maquette CN1, et pour le domaine de vitesse de la soufflerie, nous avons observé différentes émergences aéroacoustiques que nous avons classées en deux catégories, à savoir :

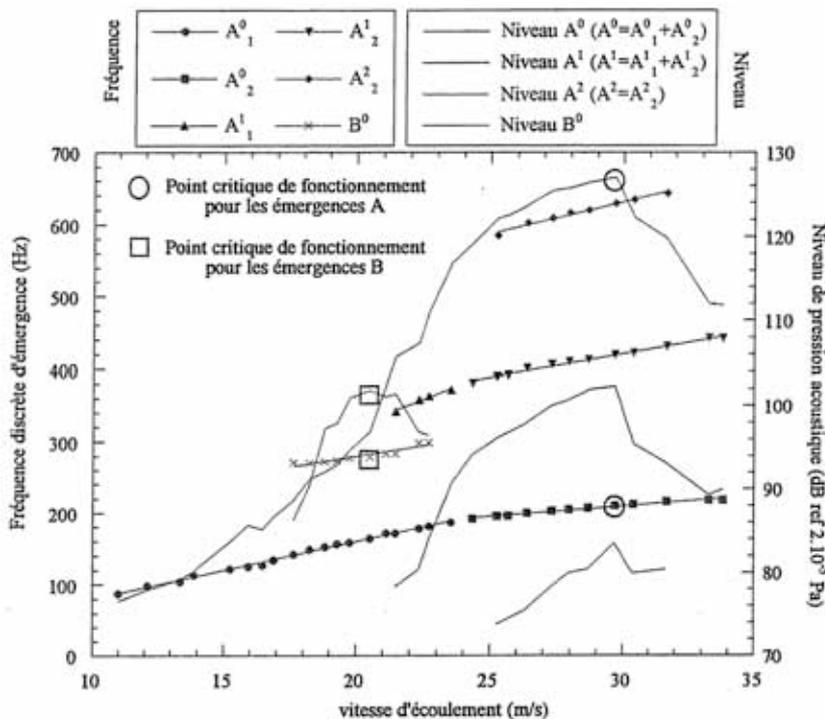


Figure 4 : Relations liant vitesse d'écoulement, fréquence d'émergence et niveau de pression acoustique pour les différentes émergences de la maquette CN1 en soufflerie. Microphone dans la cavité.

Nom des maquettes	Phénomènes critiques				Émergences aéroacoustiques (autour du point critique de fonctionnement)		Commentaires (harmoniques présents, différentes émergences...)
	X_j^i	U_{mcr} m/s	f_{emcr} Hz	L_p^2 dB	Relation U_m, f_{em}	Domaine concerné U_m / U_{mcr}	
CP1	A_2^0	20,9	531	106	$f_{em} = 2,80 \cdot U_m + 474$	[0,77 ; 1,20]	A_1^1 et A_2^2 observés
CP2	A_2^0	16,1	258	124,8	$f_{em} = 3,18 \cdot U_m + 205$	[0,63 ; 1,50]	A_1^1 et A_2^2 observés A_1^0 observé
CP3	A_2^0	17,6	267	125,6	$f_{em} = 3,81 \cdot U_m + 198$	[0,64 ; 1,48]	A_1^1 et A_2^2 observés A_1^0 observé
CN1	A_2^0	29,7	210	127	$f_{em} = 2,91 \cdot U_m + 122$	[0,82 ; 1,14]	A_1^1 et A_2^2 observés A_1^0 et A_1^1 observés
	B^0	20,5	279	101,8	$f_{em} = 5,84 \cdot U_m + 163$	[0,86 ; 1,11]	pas d'harmoniques
CE1	A_2^0	27,6	195	115,8	$f_{em} = 2,41 \cdot U_m + 127$	[0,84 ; 1,20]	A_1^1 observé
	B^0	17,6	242	88,3	$f_{em} = 4,16 \cdot U_m + 169$	[1 ; 1,12]	pas d'harmoniques
CE2	Aucune émergence aéroacoustique observée pour le domaine de vitesse autorisé par la soufflerie						

Tableau 2 : Résultats relatifs aux 6 configurations de base

- Catégorie A : elle regroupe l'ensemble des émergences notées $A_1^0, A_2^0, A_1^1, A_2^1, A_2^2$,

- Catégorie B : elle est constituée des émergences notées B^0 .

