



Etude du haut-parleur aux forts déplacements. Application à l'optimisation des tuyères acoustiques.



Thèse soutenue le
20 novembre 2006
au LAM (UPMC)
Directeur de thèse : J.-D. Polack

Club CAST3M 2007 - Guillaume PELLERIN

Montrouge, le 30 novembre 2007

guillaume.pellerin@cnam.fr



Introduction

La source sonore idéale : $s_{ray}(r, t) = a(r) \cdot s_e(t)$ ($r \in \mathbb{R}^3$ et $a(r) \in \mathbb{R}$)

- **module de la réponse fréquentielle constant**
- **phase de la réponse fréquentielle nulle**

Facteurs non-linéaires limitants :

- **magnétique**
- **mécanique**
- **acoustique** (diffusion, instabilités dynamiques)
- **aérodynamique** (convection, vortex, turbulence)

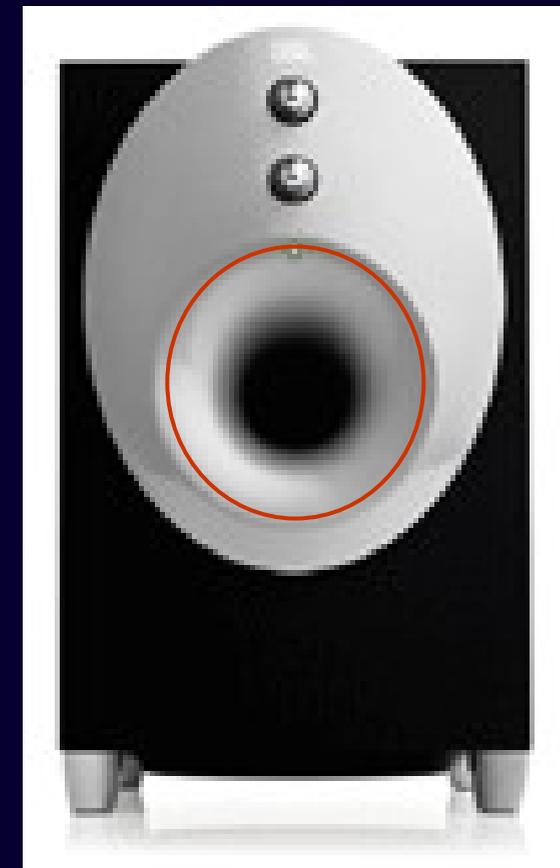
⇒ **Recherche d'un principe d'optimisation et de nouveaux modèles**

Plan

- I. Outils de description et limitations des enceintes « bass-reflex »
- II. Les tuyères acoustiques
- (III. Caractérisation expérimentale)
- IV. Simulation numérique
- V. Conclusion et perspectives

I. Outils de description et limitations des enceintes « bass-reflex »

Enceinte à évent passif : « bass-reflex »

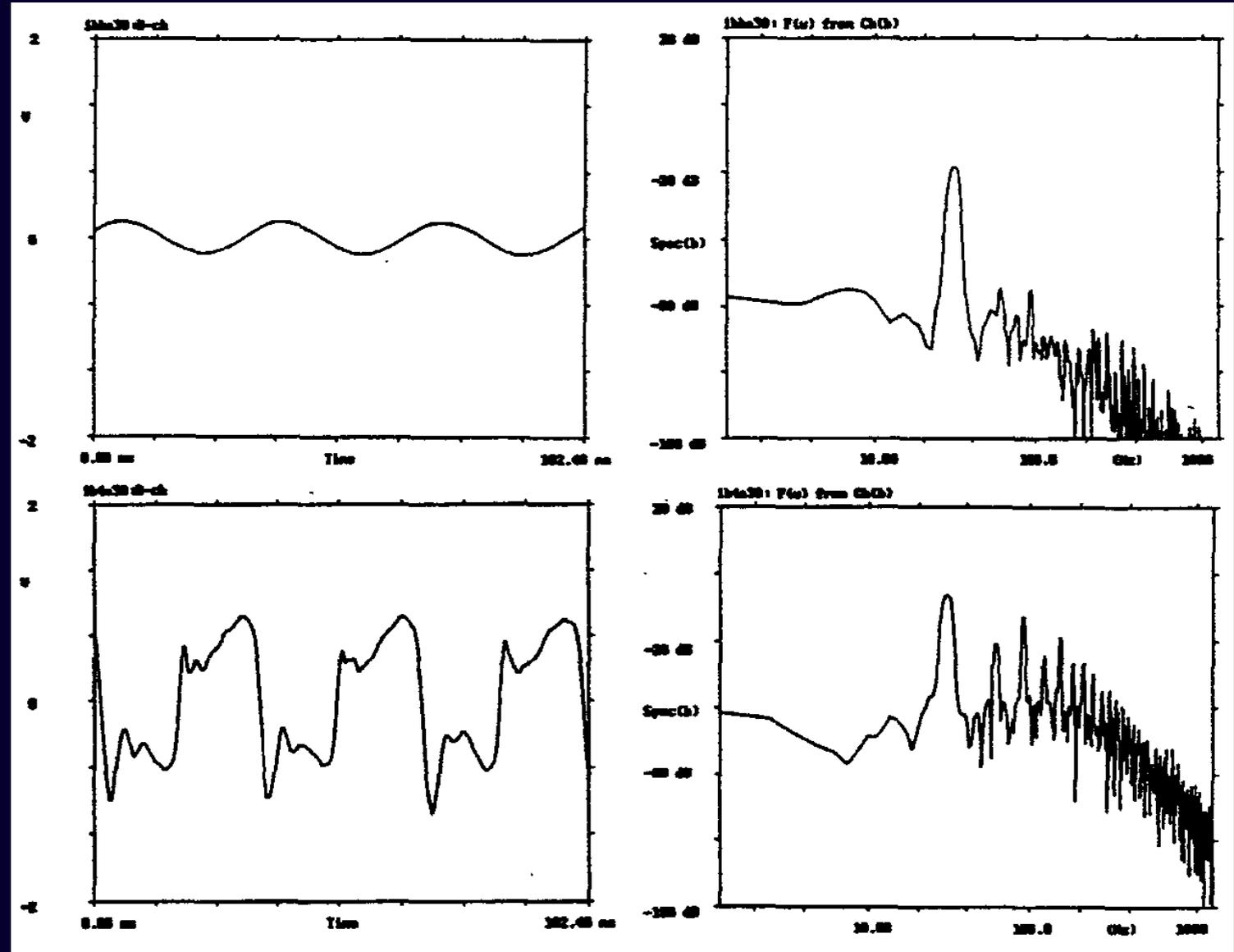
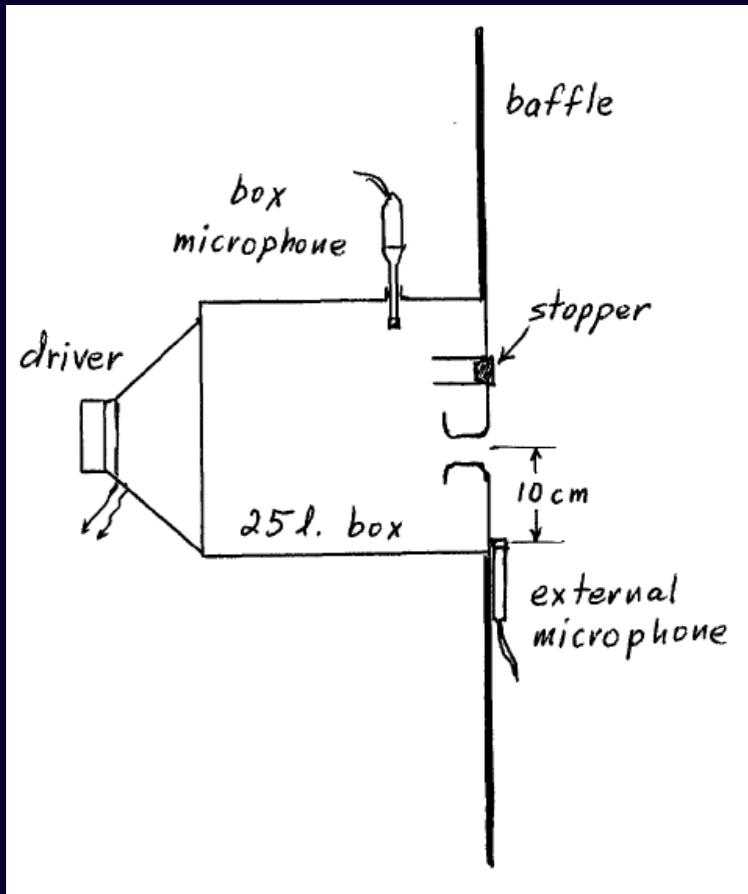


$$M_{ap} = \frac{\rho_0}{\pi r_p^2} (L_p + 1.426r_p)$$

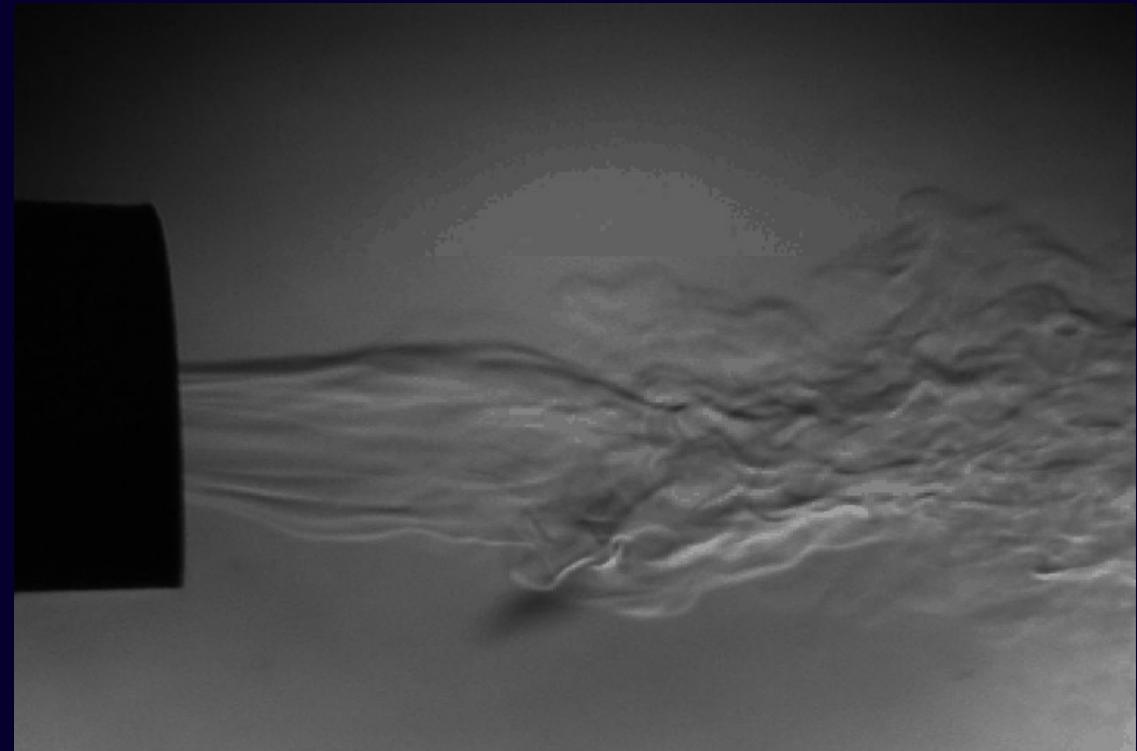
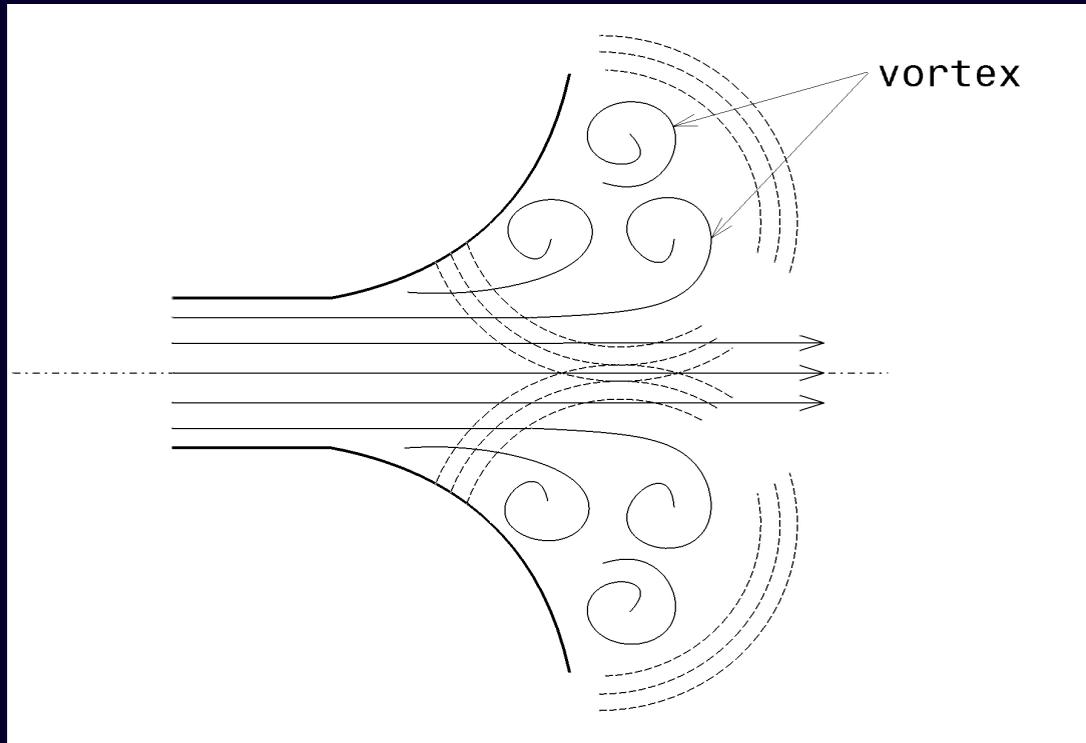
$$f_H = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S_p}{V_{ab}L_p}}$$

