

Calcul du rayonnement acoustique généré par une cavité cylindrique sous une aile d'avion

Soutenance de thèse

Jérémie Chicheportiche

Directeur de thèse : Alain Lerat

Co-directeur de thèse : Xavier Gloerfelt

DynFluid Lab

Arts et Métiers ParisTech, Paris

<http://www.sin-web.paris.ensam.fr>

12 Octobre 2011 - Paris

- 1 Introduction
- 2 Méthodes de recouvrement de maillages
- 3 Génération d'une condition d'entrée turbulente
- 4 Rayonnement d'une cavité cylindrique
- 5 Conclusions et perspectives

Cavités cylindriques d'une aile d'avion

Composantes majeures du bruit différentes selon les phases de vol d'un avion :

- décollage : bruit de jet des réacteurs
- atterrissage : **bruit de la voilure** et du fuselage



Cavités anti-gel

(Czech et al. AIAA Paper 2006-2508)



Évacuation de carburant
("Burst-disk")

↪ Bruit relativement intense et très marqué en fréquence

Projet AEROCV (Aéroacoustique des cavités)

- Initiative de recherche IROQUA sous l'impulsion d'AIRBUS
- Financé par la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'Espace (FRAE)

But : caractérisation de la dynamique et de l'acoustique de l'écoulement au-dessus des cavités cylindriques d'évacuation

Essais expérimentaux :

- soufflerie F2 (à Fauga-Mauzac) de l'ONERA
- soufflerie anéchoïque de l'Ecole Centrale de Lyon (Marsden *et al.*, AIAAP 2010-3988)

Simulations numériques :

- DSNV de l'ONERA et IUSTI (D. Mincu, Thèse 2010)
- LMFA de l'Ecole Centrale de Lyon (D. Desvigne, Thèse 2010)
- DynFluid d'Arts et Métiers ParisTech (**J. Chichoportiche**)

Étude de stabilité :

- DMAE de l'ONERA (F. Mery, Thèse 2010)
- DynFluid d'Arts et Métiers ParisTech (J.-C. Robinet)

Configurations d'étude de AEROCAV

Campagne d'essais expérimentale :

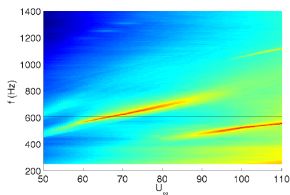
- cavités cylindriques de diamètre $D=100\text{mm}$ et de hauteur variant de $H=50 - 150\text{ mm}$
- vitesse d'écoulement U_∞ variant de 50 à 110 m/s

Configuration retenue pour les simulations numériques :

- $H=100\text{ mm}$ ($D/H=1$) pour $U_\infty=70\text{ m/s}$ ($Re_D=4.6\times 10^5$)
 - ↪ pic acoustique intense et marqué (couplage entre un mode de Rossiter et un mode de profondeur de la cavité)



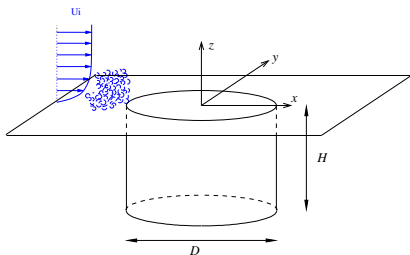
Montage d'une cavité dans une soufflerie anéchoïque



DSP expérimentale en fonction de la

Objectifs de la thèse

- Calculer à l'aide de simulations numériques le rayonnement acoustique d'un écoulement au-dessus d'une cavité cylindrique (Calcul direct de bruit)
- Se comparer aux bases de données expérimentales et numériques du projet AEROCAR
- Comprendre les mécanismes du rayonnement de ces cavités



- 1 Développement d'une méthode de recouvrement de maillages
 - ↪ gestion de maillages cylindriques et cartésiens
- 2 Étude de conditions d'entrée turbulente
 - ↪ simuler une couche limite turbulente en amont de la cavité
- 3 Simulations d'un écoulement au-dessus d'une cavité cylindrique
 - avec et sans condition d'entrée
 - comparaisons avec la base de données expérimentales

Calcul direct de bruit

Obtention d'un champ acoustique et aérodynamique dans le même calcul

↪ Utilisation de schémas de haute précision

Schémas de discrétisation :

- discrétisation des flux eulériens avec un schéma aux différences finies centré et optimisé sur 11 points;
- discrétisation des flux visqueux avec un schéma aux différences finies centré et d'ordre 4 standard;
- avancement en temps avec un algorithme de Runge-Kutta optimisé d'ordre 4 à six sous-étapes;
- conditions limites non réfléchissantes de Tam et Dong + zone éponge en sortie de domaine

Stratégie de simulation aux grandes échelles (SGE) :

- Prise en compte des effets à petites échelles par régularisation avec un filtrage sélectif optimisé sur 11 points;

- 1 Introduction
- 2 Méthodes de recouvrement de maillages**
- 3 Génération d'une condition d'entrée turbulente
- 4 Rayonnement d'une cavité cylindrique
- 5 Conclusions et perspectives

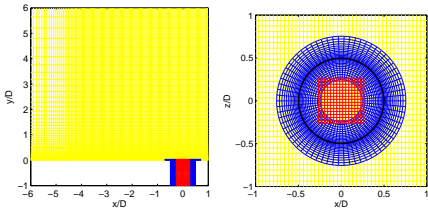
Introduction aux méthodes de recouvrement de maillages