Interprétation des émergences du type A

Pour interpréter les émergences du type A, nous disposons des résultats expérimentaux concernant les relations entre la vitesse d'écoulement, les différentes fréquences d'émergences et les niveaux de pression acoustiques correspondants, mesurés dans la cavité. On exploite par ailleurs, les résultats issus de la synthèse bibliographique relatifs aux différents mécanismes aéroacoustiques rencontrés pour une configuration d'essai telle que la nôtre et à leur caractérisation en terme de relation entre la vitesse d'écoulement, les fréquences d'émergence et la pression acoustique. On en déduit que :

- Les émergences A_1^0 correspondent à une "résonance de couche de cisaillement"
- Les émergences A_2^0 correspondent à une "résonance couplée couche de cisaillement-cavité".

Quel est le mode acoustique de la cavité ouverte mis en jeu dans les mécanismes de résonances conduisant aux émergences du type A ?

2 Niveau de pression acoustique mesuré dans la cavité, en dB réf : $2 \cdot 10^{-5}$ Pa

3 La superposition du phénomène de passage des pâles (autour de la vitesse de 27m/s) amplifie les niveaux de pression acoustique relevés, mais ne perturbe pas l'évolution des résonances aéroacoustiques. Dans le cas présent, on peut estimer l'amplification à environ 8 dB.

Le phénomène critique pour les émergences A_1^0 , apparaît à la fréquence (f_{emcr}) de 210 Hz (équation (4)). La première fréquence propre (f_0) de la cavité ouverte déterminée sans écoulement est mesurée à 216 Hz (tableau 1). Par conséquent, c'est le premier mode acoustique de la cavité qui est sollicité par les résonances aéroacoustiques du type A. Enfin, signalons que les fréquences propres de la cavité ouverte pour un écoulement nul ne sont pas harmoniques. La présence d'émergences aéroacoustiques harmoniques (A_1^1, A_2^1, A_2^2) est donc à associer aux phénomènes de résonances aéroacoustiques et non au comportement acoustique de la cavité ouverte.

Interprétation des émergences du type B

À partir de la figure 4, on constate que les émergences aéroacoustiques du type A_1^0 conduisent à des niveaux de pression acoustique dans la cavité qui sont au moins supérieurs de 20 dB aux niveaux des autres émergences. En considérant que cet ordre de grandeur est conservé dans le cas des émergences B, on en déduit que les seules émergences observées sont du type B^0 . Les autres émergences ($B_1^0, B_1^1, B_2^1...$) mettent en jeu des niveaux de pression acoustique qui sont inférieurs au niveau du fond continu. Les émergences B (B^0) correspondent à une "résonance couplée couche de cisaillement-cavité". Le phénomène critique pour les émergences B, apparaît à la fréquence (f_{emcr}) de 279 Hz (équation (5)). La deuxième

fréquence propre (f_1) de la cavité ouverte déterminée sans écoulement est mesurée à 278 Hz (tableau 1). Par conséquent, c'est le deuxième mode acoustique de la cavité qui est sollicité par les résonances aéroacoustiques du type B.

Relation fréquences propres - fréquences d'émergences critiques

On remarque qu'en fonctionnement, la fréquence critique (f_{emcr} voir tableau 2) a une valeur différente de la valeur de la fréquence propre déterminée sans écoulement (f_i voir tableau 1). Cependant, les écarts sont faibles ; par exemple ; pour la maquette CN1 on a :

$$f_0 = 216 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad f_{cmer} (A) = 210 \text{ Hz} \quad (6)$$

$$f_1 = 278 \text{ Hz} \quad \text{et} \quad f_{emcr} (B) = 279 \text{ Hz} \quad (7)$$

Les différences enregistrées peuvent être attribuées à la présence de l'écoulement. Mais, on ne peut dégager de tendances quant au classement de f_{emcr} et f_i : dans le cas (6) f_{emcr} est inférieur à f_0 , dans le cas (7) c'est le contraire. L'interprétation physique des écarts apparaît donc difficile.