I. Outils de description et limitations des enceintes « bass-reflex »

Distorsions générées par un événement classique



(d'après [Vanderkooy, 1997])

I. Outils de description et limitations des enceintes « bass-reflex »**Décollement du flux d'air pour un événement classique**

[jouer la vidéo](#)

- ⇒ bruits de vortex
- ⇒ perturbation de l'écoulement dans le canal

Écoulement en sortie d'un évent cylindrique
 $D = 30 \text{ cm}$, $V_{\text{int}} = 7.8 \text{ L}$, $f = 48.1 \text{ Hz}$

I. Outils de description et limitations des enceintes « bass-reflex »

Equations de la mécanique des fluides

Dérivée convective :

$$\partial'_t a = \partial_t a + (\vec{v} \cdot \vec{\nabla}) a$$

Conservation de la masse :

$$\partial'_t \rho + \rho (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) = 0$$

Quantité de mouvement :

$$\rho \partial'_t \vec{v} + \vec{\nabla} p = \left(\eta + \frac{4}{3} \mu \right) \vec{\nabla} (\vec{\nabla} \cdot \vec{v}) - \mu \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times \vec{v}) + \rho \vec{F}$$

(Navier-Stokes)

Equation d'énergie :

$$\rho T \partial'_t s = \left(\eta + \frac{4}{3} \mu \right) (\vec{\nabla} \cdot \vec{v})^2 + \mu \left\| \vec{\nabla} \times \vec{v} \right\|^2 + \lambda \Delta T + \rho T \dot{\sigma}$$

Equations d'état :

$$dp = P_T dT + P_\rho d\rho$$

$$ds = S_T dT + S_\rho d\rho$$

⇒ Effets non-linéaires en acoustique :

$$\begin{aligned} \partial_t \rho_2 + \vec{\nabla} \cdot \vec{v}_2 &= -\vec{\nabla} \cdot (\rho_1 \vec{v}_1), \\ \partial_t \vec{v}_2 + \vec{\nabla} \rho_2 &= \frac{1}{2} \partial_\rho^2 p|_{ss} \vec{\nabla} \rho_1^2 - \rho_1 \partial_t \vec{v}_1 - \frac{1}{2} \vec{\nabla} |v_1|^2, \\ \partial_t s_2 &= 0 ; \vec{\nabla} \times \vec{v}_2 = 0. \end{aligned}$$

I. Outils de description et limitations des enceintes « bass-reflex »

Equations de l'aéroacoustique

Analogie de Lighthill :

$$\frac{\partial^2 \rho'}{\partial t^2} - c_0^{-2} \Delta \rho' = \frac{\partial^2 T_{ij}(v)}{\partial x_i \partial x_j}$$

avec

$$T_{ij}(v) = \rho v_i v_j + \delta_{ij} [p - c_0^2 \rho'] - \tau_{ij}$$

Approximation: terme prépondérant

$$T_{ij}(v) \approx \rho v_i v_j \approx \rho_0 v_i v_j$$

Directivité des sources [Dowling et Hynes, 2004]

• Equation de Howe :

$$\frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 B}{\partial t^2} - \nabla^2 B = \text{div}(\omega \times u)$$

où

$$B \equiv \frac{p}{\rho_0} + \frac{1}{2} u^2$$

(pour des flux à grand nombre de Reynolds, faible nombre de Mach)

d'où

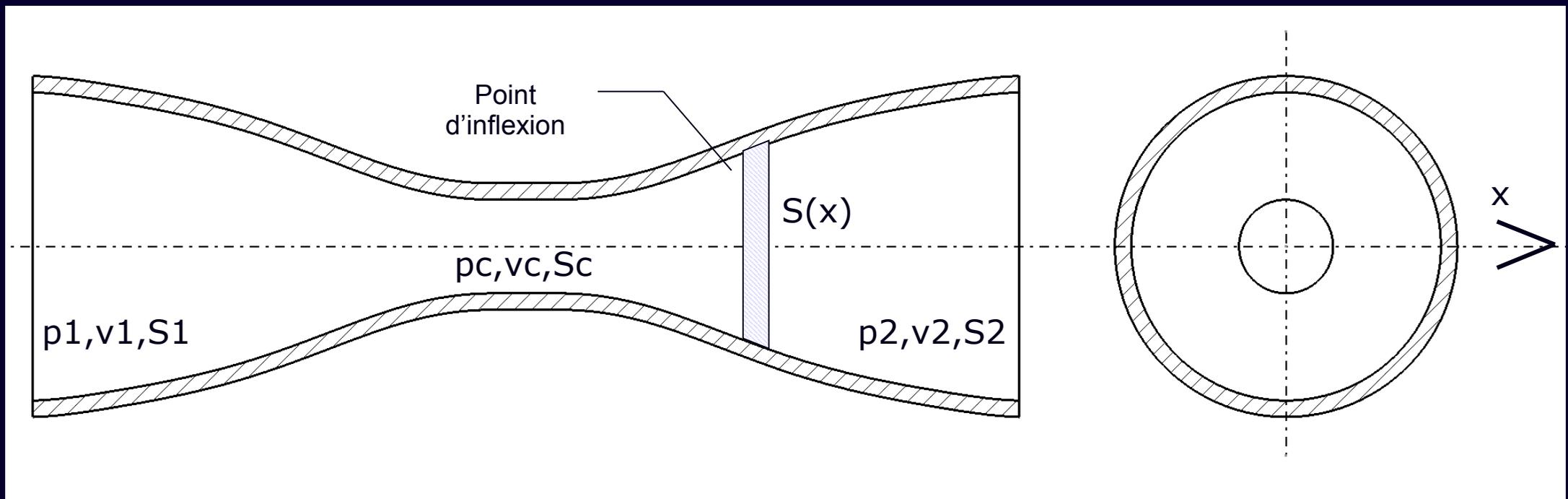
$$\mathcal{P} = - \iiint_V \rho_0 \langle (\omega \times v) \cdot u_a \rangle dv$$

avec

$$\vec{\omega} = \vec{\nabla} \times \vec{u}$$

II. Les tuyères acoustiques

- Limiter les pertes d'énergie cinétique turbulente
- Eviter les court-circuits acoustiques en modifiant l'alignement des sources



Exemple d'un profil de « tuyère acoustique »
(Brevet n° 01 06379 J.P. Morkerken / UPMC)

⇒ **Amélioration du rendement**

II. Les tuyères acoustiques**Les sources « planes » (L01c, L01t et L02)**

(c) 2004 Guillaume Pellerin

Prototype L01t à 2 tuyères T01

$$V_{ab} = 0,008 \text{ m}^3$$

Fréquence d'accord: 56 Hz

II. Les tuyères acoustiques

Les sources « planes » (L01c, L01t et L02)