- décomposer un domaine de calcul complexe en plusieurs sous-domaines plus petits et plus simples afin de garder l'ordre élevé des schémas
- résoudre un problème d'équations aux dérivées partielles sur des maillages recouvrant qui communiquent à l'aide d'interpolations

Objectif : trouver une interpolation suffisamment précise pour ne pas dégrader l'ordre global de la solution numérique

Exemple de codes avec recouvrement de maillages :

- Bibliothèques
OVERTURE
(Lawrence Livermore
National Laboratory)
- SAFARI (LaMSID, EDF)
- CASSIOPÉE (DSNA,
ONERA)



Méthodes d'interpolation 1D

Formulation explicite d'une interpolation 1D

Soit N la taille du support d'interpolation et u une fonction définie par les points du support x_j . Une interpolation explicite des points x_j au point x_0 est :

$$u(x_0) = \sum_{j=1}^N S_j u(x_j)$$

Interpolation de Lagrange

Polynômes de degré $N - 1$:

$$S_j = \prod_{l=1, l \neq j}^N \frac{x_0 - x_l}{x_j - x_l}$$

↪ ordre de précision = N

Méthodes d'interpolation 1D

Interpolation optimisée dans l'espace des nombres d'onde
(Tam et Kurbatskii, JCP 2000)

Pour une onde monochromatique d'amplitude unitaire :

$$u_k = e^{i[kx + \phi(k)]}$$

Substitution de u_k dans la formule d'interpolation \rightarrow erreur locale :

$$E_{locale} = \left| 1 - \sum_{j=1}^N S_j e^{-i \frac{(x_j - x_0)}{\Delta x} k \Delta x} \right|^2$$

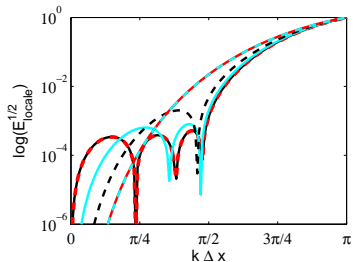
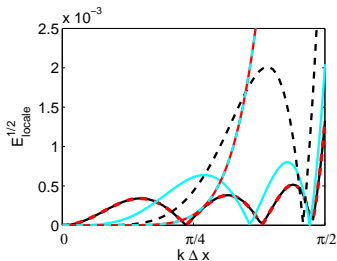
Integration de E_{locale} pour l'intervalle compris entre 0 et $\pi/2$:

$$E = \int_0^{\pi/2} \left| 1 - \sum_{i=1}^N S_i e^{-i \frac{(x_i - x_0)}{\Delta x} k \Delta x} \right|^2 d(k \Delta x)$$

Coefficients d'interpolations S_i obtenus en minimisant E avec la méthode des multiplicateurs de Lagrange sous contraintes :

- $E_{locale}(k = 0) = 0$
- contraintes d'ordre issues d'un developpement en séries de Taylor (Tam & Hu, AIAAP 2004)
 - ↪ amélioration en bas nombre d'onde de l'interpolation

Interpolations de Lagrange et interpolations optimisées avec contraintes d'ordre pour un point interpolé en milieu de support et $N = 8$



Erreurs locales pour des interpolations optimisées d'ordre (opt. o.) : opt. o.0 (—), opt. o.2 (---), opt. o.4 (—), opt. o.6 (---), opt. o.8 (---).
Interpolation de Lagrange pour $N=8$ (—).

Méthodes d'interpolation 2D

Formulation explicite d'une interpolation 2D

Soit $N \times N$ la taille du support d'interpolation et u une fonction définie sur les points de support (x_i, y_j) . L'interpolation explicite des points (x_i, y_j) vers le point (x_0, y_0) est :

$$u(x_0, y_0) = \sum_{i,j=1}^N S_{ij} u(x_i, y_j)$$

- **Interpolations dans un espace cartésien après transformation du support curviligne :**
 - Lagrange $2 \times 1D$ (Cheshire & Henshaw, JCP 1990, Delfs AIAAP 2001, Scott & Sherer, JCP 2005)
 - Interpolations multidimensionnelles (Guénauff, Desquesnes *et al.*, JCP 2006)
- **Interpolations dans un espace curviligne sans transformation :**
 - Lagrange $2 \times 1D$ (Marsden *et al.*, JCA 2007)
 - Optimisation dans l'espace des nombres d'onde (Tam & Hu, AIAAP 2004)

Méthodes d'interpolation 2D

Interpolations $2 \times 1D$ dans un espace cartésien : généralisation du 1D au 2D

Si la transformation d'un support physique curviligne vers un support de calcul cartésien est connue :

$$S_{ij} = S_i S_j$$

où S_i et S_j sont les coefficients d'interpolation 1D.

Interpolations dans un espace curviligne

Méthodes d'interpolation impliquant une inversion de matrice souvent mal conditionnée :

- montée en ordre délicate
- problème pour certaines orientations du support

Résultats numériques

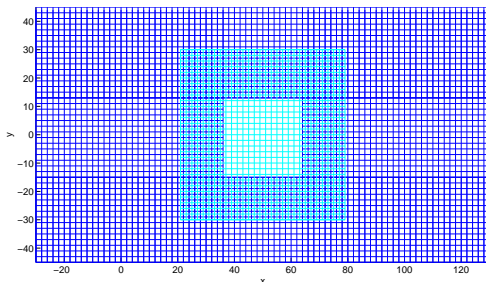
- Résolution des équations d'Euler
- Formulations cartésiennes et polaires

Stratégie de recouvrement

- Générateur de maillages *Ogen* issu des bibliothèques libres *Overture*.
- Formulation explicite des interpolations.
- Interpolations centrées $2 \times 1D$.
- Interpolations réalisées à chaque sous-étape du Runge-Kutta et une fois après le filtrage de la solution.