Cependant, rappelons que d'une part, la largeur de bande associée aux premières fréquences propres de la cavité (sans écoulement) est importante, et d'autre part, que les niveaux associés à une émergence aéroacoustique autour du point de fonctionnement critique ont des valeurs proches du niveau critique. Ces deux constats montrent que les déterminations expérimentales de f_i et de f_{emcr} ne peuvent être jugées précises au Hertz près (ceci, même si la résolution fréquentielle des spectres est inférieure à 1 Hz). On peut donc considérer en première approximation, que les valeurs de f_i et f_{emcr} sont identiques.

Sur la base des résultats expérimentaux recensés dans la littérature, et des résultats expérimentaux relatifs aux six configurations du groupe 1 présentés ci-dessus, nous pouvons conclure sur les phénomènes aéroacoustiques associés à une cavité ouverte exposée à un écoulement rasant : Chaque mode acoustique de la cavité ouverte est susceptible de donner lieu pour certaines vitesses d'écoulement à différentes résonances aéroacoustiques qui sont les résonances de couche de cisaillement et les résonances couplées couche de cisaillement-cavité. Ces résonances sont caractérisées par une relation affine entre les fréquences d'émergence et la vitesse d'écoulement. Par ailleurs, pour ces résonances, on observe, outre le fondamental de la fréquence d'émergence, la présence d'harmoniques.

On peut classer les différentes émergences relatives à un mode acoustique de la cavité en fonction des niveaux de pression acoustiques induits dans la cavité ou bien à l'extérieur :

- Le fondamental de la résonance couplée couche de cisaillement-cavité conduit aux niveaux acoustiques les plus élevés.
- On trouve ensuite, l'harmonique 1 de la résonance couplée couche de cisaillement-cavité et le fondamental de la résonance de couche de cisaillement.
- Les harmoniques d'ordre supérieur des deux résonances conduisent à des niveaux d'autant plus faibles que l'ordre est grand.

Enfin, le mécanisme conduisant au niveau de pression acoustique le plus élevé dans la cavité ou à l'extérieur correspond au phénomène critique associé à la première fréquence propre de la cavité ouverte sans écoulement. La résonance mise en jeu est donc du type résonance couplée couche de cisaillement-cavité.

Caractérisation de l'écoulement au voisinage de l'ouverture de la cavité

Il s'agit maintenant de procéder à une analyse pour le point de fonctionnement critique autour du premier mode acoustique de la cavité sans écoulement. La résonance aéroacoustique mise en jeu est donc une résonance couplée couche de cisaillement-cavité. La démarche envisagée consiste à déterminer une relation entre une grandeur moyenne caractéristique de l'écoulement et le débit des sources élémentaires simulant les sources aéroacoustiques réelles. La vitesse d'écoulement correspond à la vitesse critique de fonctionnement de la première émergence aéroacoustique ($U_{scr} = 29 \text{ m/s}$).

Afin de caractériser le mouvement du fluide au voisinage de l'ouverture de la cavité, nous réalisons des acquisitions de vitesse totale (vitesse instantanée) à l'aide d'une sonde "fils chauds" en X. Ce capteur nous permet d'obtenir les composantes de vitesse totale suivant la direction de l'écoulement principal (x) et suivant la normale à l'interface de la cavité (z). Les points de mesure de la vitesse totale sont répartis suivant cinq droites normales à l'interface de la cavité comme l'indique la figure 5. On obtient par conséquent, cinq profils de cavité, sur la paroi de développement de la couche limite et dans l'écoulement.

L'exploitation des mesures expérimentales est réalisée suivant les trois étapes suivantes :

- *Analyse spatiale* : L'écoulement est caractérisé par les grandeurs moyennes suivantes : vitesses moyennes, fluctuations de vitesses quadratiques moyennes et énergie cinétique de turbulence (les définitions sont présentées ci-dessous). Il s'agit de qualifier la répartition spatiale de ces grandeurs moyennes au voisinage de l'ouverture de la cavité.
- *Analyse spectrale* : Nous conduisons une analyse spectrale afin de caractériser pour les grandeurs moyennes de l'écoulement, la part liée à la résonance aéroacoustique.
- *Mouvement de la couche de cisaillement* : A partir des mesures de vitesse totale au voisinage de l'interface, il s'agit de reconstituer le mouvement de la couche de cisaillement sur l'interface.