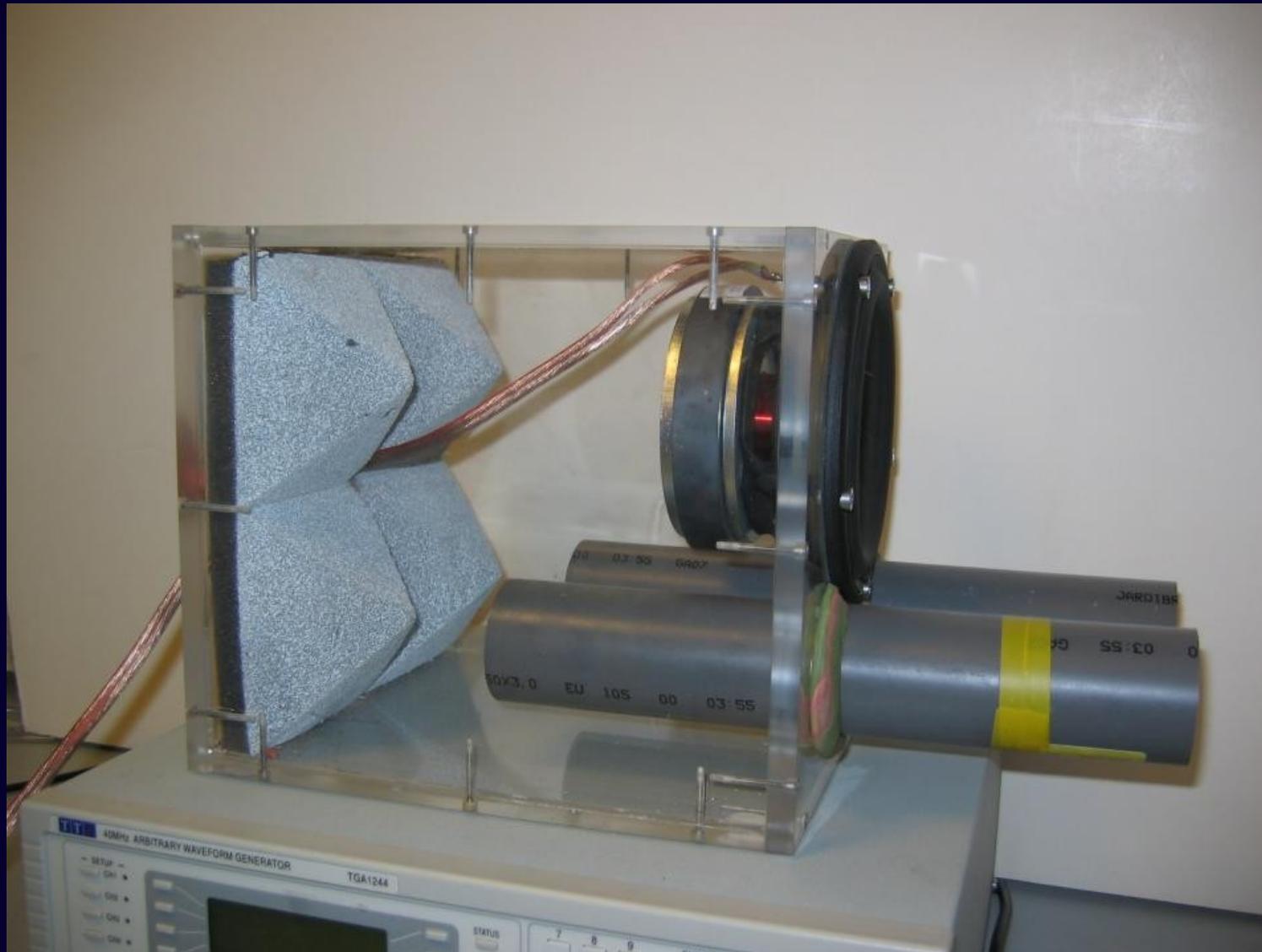


(c) 2004 Guillaume Pellerin

Prototype L02 à 2 tuyères T01

$$V_{ab} = 0,008 \text{ m}^3$$

Fréquence d'accord: 56 Hz

II. Les tuyères acoustiques**Les sources « planes » (L01c, L01t et L02)****Prototype L01c à 2 cylindres**

$V_{ab} = 0,008 \text{ m}^3$, $L_p = 0,265 \text{ m}$, $d = 0,043 \text{ m}$

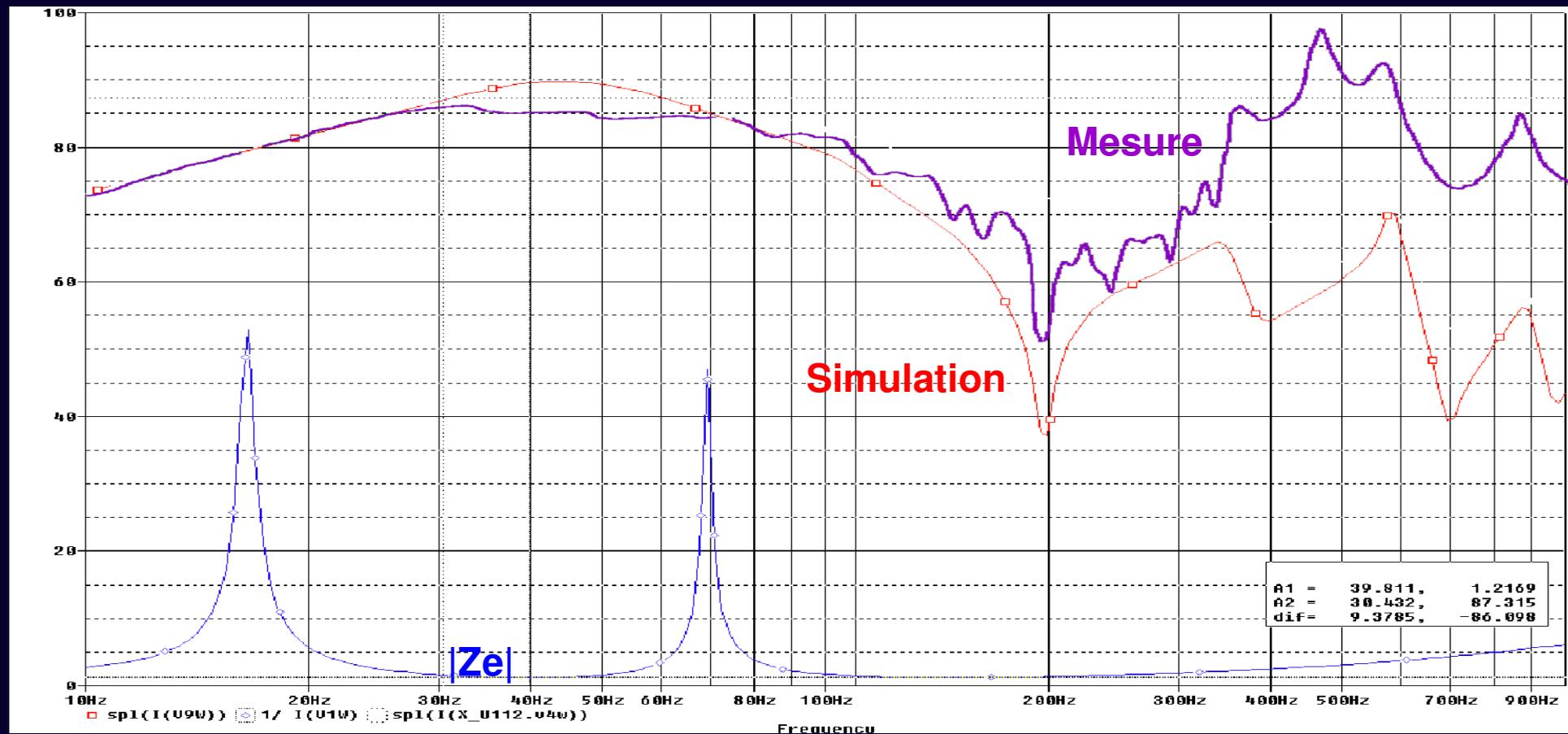
Fréquence d'accord: 56 Hz

II. Les tuyères acoustiques

Les sources longitudinales dipolaires (B01, B02c et B02t)



Prototype B02 (tuyère T02), $V_{ab} = 0,017 \text{ m}^3$, $F_h = 37 \text{ Hz}$



Plan

- I. Outils de description et limitations des enceintes « bass-reflex »
- II. Les tuyères acoustiques
- III. Caractérisation expérimentale**
 - Directivité
 - Champ proche
 - Champ interne
- IV. Simulation numérique
- V. Conclusion et perspectives

III. Caractérisation expérimentale

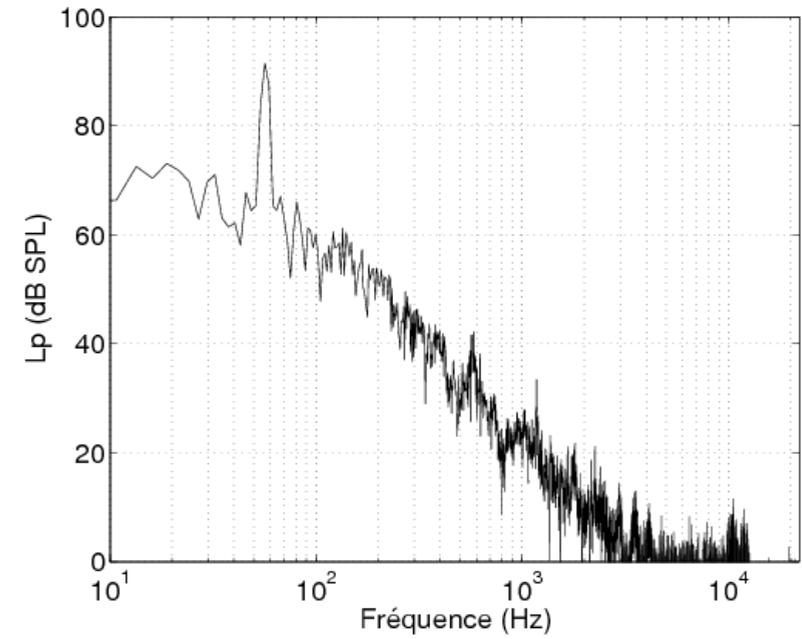
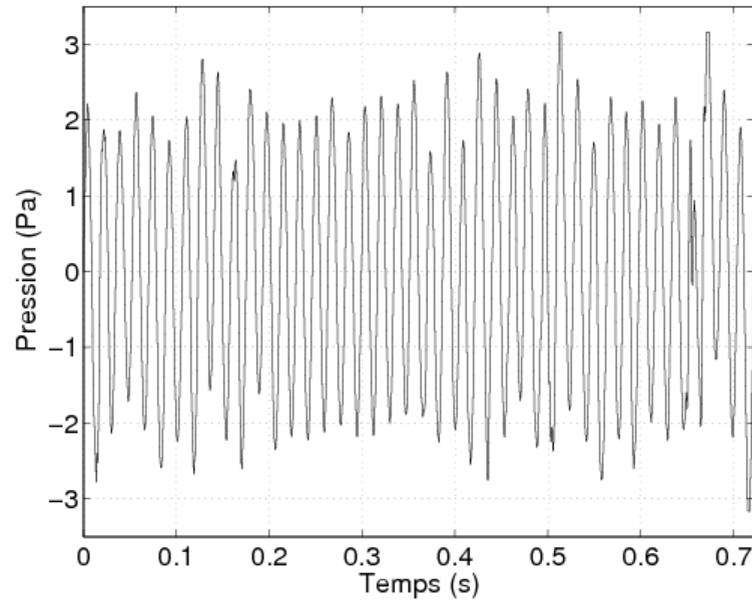
Pression externe en régime permanent (L01c et L01t)

a) L01c



$P_{eff} = 9\text{ W}$
($f = 56.5\text{ Hz}$)

THD = 1.8 %

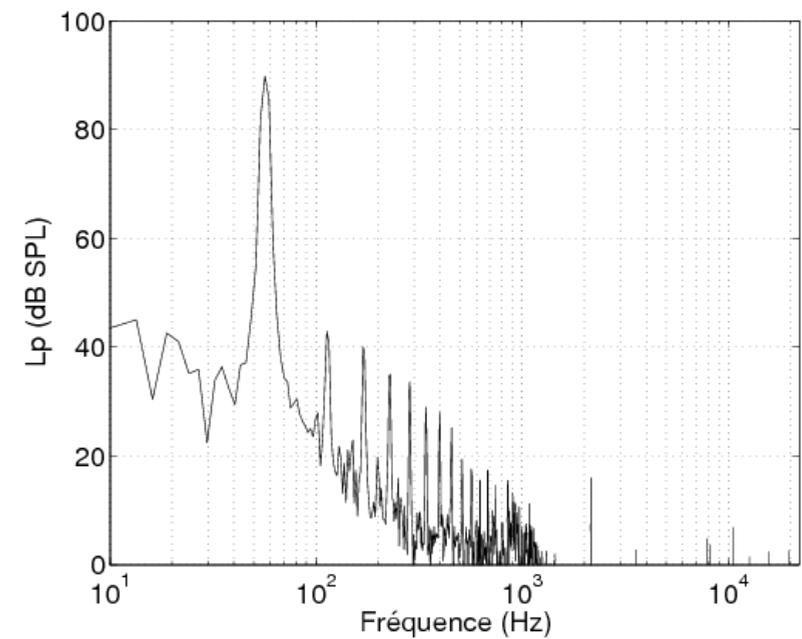
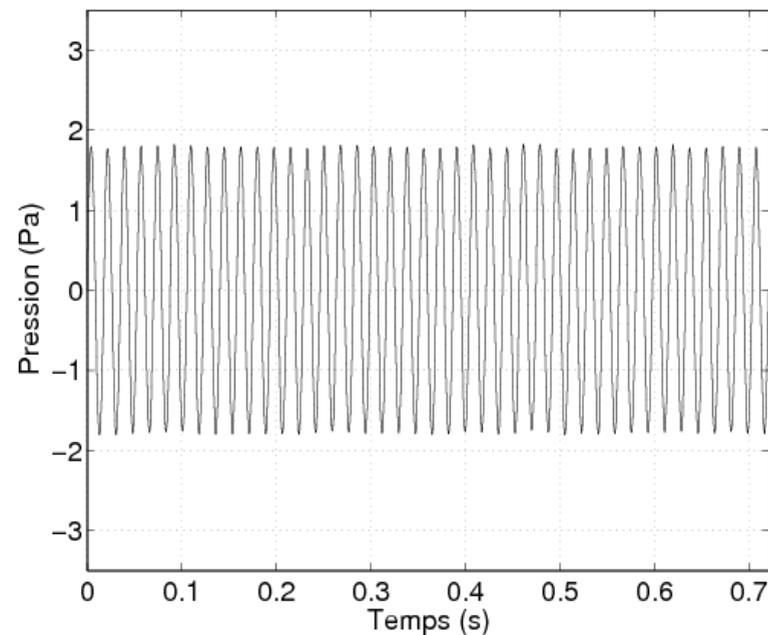


b) L01t



$P_{eff} = 9\text{ W}$
($f = 56.5\text{ Hz}$)