Résultats numériques

Recouvrement cartésien-cartésien



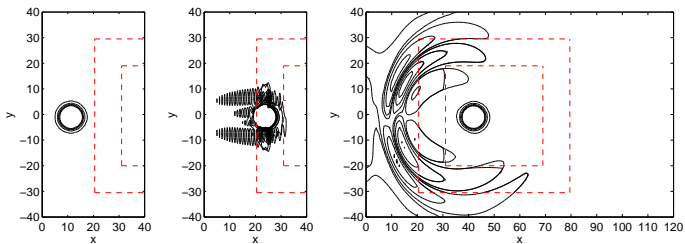
Grille de fond : $nx_1=151$, $ny_1=81$

Grille au premier plan : $nx_2=50$,
 $ny_2=51$

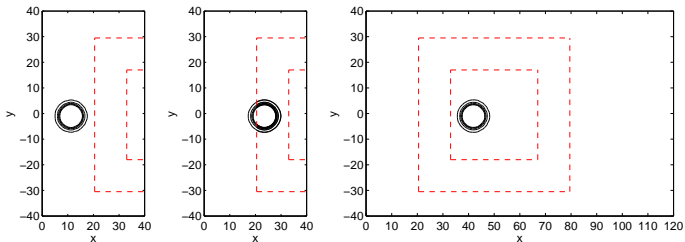
Support	Nb de points d'interpolation	
	Fond	dessus
2×2	890	1110
4×4	850	1110
6×6	810	1110
8×8	770	1110
10×10	730	1110
12×12	690	1110

Résultats : advection d'un tourbillon

- Support 2×2 , interpolation de Lagrange

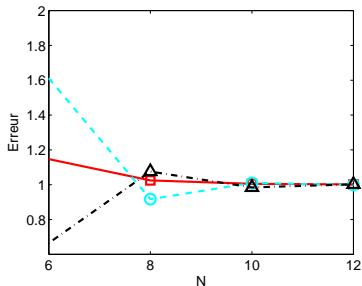
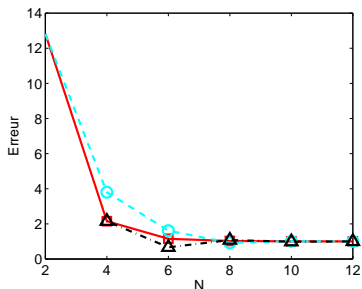


- Support 6×6 , interpolation de Lagrange



Résultats : advection d'un tourbillon

Norme L2 de l'erreur entre les champs de pression de la solution numérique et analytique à la dernière itération :



Interpolations de Lagrange (— □), interpolations optimisées d'ordre 2 (--- ○) et d'ordre 4 (-.-.- △).

Erreurs normalisées par l'erreur de la simulation avec la grille cartésienne de fond sans recouvrement.

Résultats : propagation d'une source harmonique

$$S = \sin(\omega t) \exp\left(\frac{\ln 2}{0.3^2} (x^2 + y^2)\right)$$

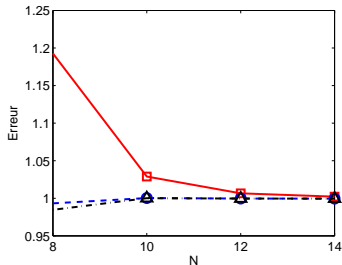
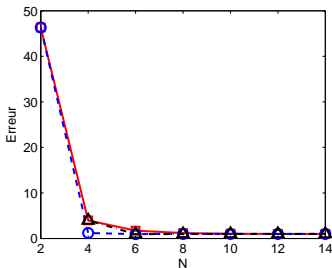
- si $\omega = 2\pi/5$, longueur d'onde difficilement supportée par le maillage

Norme L2 de l'erreur quadratique moyenne entre la pression numérique et analytique le long de la coupe $y = 0$:

$$p_{rms_i} = \sqrt{\sum_{n=1}^{N_{it}} \left(\frac{(p_{i,j}^n - p_\infty)^2}{N_{it}} \right)_{y=0}}$$
$$Erreur = \sqrt{\sum_{i=1}^{n_x} \left(\frac{(p_{rms_i} - p_{an_i})^2}{n_x} \right)}$$

Résultats : propagation d'une source

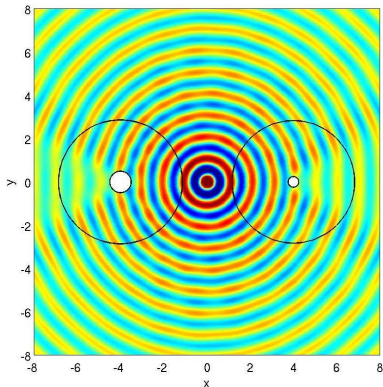
- $\omega = 2\pi/5$



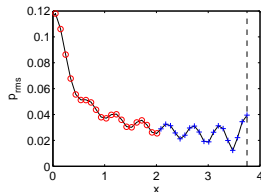
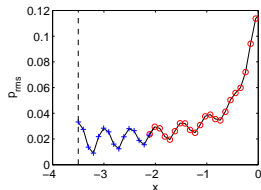
Interpolations de Lagrange (— □), interpolations optimisées d'ordre 2 (--- ○) et d'ordre 4 (-.-. △).