Analyse spatiale

L'analyse spatiale concerne l'évolution au voisinage de l'interface de la cavité, des grandeurs moyennes caractérisant le mouvement du fluide. Ces grandeurs sont :

- la vitesse moyenne suivant la direction de l'écoulement (U),
- la vitesse moyenne suivant la normale au plan de développement de la couche limite (\bar{w}),
- les fluctuations de vitesses quadratiques moyennes correspondantes (u^2 et w^2).

Les résultats expérimentaux présentés ont été obtenus pour une vitesse d'écoulement de 29 m/s, qui est la vitesse critique pour la maquette CN1 (voir tableau 2).

Les grandeurs sont représentées sous une forme adimensionnelle :

- la "référence" pour les longueurs est l'épaisseur de couche limite δ .
- la "référence" pour les vitesses quadratiques est U_∞^2 .

Sur cette figure 5, nous présentons les profils des fluctuations de vitesses quadratiques moyennes suivant la direction principale de l'écoulement (x) et suivant la normale au plan de développement de la couche limite (z). Les courbes notées CLT1 et CLT2 présentent les mesures pour la couche limite turbulente respectivement en amont et en aval de l'ouverture de la cavité. Les courbes notées CT1, CT2 et CT3 présentent les mesures au voisinage du col de la maquette. On constate que les quantités fluctuantes caractérisant la turbulence sont minimales dans la cavité. Ce résultat, associé à ceux concernant les vitesses moyennes d'écoulement dans la cavité, montre que le volume principal de la cavité peut, en première approximation, être considéré au repos.

Dans la zone externe de la couche de cisaillement ($z/\delta > 0,1$) les grandeurs fluctuantes ont une évolution tout à fait similaire à celle déterminée pour les mêmes quantités dans le cas de la couche limite turbulente en amont ou en aval de la cavité. Par conséquent, on en déduit que la présence de la maquette CN1 ne perturbe pas la zone externe de la couche limite turbulente établie en amont : l'écoulement dans la zone externe de la couche de cisaillement a le même comportement que celui correspondant dans la couche limite turbulente mesuré en amont ou en aval de la cavité.

Par ailleurs, on observe une augmentation des valeurs des grandeurs fluctuantes suivant la direction de l'écoulement, à mesure que l'on se rapproche du bord de fuite.

On définit la région proche de l'interface à partir de l'épaisseur de quantité de mouvement et de la cote (z) d'un point, par : $-\theta < z < \theta$.

Ces observations, effectuées sur des grandeurs moyennes de l'écoulement sont évidemment à rapprocher des mesures de pression acoustique visant à caractériser le champ acoustique émis au voisinage de la cavité. Les résultats de ces deux études concordent pour localiser les sources aéroacoustiques au niveau de l'interface de la cavité.

Remarque : La zone proche de l'interface est définie à partir de l'épaisseur de quantité de mouvement de la couche de cisaillement z/θ . Nous avons constaté que les phénomènes aéroacoustiques ont une influence prépondérante dans cette zone proche de l'interface. Cela constitue un argument supplémentaire quand à la pertinence de l'épaisseur de quantité de mouvement en tant que grandeur caractéristique de la couche de cisaillement.

Analyse spectrale

L'analyse spectrale est effectuée à partir des signaux de vitesse totale d'écoulement qui nous ont permis de réaliser l'étude spatiale. Nous disposons donc d'échantillons temporels de signaux correspondant à la composante de vitesse totale suivant la direction principale de l'écoulement (x) et à la composante normale au plan de développement de la couche limite turbulente (z). Les résultats présentés ci-dessous correspondent à des acquisitions au point P. Le point P est situé à l'intersection de la droite CT3 et de l'interface (voir figure 5). ce point a pour coordonnées (42 mm, 0, 0) dans le repère (O_M, x, y, z).