THD = 0.1 %



III. Caractérisation expérimentale

Pressions pariétales (B01)

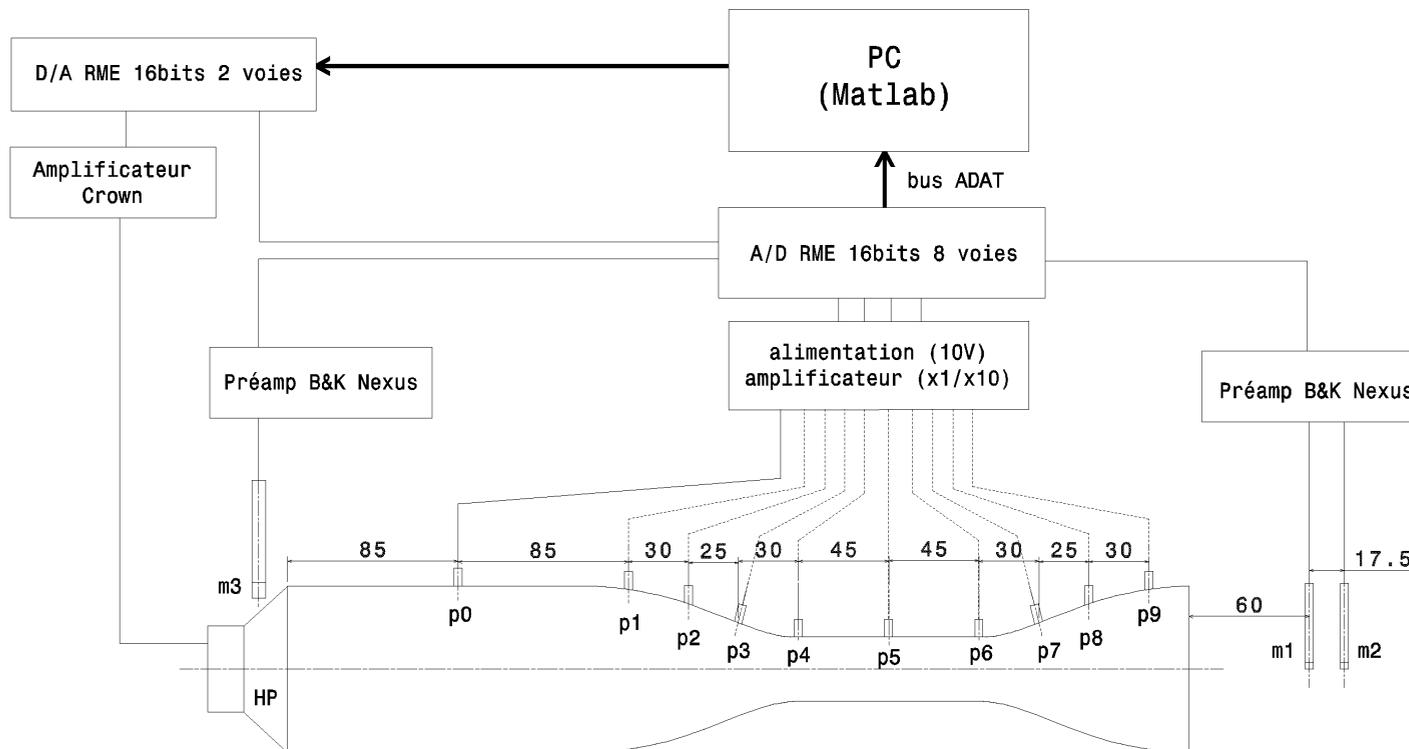


Fréquences étudiées

F1 = 49 Hz
 Fh = 107 Hz
 F2 = 191 Hz

Tensions électriques

$0,55 < U_e < 8,12 \text{ V}$



III. Caractérisation expérimentale

Vitesse en sortie d'évent (L01t)



Plan

- I. Outils de description et limitations des enceintes "bass-reflex"
- II. Les tuyères acoustiques
- III. Caractérisation expérimentale
- IV. Simulation numérique**
 - Principe
 - Résultats
 - Optimisation de la géométrie
- V. Conclusion et perspectives

IV. Simulation numérique – Logiciel CASTAX

Equation discrétisée :

$$\rho \frac{\partial v}{\partial t} + \rho \vec{v} \cdot \vec{\nabla} \vec{v} + \vec{\nabla} p = \mu \vec{\nabla} \times (\vec{\nabla} \times v)$$

Méthode :

- DNS instationnaire incompressible VF 2D axisymétrique
- Opérateur convection / diffusion / source (Cast3M)

3 paramètres :

- Fréquence (f_1, f_H, f_2)
- Vitesse
- Profil

Propriété du schéma de résolution :

- Implicite, décentré (Galerkin) pour la vitesse, centré pour la pression
- Ordre 2 en temps, ordre 3 en espace
- CL : sinus en vitesse à l'entrée du conduit

IV. Simulation numérique

CASTAX

- Définition : Interface de contrôle de Cast3M pour la résolution de l'équation de Navier-Stokes instationnaire pour des géométries de conduits axisymétriques
- Logiciel libre : Licence CeCILL (CEA, CNRS, INRIA)
- Dépendances : Cast3M, bash, python, sed ($\geq 4.0.3$), ImageMagick ($\geq 5.5.4$), pselect, ppmtompeg (avec libpbm de netpbm ≥ 9.24), gawk
- Contributeurs : Stéphane GOUNAND (CEA/DEN/DM2S/SFME/LTMF)
Nicolas QUAEGEBEUR (ENSTA)
Pierre-Yves LAGRÉ (UPMC/LMM)
Frederic DABBENE (CEA/SAC/DM2S/SFME/LTMF)
- Site Web : <http://svn.parisson.org/castax/>
- Dépôt Subversion : svn co <https://svn.parisson.org/svn/castax/>

IV. Simulation numérique

Construction du schéma NS instationnaire :

```

*****
rv = 'EQEX' $mt 'NITER' nitnlin 'ITMA' 1 'OMEGA' omeg
      'OPTI' 'EF' 'IMPL' dcent discp
      'ZONE' $mt 'OPER' RESIDU 1 IRESU
      'ZONE' $mt 'OPER' 'NS' nu 'INCO' 'UN'
      'OPTI' 'EF' 'IMPL' dcent discp
      'ZONE' $mt 'OPER' 'KBBT' (1.0 '/' rho) (-1.0) 'INCO' 'UN' 'PN'
      'ZONE' $sortie 'OPER' 'TOIM' tos 'INCO' 'UN'
      'OPTI' 'EF' 'IMPL' dcent discp
      'ZONE' $mt 'OPER' 'DFDT' 1. 'UN' pdt 'UN' 0.8 'INCO' 'UN';

```

Procédures externes :

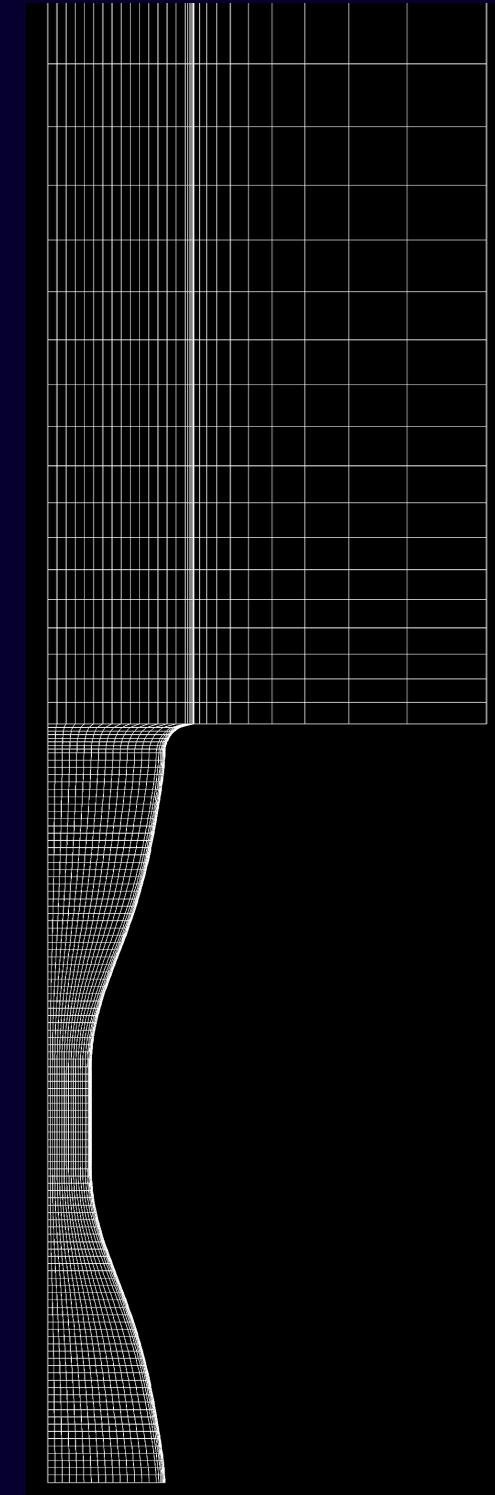
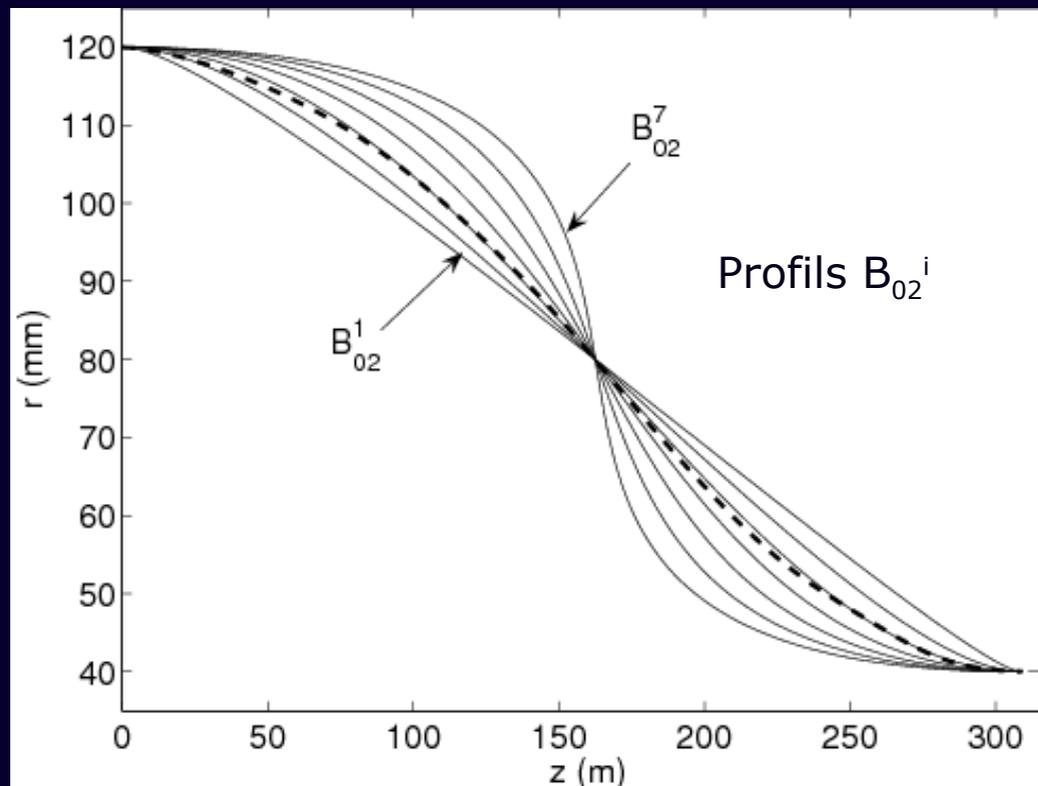
APPEND.dgibi	ES.dgibi	FREQ.dgibi	ISELECT.dgibi
PROFIL.dgibi	RESIDU.dgibi	TRCHPO.dgibi	VLIM.dgibi
VPRCOU.dgibi	COURANT.dgibi	FORMAR.dgibi	HOWE.dgibi
LOG10.dgibi	RENP.dgibi	TRAX.dgibi	UMAX.dgibi
XPORTPS.dgibi	XPLORVPR.dgibi		