Erreurs normalisées par l'erreur de la simulation avec la grille cartésienne de fond sans recouvrement.

Résultats : diffraction d'une source harmonique par deux cylindres



Champ de pression, niveaux compris entre -0.05 Pa et 0.05 Pa.



Solution analytique (—),
solution numérique pour les deux
grilles polaires (+) et la grille
cartésienne (○).

Conclusions sur le recouvrement de maillages

- Une interpolation pas assez précise implique un rayonnement parasite
- Les interpolations optimisées présentent de meilleurs résultats lorsque la solution est discrétisée par peu de points
- Une interpolation $2 \times 1D$ (avec transformation) est généralement préférable
- La résolubilité de l'interpolation peut être plus faible que celle des autres schémas
 - ↪ gestion facilitée des recouvrements
 - ↪ gain en temps de calcul et en mémoire

- 1 Introduction
- 2 Méthodes de recouvrement de maillages
- 3 Génération d'une condition d'entrée turbulente**
- 4 Rayonnement d'une cavité cylindrique
- 5 Conclusions et perspectives

Stratégies d'entrée turbulente

- **Techniques de turbulence synthétique**

- transformée inverse de Fourier (Lee, Lele, Moin)
- génération aléatoire d'une turbulence gelée (Na, Moin)
- **modes de Fourier aléatoires** (Kraichnan, SNGR : Bailly, Lafon, Candel)
- structures longitudinales et tourbillons 3D (Sandham *et al.*)
- **méthode des structures synthétiques** (Jarrin *et al.*, Pamiès *et al.*)

- **Techniques de recyclage**

- méthode de mise à l'échelle de Spalart (Spalart)
- **méthodes de recyclage/réintroduction avec mise à l'échelle** (Lund *et al.*)
- entrée POD/Galerkin ou POD/LSE (Johansson & Andersson, Druault *et al.*)

- **Transition forcée**

- par la turbulence externe (Jacobs & Durbin)
- croissance transitoire et perturbation optimale (Schmid & Henningson)
- ondes obliques (scénario de type O), bulbe de séparation laminaire (Rist)
- **profil inflexionnel et perturbations 3D**

Modes de Fourier aléatoires

- **N modes RFM indépendants :**

Le champ de vitesse fluctuante est décomposé en série de Fourier :

$$\mathbf{u}'(\mathbf{x}, t) = \sum_{n=1}^N 2\hat{u}_n \cos(\mathbf{k}_n \cdot (\mathbf{x} - \bar{\mathbf{u}}t) + \omega_n t + \psi_n) \mathbf{a}_n$$

- $\psi_n, \mathbf{k}_n, \mathbf{a}_n$ sont des variables aléatoires avec des fonctions de densités données;
- une turbulence dégelée est obtenue en introduisant une vitesse de convection $\bar{\mathbf{u}}$ et une pulsation $\omega_n = 2\pi u' k_n$
- les amplitudes \hat{u}_n sont déterminées à partir d'un spectre d'énergie cinétique turbulente

- **Spectre d'énergie turbulente $E(k)$**

- modèle de von Kármán

$$\hat{u}_n = \sqrt{2E(k_n)\Delta k_n} \quad \text{avec} \quad E(k) = \alpha_1 \frac{u'^2}{k_e} \frac{(k/k_e)^4}{[1 + (k/k_e)^2]^{17/6}},$$

- distribution logarithmique de N modes

$$k_n = \exp[\ln k_1 + (n-1)\Delta k], \quad n = 1, \dots, N \quad \text{et} \quad \Delta k = (\ln k_{max} - \ln k_{min}) / (N-1)$$

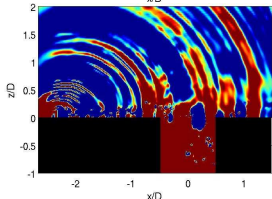
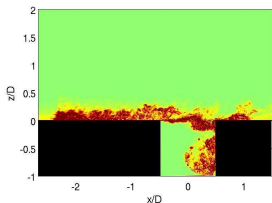
- **Paramètres**

- $k_{min} = 1/\delta, k_{max} = 100/\delta, \text{ et } N = 100$
- anisotropie : le champ turbulent isotropique et stochastique est pondéré par un profil de vitesses verticales *rms*.

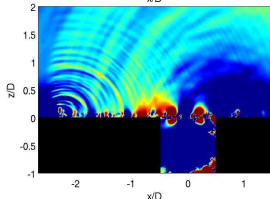
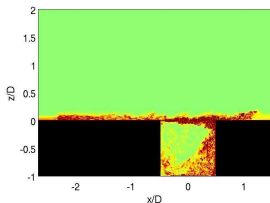
Modes de Fourier aléatoires : résultats

Norme de la vorticité (haut) et pression (bas) [$p_\infty \pm 20$ Pa]

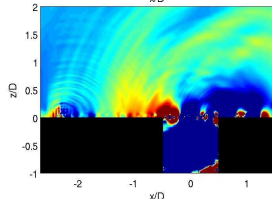
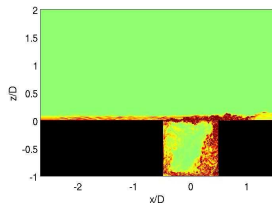
Amplitude déduite
à partir d'un spectre d'énergie