La figure 6 présente la densité spectrale de puissance pour la composante de vitesse totale suivant la direction de l'écoulement principal (U, suivant x) mesurée sur l'interface au point P.

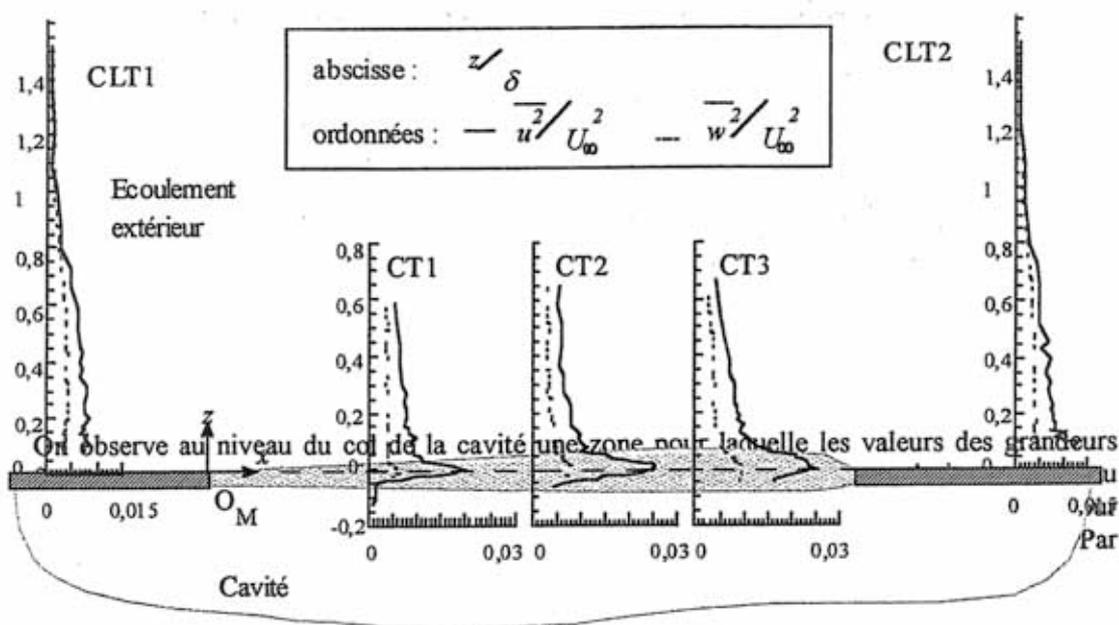


Figure 5 : Fluctuations de vitesses quadratiques moyennes correspondantes ($\overline{u^2}$ et $\overline{w^2}$)

La densité spectrale de puissance pour la composante de vitesse normale au plan de développement de la couche limite (W , suivant z) mesurée sur l'interface au point P présente une évolution spectrale comparable. On observe sur les courbes présentant la densité spectrale de puissance pour les composants de vitesse U (figure 6), W deux émergences fréquentielles. Ces émergences correspondent aux émergences aéroacoustiques A^0_2 et A^1_2 mises en évidence dans le cas de signaux de pression acoustiques, figure 3. L'émergence notée A^0_2 , est située à 207 Hz, l'émergence notée A^1_2 est l'harmonique un de A^0_2 ; elle est située à 414 Hz.

L'écart entre le niveau de l'émergence A^0_2 et le niveau de fond continu du spectre est en moyenne pour les deux grandeurs présentées (U , W) de 22 dB. L'émergence A^1_2 a un niveau en moyenne inférieur de 10 dB à celui de A^0_2 . On n'observe pas l'harmonique deux de A^0_2 , comme nous l'avions fait avec le signal de pression acoustique. La cause est à attribuer à une faible dynamique des émergences aéroacoustiques. Dans le cas du signal de pression acoustique, l'émergence A^0_2 a une dynamique vis-à-vis du fond continu de près de 40 dB, dans le cas des grandeurs de l'écoulement, la dynamique pour cette émergence n'est plus que de 22 dB. Afin de quantifier la part de la résonance aéroacoustique sur le niveau total, les mêmes mesures sont réalisées sur la maquette CE2 qui reprennent les dimensions de CN1, à l'exception de la profondeur ($d = 36$ mm). Pour cette maquette, aucune résonance aéroacoustique n'est observée dans la plage de vitesse 0-35 m/s. On constate que le niveau du fond continu est le même pour les deux maquettes.