IV. Simulation numérique

Paramétrisation du profil / Maillage

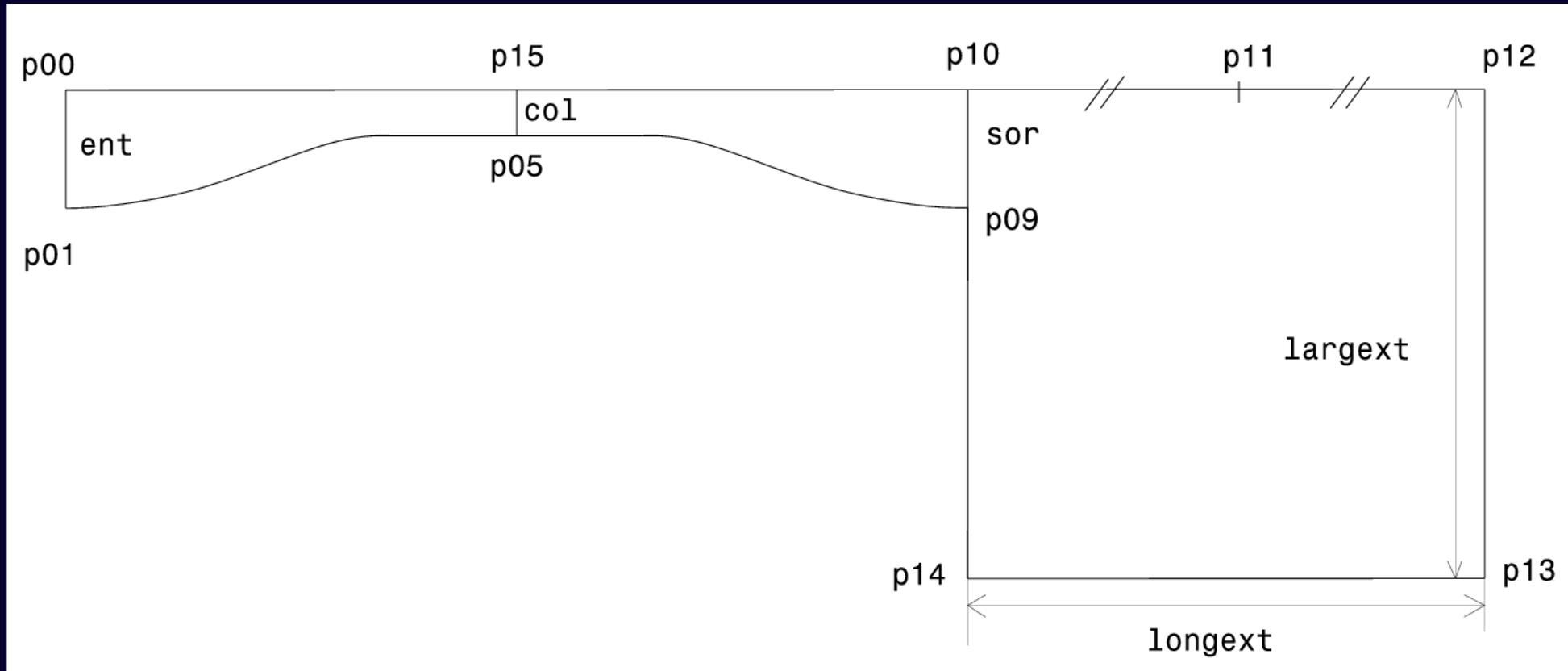
Courbe de Bézier du 3e degré :

Courbe (T01)	θ_i (deg)	Courbe (T02)	θ_i (deg)
B_{01}^1	16,03	B_{02}^1	16,3
B_{01}^3	21,73	B_{02}^3	22,38
B_{01}^5	23,37	B_{02}^5	34,83
B_{01}^8	30	B_{02}^6	46,73
B_{01}^{12}	41,04	B_{02}^7	65,98