Amplitude divisée
par un facteur 10



Amplitude divisée
par un facteur 400



↪ **bruit parasite intense**

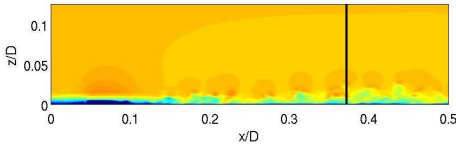
↪ conclusions identiques pour la méthode SEM

Méthode de réintroduction et mise à l'échelle

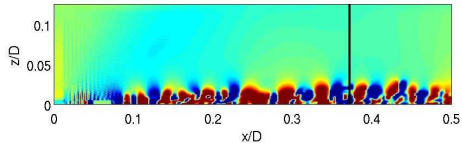
- **Simulation auxiliaire :**

- utilisation d'une **petite marche** pour déclencher une transition rapide laminaire/turbulent (cf. DNC du bruit de couche limite, AIAA paper 2009-3401 & 2010-3904)
- bas nombre de Reynolds, $Re_{\theta_0} \simeq 900 \rightarrow$ **mise à l'échelle**
- conditions périodiques dans la direction transverse

Vitesse longitudinale



Pression [$p_{\infty} \pm 20$ Pa]

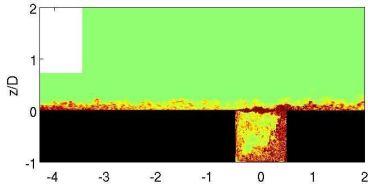


- **Maillage utilisé :**

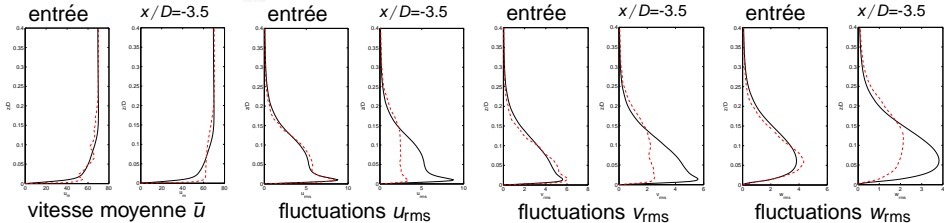
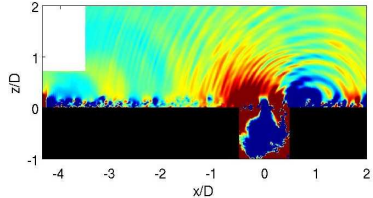
- maillage cartésien de $264 \times 101 \times 124$ points;
- plus petit pas : $\Delta x = 0.25$ mm, $\Delta y = 0.27$ mm et $\Delta z = 0.03$ mm;
- plus petit pas en variables de paroi : $\Delta x^+ \simeq 57$, $\Delta y^+ \simeq 63$ et $\Delta z^+ \simeq 7$,

Méthode de réintroduction : résultats

Champ de vorticité



Champ de pression [$p_{\infty} \pm 20$ Pa]



Simulation principale (avec cavité) (- - -) ; simulation auxiliaire (—)

- ↪ faible rayonnement parasite,
- ↪ la turbulence en entrée est difficilement maintenue et semble décroître sévèrement (à cause du maillage grossier employé).

Transition forcée : profil inflexionnel

- l'utilisation d'une petite marche peut être une méthode efficace pour déclencher la turbulence sans générer un important bruit parasite;
- profil inflexionnel de vitesse \rightarrow instabilités de Kelvin-Helmholtz \rightarrow croissance exponentielle
- une tridimensionnalisation peut aider à atteindre une transition rapide (motifs pics et vallées de type K, ondes obliques de type O).

Le profil de vitesse longitudinale en entrée est obtenu en combinant un profil de Blasius avec un profil en tangente hyperbolique :

$$\bar{u} = u_{BL} \times W(\eta) \text{ avec } \frac{u_{BL}}{U_\infty} = \begin{cases} \eta(2 - 2\eta^2 + \eta^3) & \eta < 1 \\ 1 & \eta \geq 1 \end{cases}$$

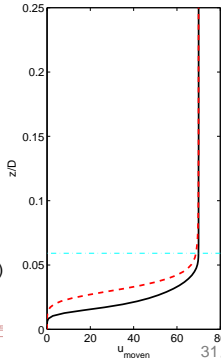
$$\text{où } \eta = y/\delta$$

$$W(\eta) = \frac{1}{2} \left\{ 1 + \tanh \left[\frac{a(\eta - b)}{(1 - 2b)\eta + b} \right] / \tanh(a) \right\}$$

$a\delta$ contrôle la pente de \tanh (cisaillement moyen);

$b\delta$: hauteur du point d'inflexion.

$b=0.5$ (- - -)
 $b=0.25$ (—)



Transition forcée : perturbations

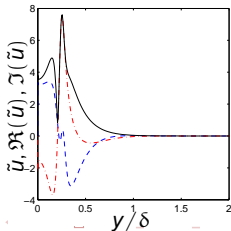
- Stabilité linéaire locale compressible et visqueuse du profil moyen (J.-C. Robinet) → mode le plus amplifié :

$$\mathbf{q}'(x, y, z, t) = \tilde{\mathbf{q}}(y) e^{i(\alpha x - \omega t)} + c.c.$$