Nous pouvons donc conclure que la contribution du phénomène d'émergences aéroacoustiques sur les niveaux de pression acoustique ou d'oscillations de couche de cisaillement est uniquement périodique. Le niveau du fond continu des spectres de vitesse totale est défini par l'écoulement turbulent, indépendamment des phénomènes aéroacoustiques. Nous qualifions cette contribution de part aérodynamique.

Il s'agit maintenant de déterminer l'importance relative des parts aéroacoustiques et aérodynamiques pour les valeurs moyennes des grandeurs de l'écoulement :

$$\overline{U}, \overline{W}, \overline{u^2}, \overline{w^2} \dots$$

Pour ce faire, nous réalisons un filtrage des signaux temporels afin d'éliminer les composantes harmoniques des résonances aéroacoustiques (filtre coupe bande aux fréquences centrales $f = 207$ Hz et $f = 414$ Hz, avec une largeur de bande $\Delta f = 14$ Hz).

Le tableau 3 présente les valeurs des grandeurs moyennes de l'écoulement déterminées à partir des signaux bruts et filtrés pour les trois mesures réalisées sur l'interface (intersection des 3 droites CT1, CT2 et CT3 est du plan de l'interface). La principale conclusion est que la part aéroacoustique est localisée principalement sur l'interface de la cavité.

À partir des résultats de ce tableau, on constate que (bien sûr) les vitesses moyennes sont inchangées après filtrage. Les valeurs des quantités fluctuantes moyennes sont par contre diminuées de manière significative par le filtrage.

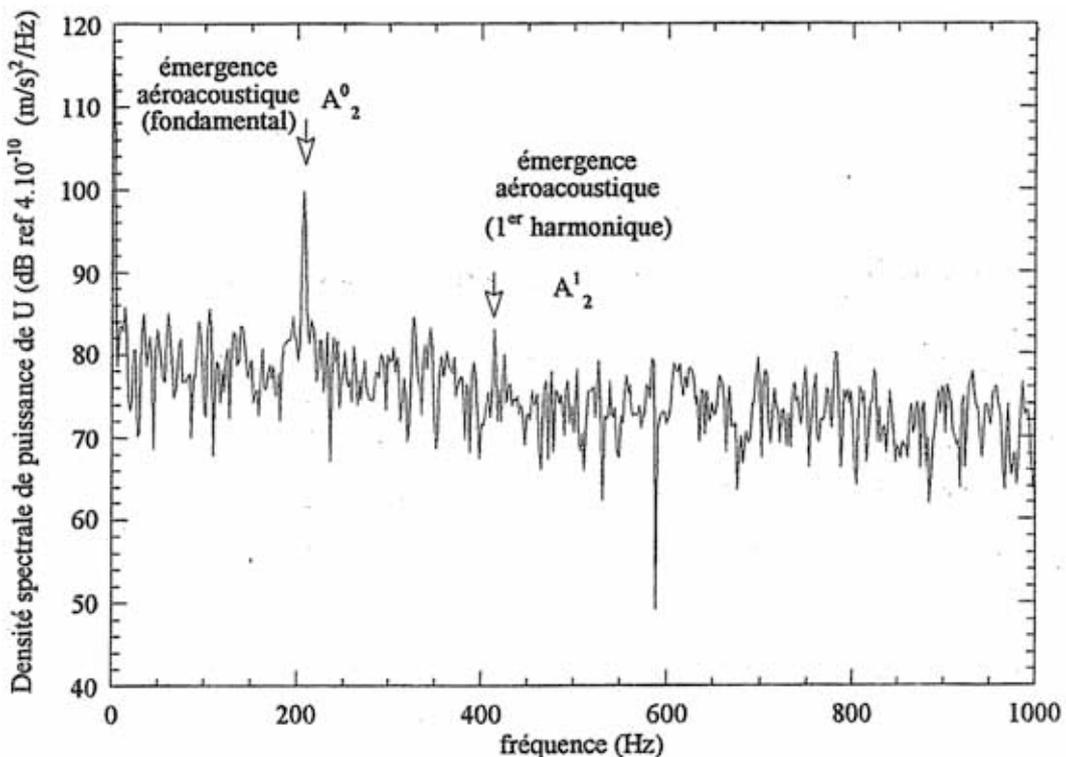


Figure 6 : DSP de la vitesse totale U mesurée sur l'interface en P - $U_\infty = 29$ m/s