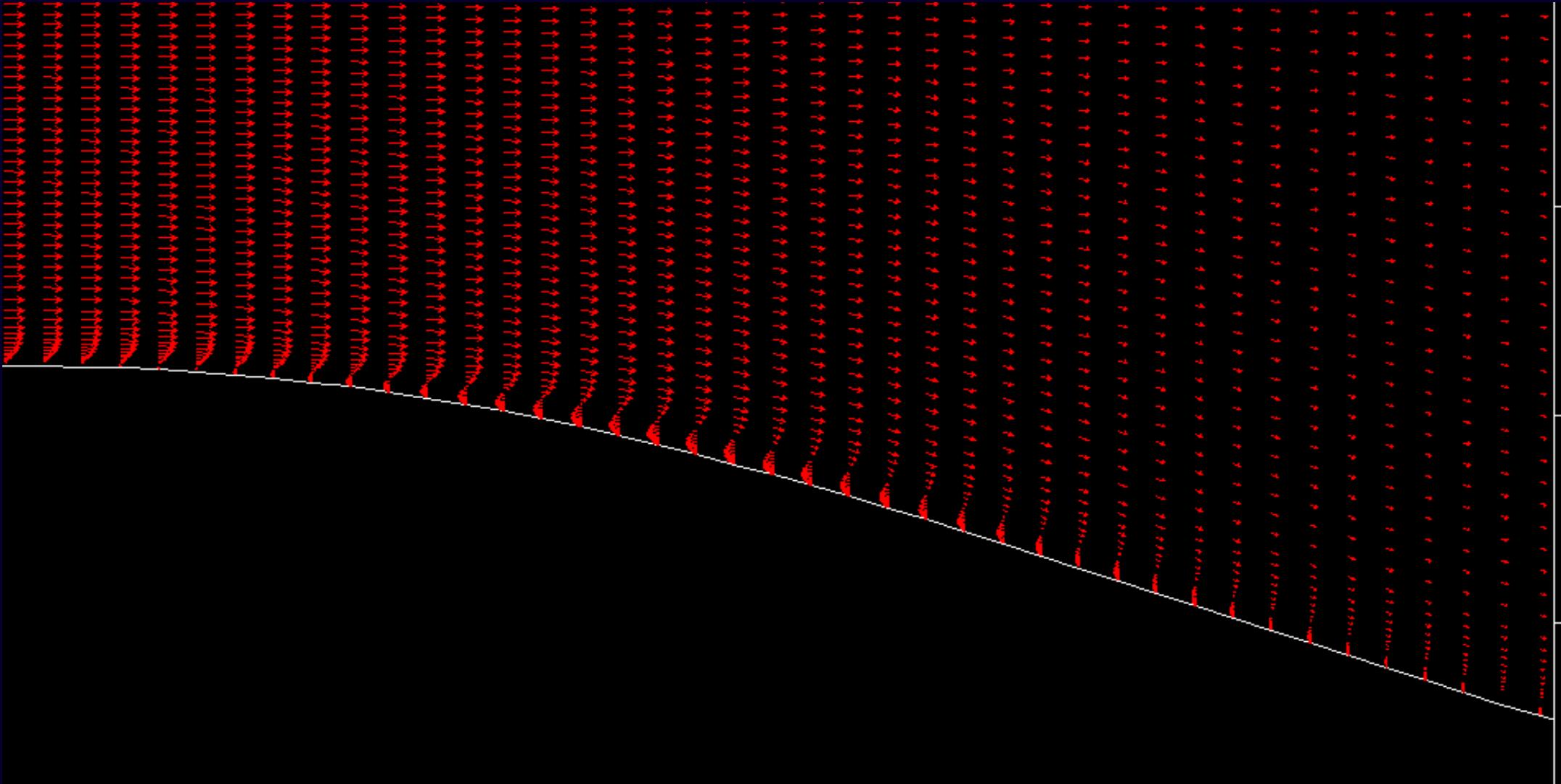
IV. Simulation numérique

Conditions aux limites

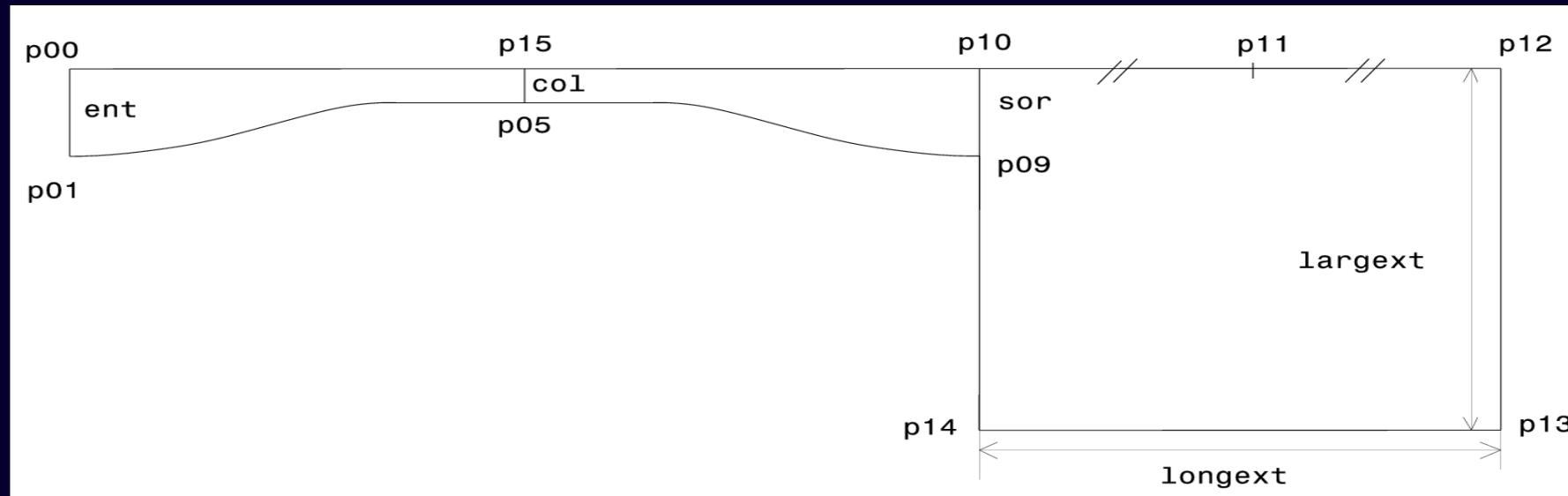
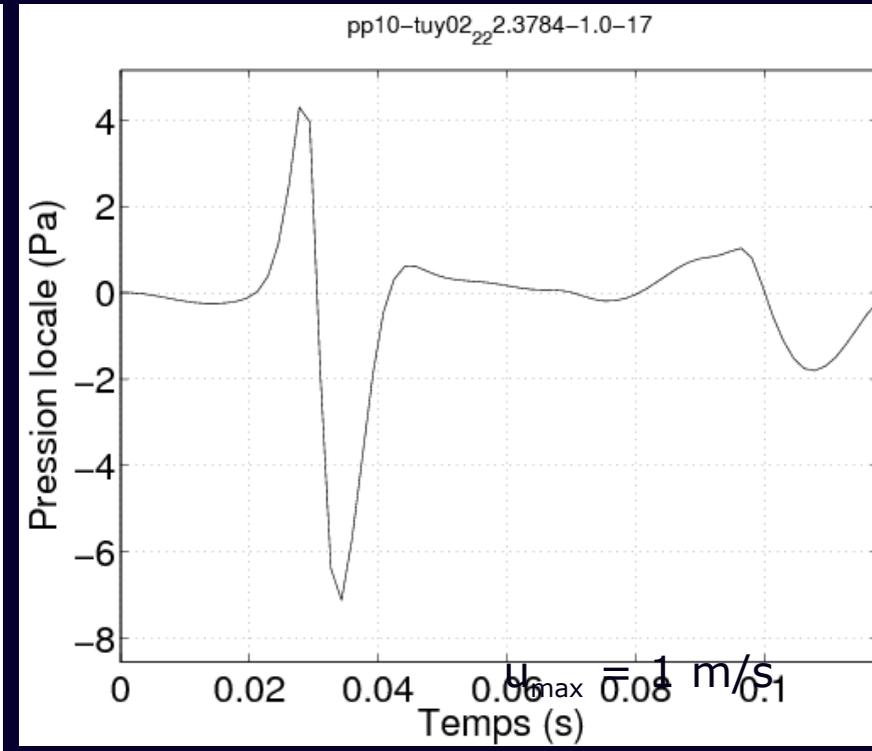
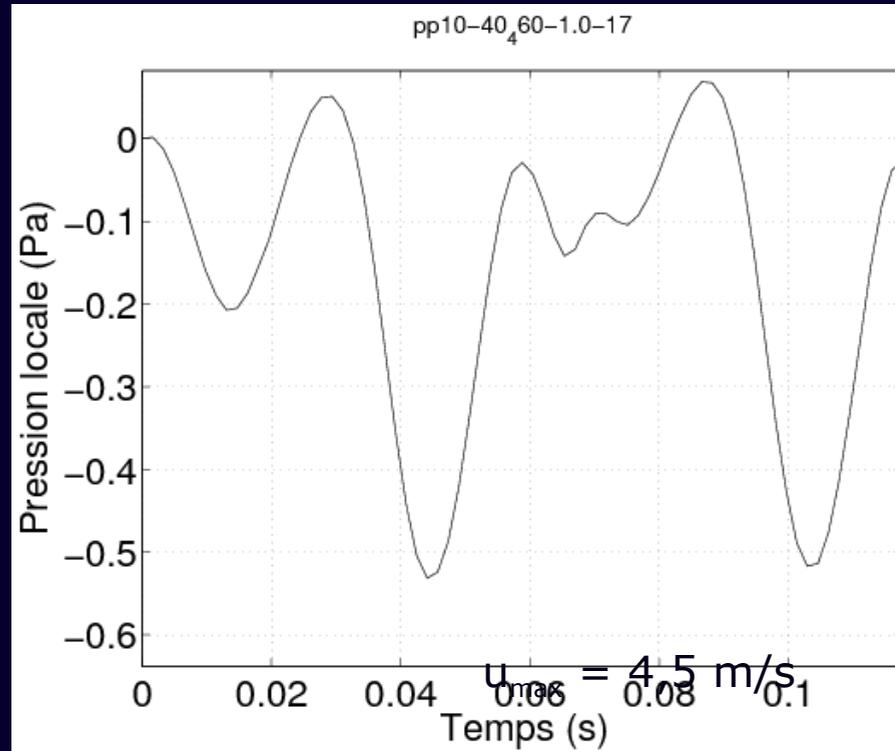