- $\mathbf{q}' = (u', v', w', p', T')^T$ variables primitives perturbées;
 - $\alpha = \alpha_r + i\alpha_i$: α_r nombre d'onde longitudinal et α_i taux de croissance.
- Les dérivées temporelles de ces perturbations se superposent au profil moyen dans le plan d'entrée :

$$\frac{\partial \mathbf{q}'(x, y, z, t)}{\partial t} = \varepsilon \omega \times [\Re(\tilde{\mathbf{q}}(y)) \sin(\alpha_r x - \omega t) + \Im(\tilde{\mathbf{q}}(y)) \cos(\alpha_r x - \omega t)] \\ \times e^{-\alpha_i x} \times \sin(2m\pi z/L_z)$$

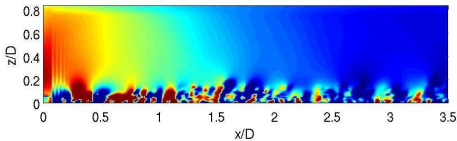
- $\Re\{\cdot\}$ et $\Im\{\cdot\}$ indiquent les parties réelle et imaginaire;
- petite amplitude aléatoire ε ;
- terme de modulation $\sin(2m\pi z/L_z)$, où m est le nombre de pics et vallées à travers l'extension spatiale L_z .



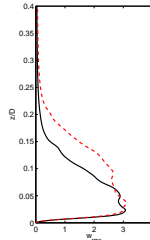
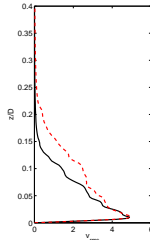
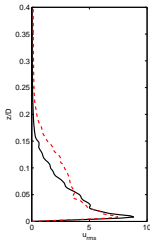
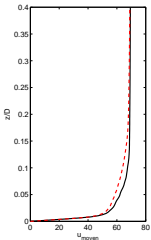
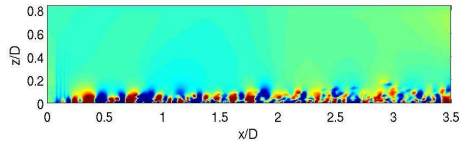
Transition forcée : résultats

Pression [$p_{\infty} \pm 20$ Pa] : zone en amont de la cavité

$b = 0.5$ & $\varepsilon = 0.0001$ (- - -)



$b = 0.25$ & $\varepsilon = 0.0001$ (—)



Vitesse
moyenne
longitudinale

fluctuations
 U_{rms}

fluctuations
 V_{rms}

fluctuations
 W_{rms}

- cas choisi : $b=0.25$;
- $a=6$; $m=3$; $\varepsilon=0.0001$;
- faible bruit parasite.

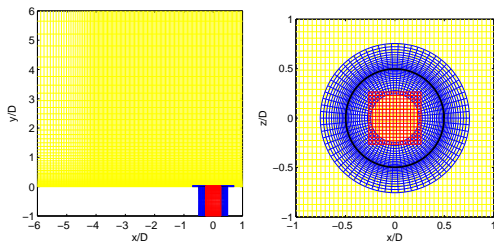
Conclusions sur les méthodes d'entrée turbulente

- ↪ les méthodes de turbulence synthétique induisent un rayonnement parasite trop important
- ↪ les techniques de réintroduction avec mise à l'échelle ne sont pas efficaces à cause des maillages grossiers
- ↪ la transition forcée avec un profil inflexionnel implique une transition rapide vers la turbulence avec un très faible rayonnement

- 1 Introduction
- 2 Méthodes de recouvrement de maillages
- 3 Génération d'une condition d'entrée turbulente
- 4 Rayonnement d'une cavité cylindrique**
- 5 Conclusions et perspectives

Stratégie de recouvrement de maillages

- Maillage cylindrique pour le traitement de la paroi latérale de la cavité
- Maillage cartésien au coeur du maillage cylindrique pour résoudre le problème de singularité à l'axe des équations en cylindrique
- Maillage cartésien au-dessus de la cavité pour la résolution de la couche limite amont et la propagation acoustique
- Les maillages coïncident verticalement permettant l'emploi d'interpolations $2 \times 1D$ optimisées sur des supports 8×8
- Utilisation d'un maillage tampon entre les maillages de cavité et le maillage extérieur permettant de garder des interpolations centrées dans tout le domaine



Paramètres de simulation

Maillages :

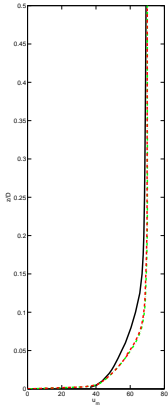
- **Maillage 1** : 15 millions de points,
 $\Delta x_{\min}=3.3$ mm, $\Delta y_{\min}=1.6$ mm et $\Delta z_{\min}=0.26$ mm;
- **Maillage 2** : 22 millions de points,
 $\Delta x_{\min}=1.6$ mm, $\Delta y_{\min}=1.1$ mm and $\Delta z_{\min}=0.2$ mm;
 $\Delta x_{\min}^+=264$, $\Delta y_{\min}^+=181$ et $\Delta z_{\min}^+=33$.