Position	\bar{U} (m/s)	\bar{W} (m/s)	$\overline{u^2}$ (m/s) ²	$\overline{w^2}$ (m/s) ²
CT 1	15,8	0,21	17,9	5,69
CT 1 - signal filtré	15,8	0,21	11,0	4,20
CT 2	14,7	0,10	22,1	7,06
CT 2 - signal filtré	14,7	0,09	11,8	4,28
CT 3	15,4	-0,01	22,2	8,55
CT 3 - signal filtré	15,5	-0,01	12,0	4,52

Tableau 3 : Valeurs moyennes des descripteurs de l'écoulement sur l'interface ($z = 0 - U_\infty = 29 \text{ m/s}$)

Mouvement de la couche tourbillonnaire

Afin de caractériser le mouvement de la couche de cisaillement sur l'interface, nous choisissons de reconstruire le champ des vecteurs vitesse du fluide dans cette zone. Nous nous limitons aux composantes suivant la direction de l'écoulement (x) et normales au plan de développement de la couche limite (z). Un microphone, la référence de phase, est positionné de manière à mesurer la pression acoustique dans la cavité. La sonde à fils chauds occupe successivement toutes les positions d'un maillage spatial de la zone de l'interface (maillage : 3 mailles suivant x , 40 mailles suivant z). Le maillage est constitué de l'ensemble des points de mesures appartenant aux trois droites CT1, CT2 et CT3 (figure 5).

Le déphasage entre signaux de la sonde à fils chauds et le microphone de référence est constant. On peut par conséquent déterminer les relations de phase entre tous les signaux de la sonde à fils chauds.

Grâce à ces relations de phase, le mouvement de la couche tourbillonnaire peut être reconstruit.

Les mesures expérimentales pour un profil donné (x et y fixés, z varie) montrent que les particules fluides contenues dans le code la cavité ($-3 \text{ mm} < z < 0$) se déplacent en phase avec quasiment la même amplitude. En d'autres termes, les composantes de vitesse normale sont égales et en phase sur une normale à la cavité ; ainsi que les composantes de vitesse longitudinale. Par conséquent, dans le volume du col, pour un profil donné, tout se passe comme si le milieu était incompressible. Le mouvement sur l'ouverture de la cavité peut donc être décomposé en "tranches" où les particules fluides sont considérées solidifiées.

Pour la vitesse critique ($29 \text{ m/s} \approx U_{\text{crit}}$) et la fréquence critique ($207 \text{ Hz} \approx f_{\text{emcr}}$), le champ des composantes de vitesse normale sur l'interface de la cavité reconstruit grâce à la méthode expérimentale exposée ci-dessus est le suivant (repère (O_M, x, y, z) - unités SI) :

$$\begin{cases} W\left(\frac{\ell}{4}, 0, 0, t\right) = 0,618. \sin(\omega t) \\ W\left(\frac{\ell}{2}, 0, 0, t\right) = 0,883. \sin\left(\omega t - \frac{43\pi}{180}\right) \\ W\left(\frac{3\ell}{4}, 0, 0, t\right) = 1,014. \sin\left(\omega t - \frac{121\pi}{180}\right) \end{cases}$$

Cette fonction $w(x, t)$ met en évidence l'amplification de la composante transversale de la vitesse du fluide, le long de l'interface. Ce résultat est conforme aux observations expérimentales rencontrées dans la littérature et qui concernent les couches tourbillonnaires.