IV. Simulation numérique

Champ de vitesse dans la partie divergente

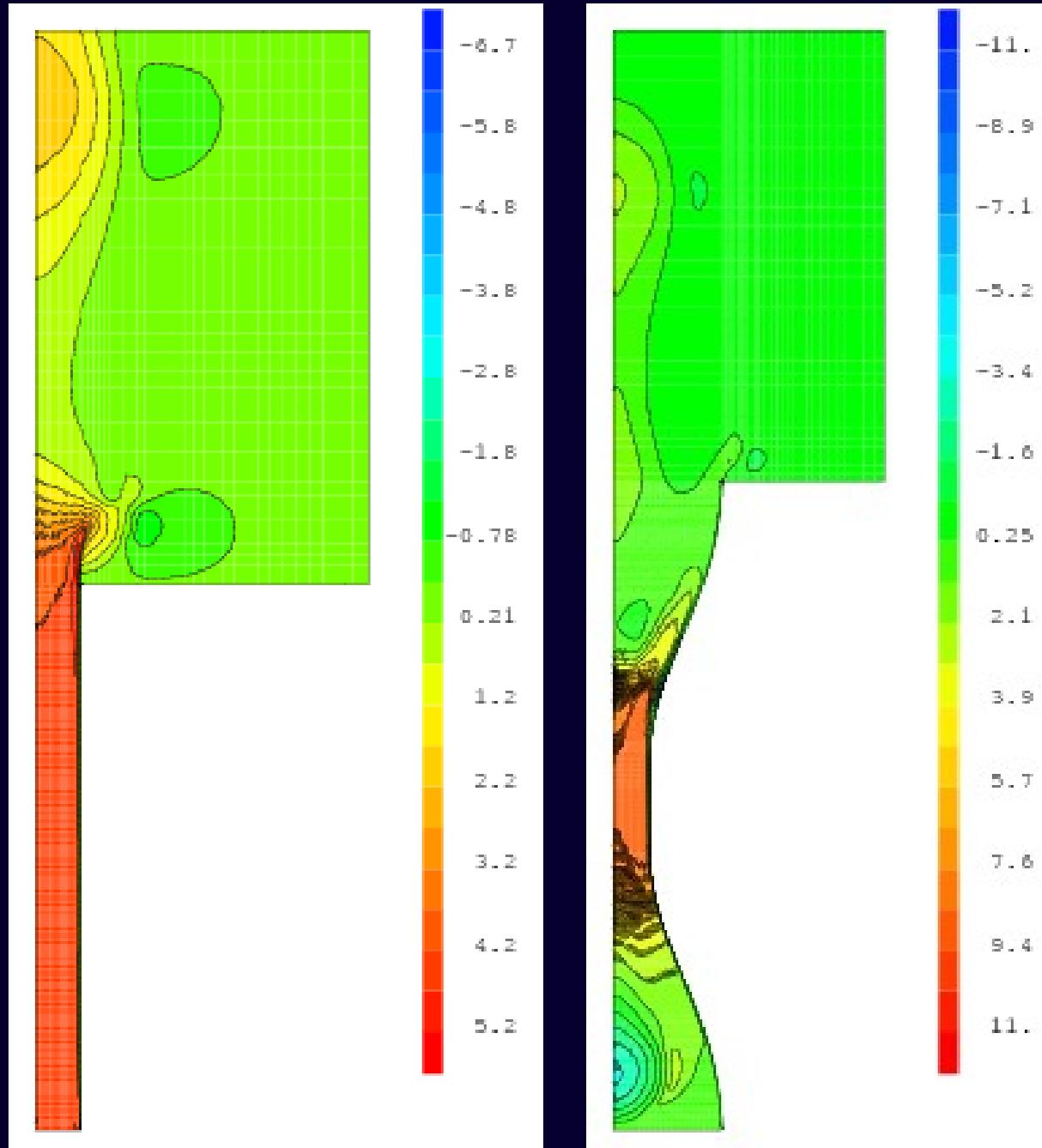


IV. Simulation numérique

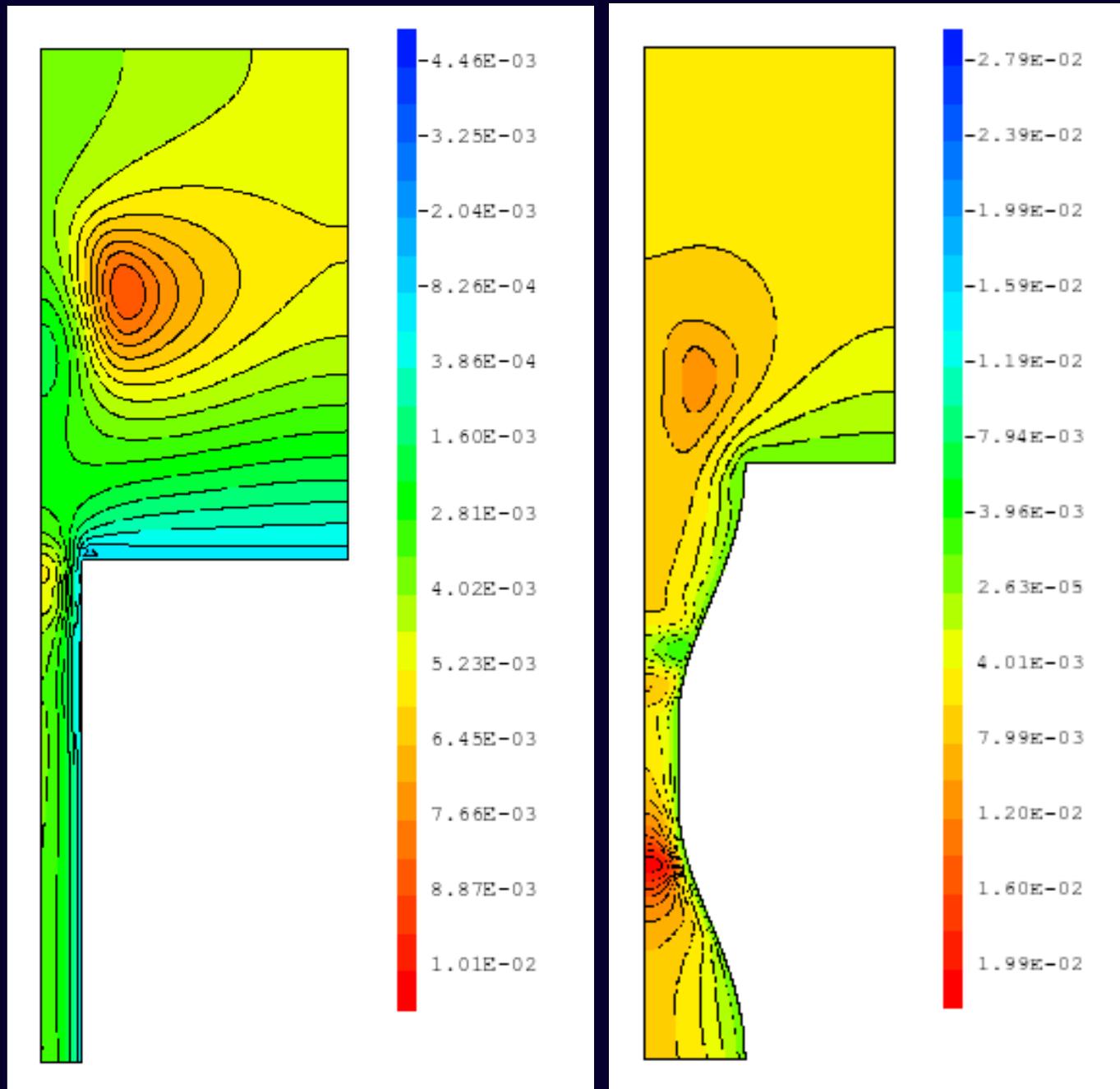
Pression en sortie – $f = 17$ Hz

$$f_e = 612 \text{ Hz}, \text{ Re} = 24000$$

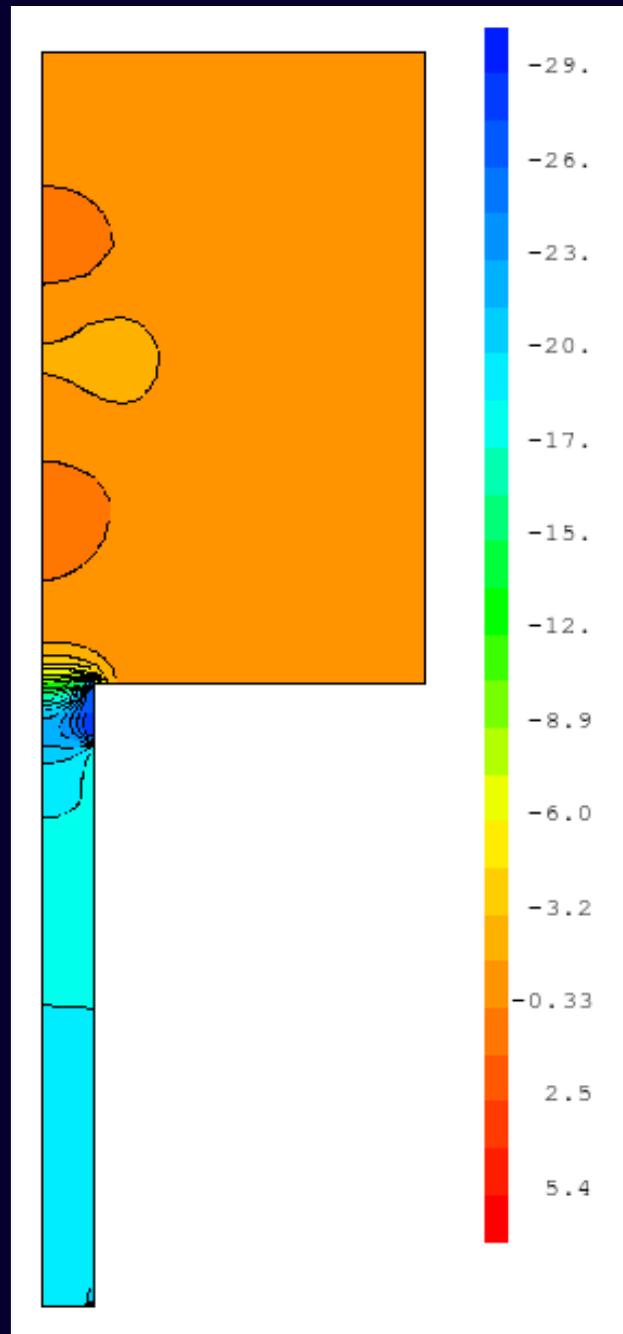
IV. Simulation numérique

Champ de vitesse axiale – $C_{01} / B_{02}^3 - f = 17 \text{ Hz}$ [jouer la vidéo](#)[jouer la vidéo](#)

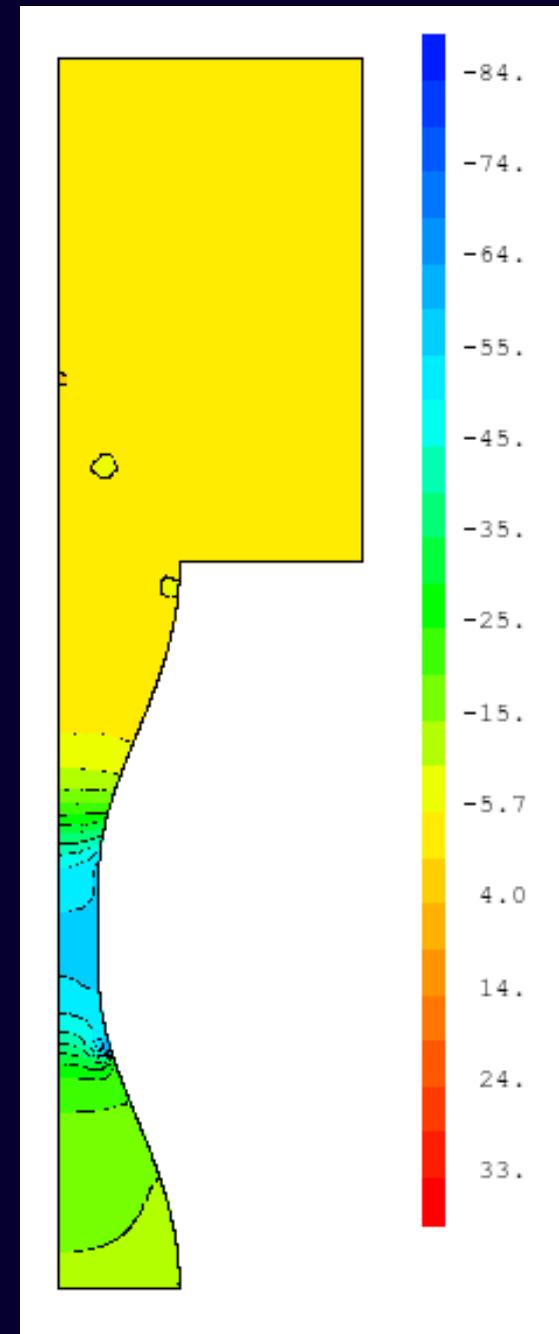
IV. Simulation numérique

Lignes de flux – $C_{01} / B_{02}^3 - f = 17 \text{ Hz}$ [jouer la vidéo](#)[jouer la vidéo](#)

IV. Simulation numérique

Champ de pression – $C_{01} / B_{02}^3 - f = 17 \text{ Hz}$ 

[jouer la vidéo](#)

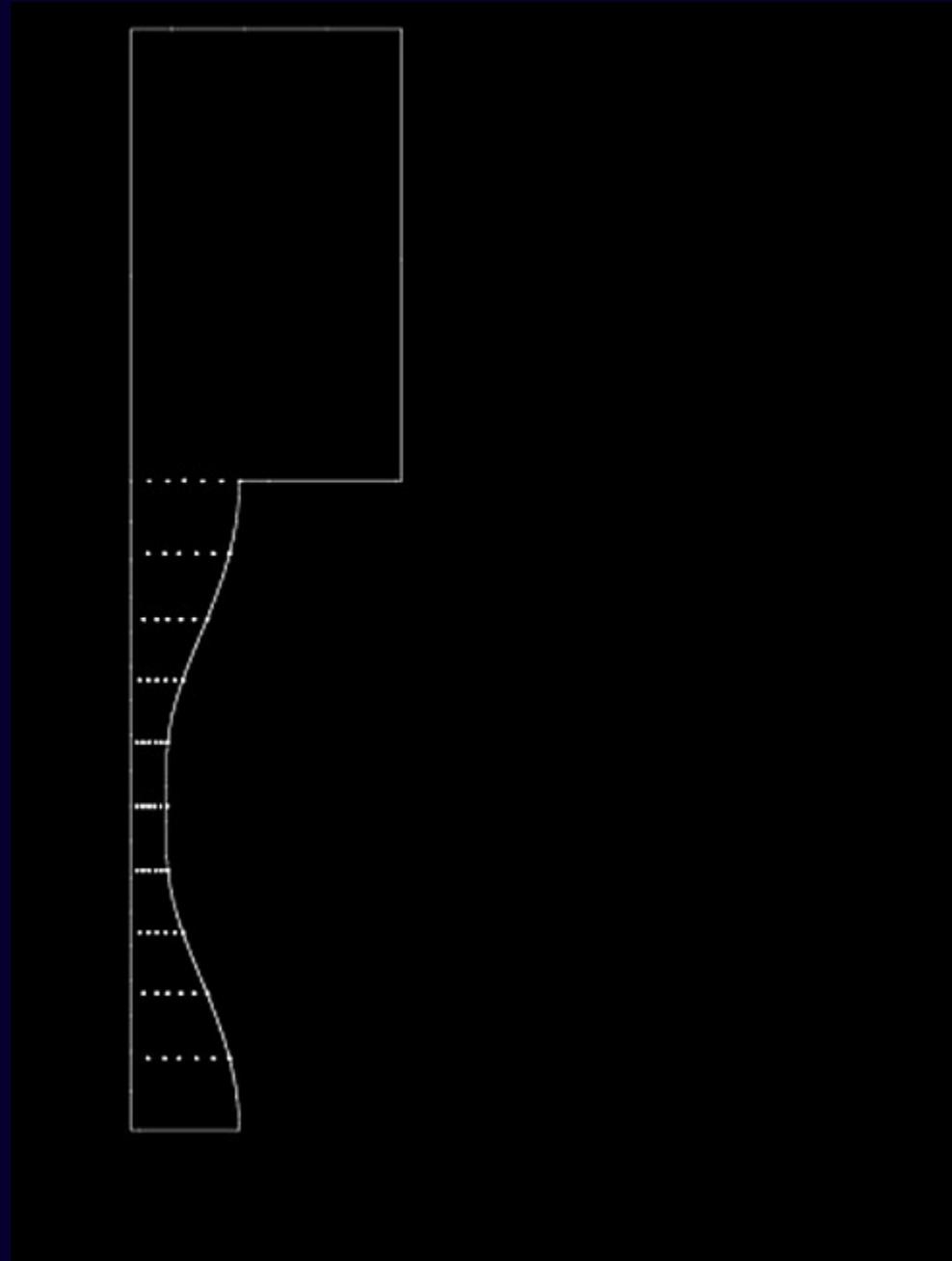


[jouer la vidéo](#)