Initialisation des différents calculs :

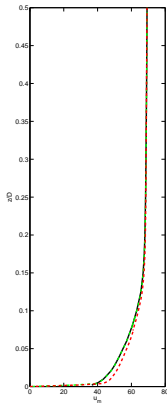
- sans fluctuation turbulente en entrée
 - Calcul sf1**, profil expérimental de couche limite loin devant la cavité ($\delta=15$ mm)
 - Calcul sf2**, profil expérimental de couche limite relevé juste devant la cavité (*non présenté dans le manuscrit*)
- avec fluctuations turbulentes en entrée, profil de Blasius $\delta=10$ mm et un point d'inflexion en 0.25δ
 - Calcul af1** : non convergé à cause d'un bug numérique
 - Calcul af2** : convergé (*non présenté dans le manuscrit*)

Champs moyens (1)

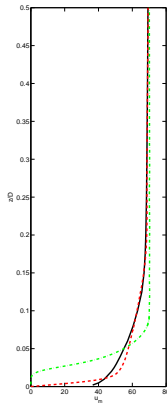
sans fluctuation
calcul sf1



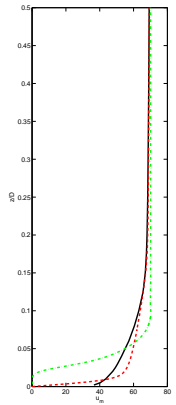
sans fluctuation
calcul sf2



avec fluctuations
calcul af1



avec fluctuations
calcul af2

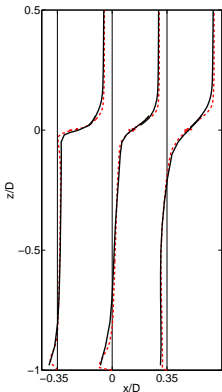


Profils de la vitesse moyenne longitudinale devant la cavité :
campagne expérimentale (—), initialisation du calcul (- · - · -),
calcul numérique en $x/D = -0.55$ (- - -).

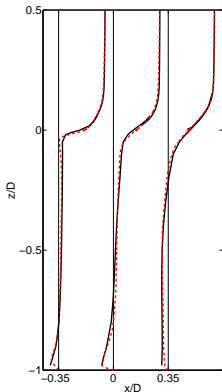
↪ gradient de vitesse expérimental à la paroi différent de celui des calculs avec fluctuations

Champs moyens (2)

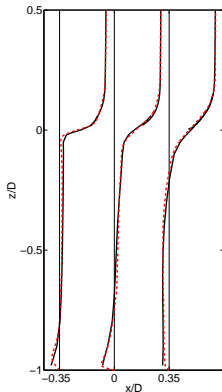
sans fluctuation
calcul sf1



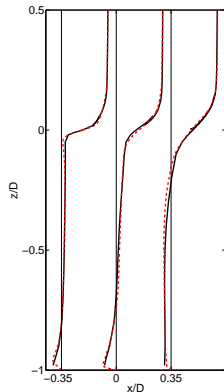
sans fluctuation
calcul sf2



avec fluctuations
calcul af1

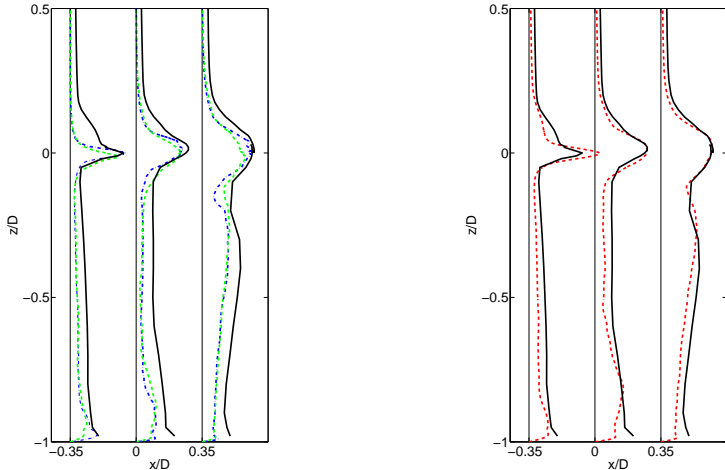


avec fluctuations
calcul af2



Profils de la vitesse moyenne longitudinale au-dessus de la cavité :
expérimentaux (—), numériques (- - -).

Intensités turbulentes U_{rms}



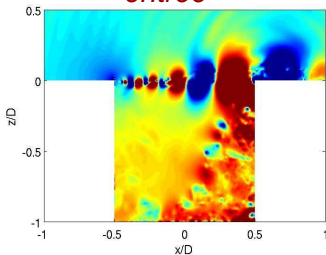
Fluctuations RMS pour les composantes de la vitesse en $x/D = -0.35, 0, 0.35$:

- profils expérimentaux (—), sans fluctuation en entrée **calcul sf1** (- · - ·)
et **calcul sf2** (- - -), avec fluctuations en entrée **calcul af2** (- - -)

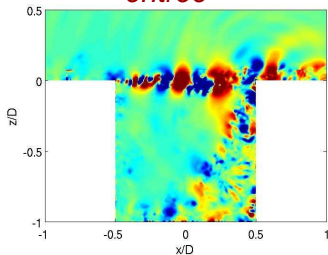
Champs instantanés

Pression fluctuante [± 100 Pa]

*Calcul sans fluctuation en
entrée*



*Calcul avec fluctuations en
entrée*



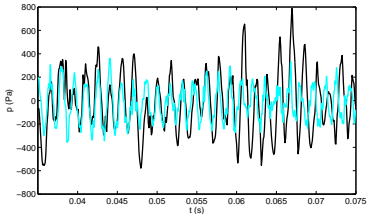
films sur la vorticité

- Tourbillons plus cohérents pour les calculs sans fluctuation
 ↪ interaction collective plus prononcée

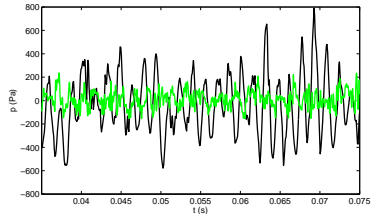
Pression fluctuante sur les parois (1)