Conclusions

L'étude expérimentale en soufflerie nous a permis de retrouver les différents phénomènes de résonances aéroacoustiques évoqués lors de l'étude bibliographique, à savoir la "résonance de couche de cisaillement" et la "résonance couplée cavité-couche de cisaillement". Il apparaît clairement que cette dernière est de loin la plus préjudiciable en terme de niveau de pression acoustique générée.

On note pour ces deux émergences la présence d'harmoniques. D'autre part, pour une même maquette, différentes résonances couplées ont été observées, indiquant que "l'accrochage" de résonances est possible pour différentes fréquences. Notons que les résonances ont été observées à la fois par des microphones placés dans la cavité ou dans l'écoulement et par des fils chauds mesurant les vitesses fluides au niveau du col des maquettes. Les mesures réalisées sur site, par la SNCF, dans le cas d'une césure du TGV ont confirmé les résultats acquis en soufflerie.

Nous avons mis en évidence :

- l'influence de l'écoulement sur l'apparition de résonances aéroacoustiques. Il est donc clair que tout modèle de prévision du phénomène doit absolument prendre en considération des descripteurs de la nature de l'écoulement autres que l'unique vitesse extérieure. Sur ce point, il apparaît que l'épaisseur de quantité de mouvement de la couche de cisaillement est une grandeur caractéristique intéressante. Elle délimite la zone centrée sur l'interface de la cavité, pour laquelle les résonances aéroacoustiques ont une influence significative sur l'écoulement.

- un effet dispersif pour les phénomènes aéroacoustiques. Cette dispersion, associée à la couche de cisaillement, interdit toute loi de similitude restreinte. Nous avons à ce sujet vérifié que le modèle de Michalke [4] permet le calcul de la vitesse de phase des perturbations de la couche de cisaillement sur l'ouverture de la cavité avec une précision satisfaisante.

- à partir de mesures couplées microphones - fils chauds, que les oscillations de la couche tourbillonnaire sur l'interface, sont en accord avec les observations reportées dans l'étude bibliographique. On peut assimiler ce mouvement à celui des ondes de Kelvin-Helmholtz dont l'amplitude du déplacement transversal augmente avec la distance au point d'attache : le bord d'attaque.

- le rôle essentiel des interactions entre couche de cisaillement et bord de fuite sur le niveau des sources, grâce à l'étude des moyens de réduction des sources. Nous avons testé et validé deux catégories de solutions, symétriques compte tenu des deux sens de circulation du TGV, en vue de réduire les sources aéroacoustiques :

- Les déflecteurs et biseaux. Leur action se situe sur le bord d'attaque de la césure. Le but est de faire décoller suffisamment la couche tourbillonnaire pour celle-ci n'agisse plus sur le bord de fuite par conséquent, ne génère plus de forts niveaux acoustiques.

- Les prises d'égalisation des pressions. Leur but est de stabiliser la couche de cisaillement en égalisant les pressions de part et d'autre de l'interface de la cavité et en générant des petites structures tourbillonnaires qui sont convectées par la couche de mélange.

Toutes les observations réalisées et les interprétations qui en découlent, forment une base pour le développement de modèles de prévision. Les données expérimentales accumulées sont utiles pour la validation de ces modèles et des codes de calculs développés.

Références bibliographiques

[1] Letourneaux F., Blaise A. et Lesueur C., *Vibroacoustic behaviour of complex and heterogeneous plates coupled with a cavity and excited aerodynamically : case of large structures*. In : *Proceedings of Internoise 96, Liverpool, England, 1996, PP. 1419-1422*

[2] Letourneaux F., *Comportement vibroacoustique de systèmes de grandes dimensions excités par des sources aéroacoustiques : application aux trains grande vitesse*. Thèse, INSA de Lyon, 1996, 208 P.

[3] Massenzio M., *Caractérisation de sources aéroacoustiques sur Trains Grande Vitesse en vue de la prévision de la pression acoustique*, Thèse, INSA de Lyon, 1997 isal 0028, 256 P.

[4] Michalke A., *On spatially growing disturbances in a inviscid shear layer*, *J. Fluid. Mech.*, 1965, Vol. 23, PP 521-544.

PUB BONTEMPS

50 X 190