Evolution temporelle de la pression fluctuante au centre du fond de la cavité

Sans fluctuation



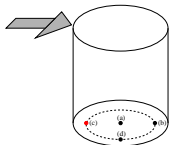
Avec fluctuations



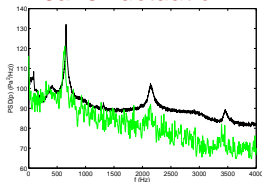
- Oscillations plus turbulentes pour le calcul avec fluctuations

Pression fluctuante sur les parois (2)

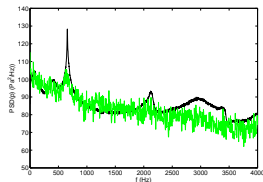
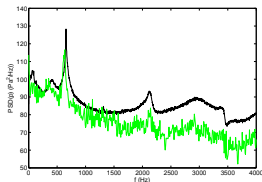
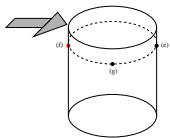
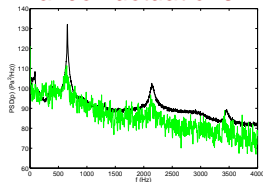
Densités spectrales de la pression sur les parois de la cavité



Calcul sans fluctuation



Calcul avec fluctuations



● Calculs sans fluctuation :

- bruit tonal plus prononcé
- spectres sous-estimés

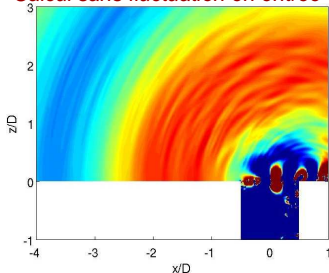
● Calculs avec fluctuations

- spectres plus riches : mécanisme de *turbulent rumble*

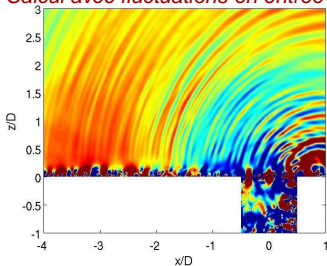
Résultats acoustiques (1)

Pression fluctuante [$p_{\infty} \pm 20$ Pa]

Calcul sans fluctuation en entrée



Calcul avec fluctuations en entrée



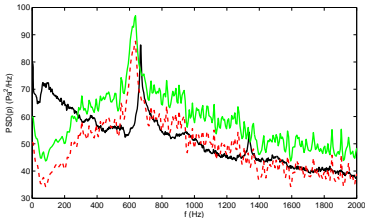
film acoustique

- ↪ rayonnement plus fort à la fréquence principale pour les calculs sans fluctuation
- ↪ acoustique enrichie fréquentiellement pour le calcul avec fluctuations

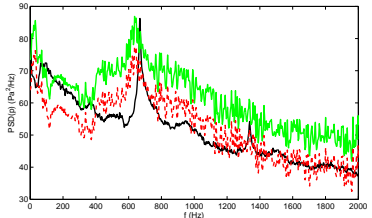
Résultats acoustiques (2)

Spectres acoustiques au-dessus de la cavité pour les calculs

*Calcul
sans fluctuation*



*Calcul
avec fluctuations*



Spectre expérimental à $z = 1D$ (—), numérique (—) à $z = 0.34D$.

Spectre avec mise à l'échelle en $1/r$ (---).

Conclusions sur l'étude de la cavité cylindrique

- *Calculs sans fluctuation* :
 - + meilleure estimation du pic acoustique pour les calculs sans fluctuation
 - + imposition du cisaillement correct à la paroi
 - sous-estimation globale des fluctuations turbulentes
- *Calculs avec fluctuations* :
 - + mécanisme de *turbulent rumble* observé
 - + meilleure estimation du spectre acoustique en haute fréquence
 - sous-estimation du pic acoustique

- 1 Introduction
- 2 Méthodes de recouvrement de maillages
- 3 Génération d'une condition d'entrée turbulente
- 4 Rayonnement d'une cavité cylindrique
- 5 Conclusions et perspectives**

Conclusions générales

- 1 Un code de calcul direct de bruit avec une méthode de recouvrement de maillages a été développé
 - possibilité d'avoir une résolubilité des interpolations inférieure à celle des autres schémas
- 2 Une étude de conditions d'entrée turbulente a été menée
 - ↪ une transition forcée avec un profil inflexionnel perturbé constitue une solution efficace et peu bruyante
- 3 Des calculs directs de bruit au-dessus d'une cavité cylindrique ont été réalisés :
 - rayonnement acoustique correctement prédit
 - importance du profil devant la cavité
 - fluctuations turbulentes amont modifient les oscillations auto-entretenues de l'écoulement

Perspectives

- Utilisation du recouvrement de maillages pour des géométries complexes (ex : interaction entre une rafale et une grille d'aubes)
- Étude plus approfondie de la méthode de transition forcée vers la turbulence par un profil inflexionnel
- Étude approfondie de la dynamique d'un écoulement au-dessus de la cavité cylindrique et de son rayonnement associé :
 - décomposition en modes de Fourier ou de Koopman de l'écoulement au-dessus de la cavité
 - étude de la réponse acoustique de la cavité seule (ex : modèle de Tam JSV 1976) ou en réaction à la dynamique de la couche de mélange (ex : Elder 1978)
 - étude du phénomène de battement pour des cavités moins profondes