IV. Simulation numérique

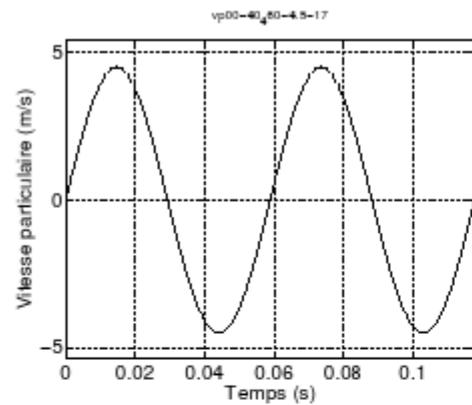
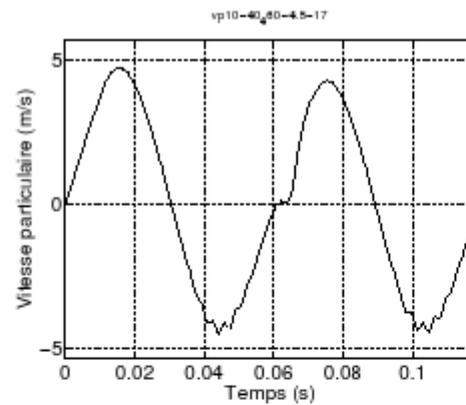
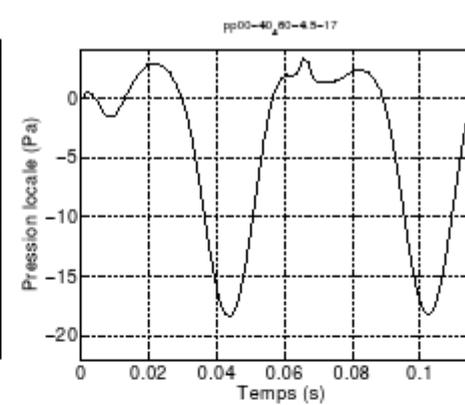
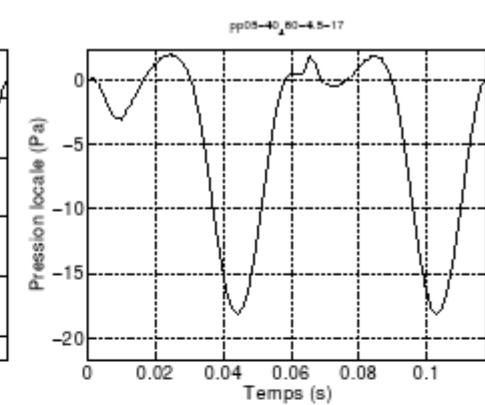
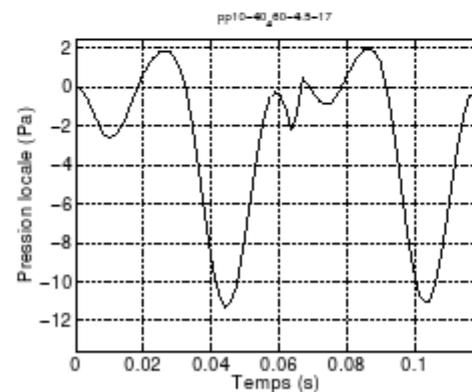
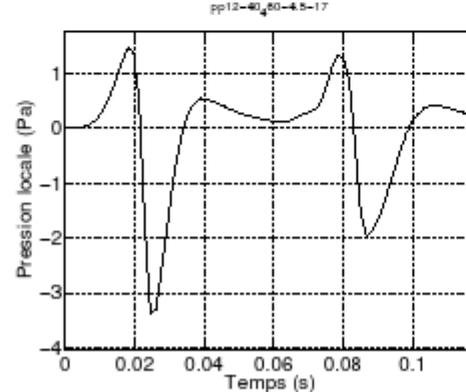
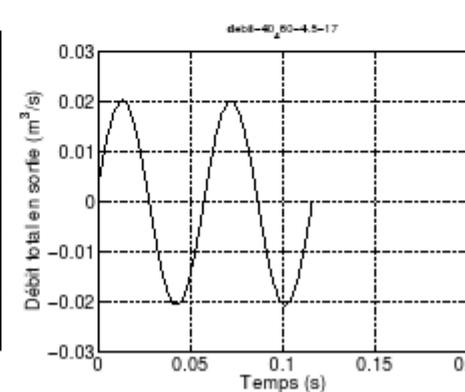
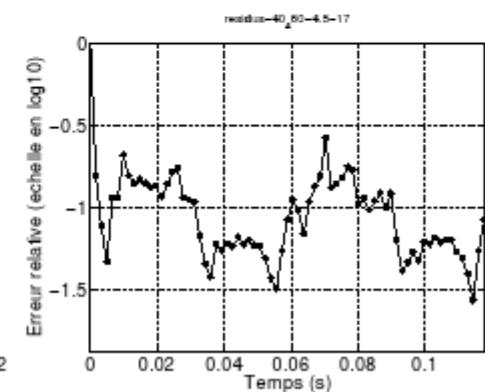
Trajectoires des particules – B_{02}^3 – $f = 17$ Hz

[jouer la vidéo](#)

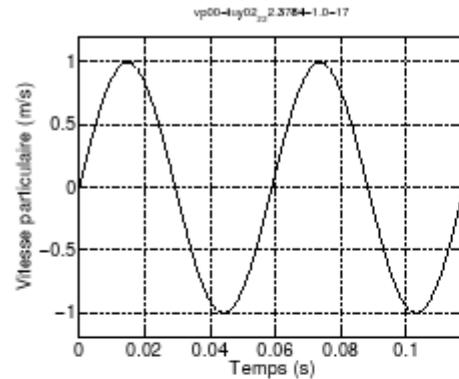


$$f_e \equiv 612 \text{ Hz } Re \equiv 24000$$

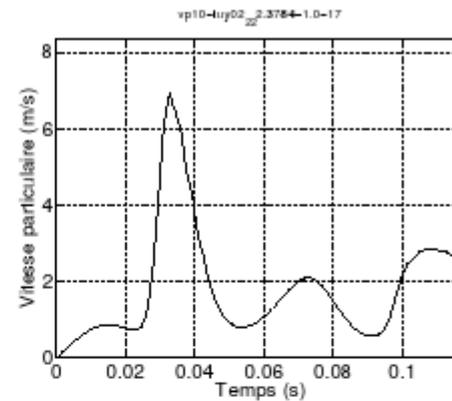
IV. Simulation numérique

Signaux temporels – C_{01} – $f = 17$ Hz(A) $vp00(t)$ entrée axe(B) $vp10(t)$ sortie axe(C) $pp00(t)$ entrée axe(D) $pp05(t)$ col paroi(E) $pp10(t)$ sortie axe(F) $pp12(t)$ 12,5cm axe(G) $q_sor(t)$ (H) $Rd(t)$

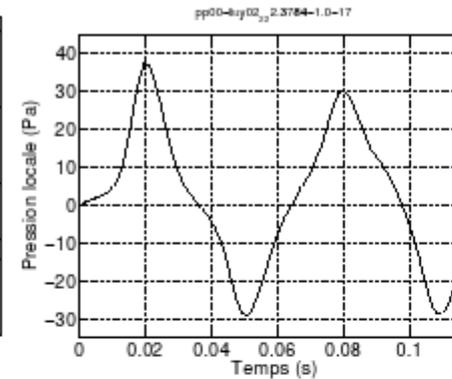
IV. Simulation numérique

Signaux temporels – $B_{02}^3 - f = 17 \text{ Hz}$ 

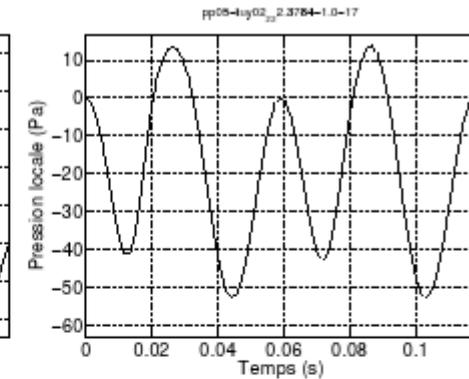
(A) vp00(t) entrée axe



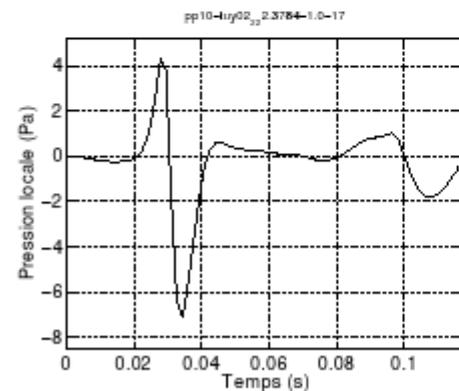
(B) vp10(t) sortie axe



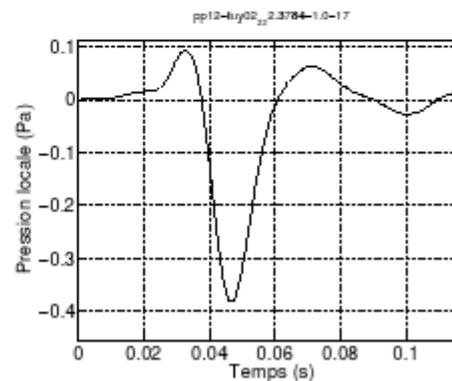
(C) pp00(t) entrée axe



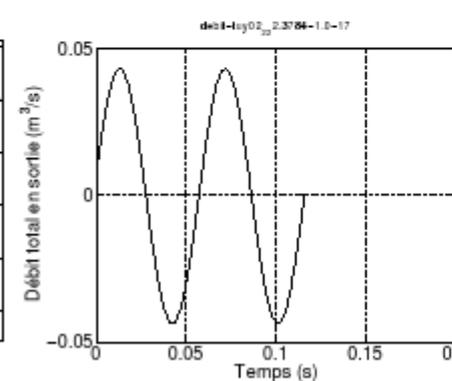
(D) pp05(t) col paroi



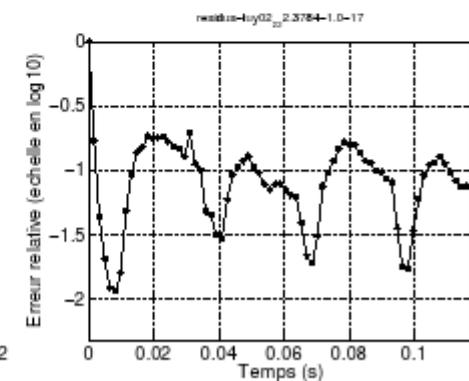
(E) pp10(t) sortie axe



(F) pp12(t) 12,5cm axe



(G) q_sor(t)



(H) Rd(t)

IV. Simulation numérique

Influence de l'angle d'incidence sur la puissance des sources de bruit

Calcul de la puissance totale au cours d'une période

$$P_x(t) = \frac{1}{T} \frac{1}{N_D} \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{N_D} h_{ow\circ}(i, t) \cdot \vec{x}$$

$$P_y(t) = \frac{1}{T} \frac{1}{N_D} \sum_{t=0}^T \sum_{i=1}^{N_D} h_{ow\circ}(i, t) \cdot \vec{y}$$

Profil	θ_i (deg)	$P_x(t)$ (W)	$P_y(t)$ (W)
B_{02}^1	16,3	$3,47 \cdot 10^{-3}$	$2,32 \cdot 10^{-2}$
B_{02}^3	22,38	$2,18 \cdot 10^{-3}$	$1,07 \cdot 10^{-2}$
B_{02}^5	34,83	$2,87 \cdot 10^{-3}$	$1,96 \cdot 10^{-2}$
B_{02}^6	46,73	$5,32 \cdot 10^{-3}$	$2,3 \cdot 10^{-2}$
B_{02}^7	65,98	$5,93 \cdot 10^{-3}$	$3,12 \cdot 10^{-2}$

Conclusion

- Approche aérodynamique : phénomènes complexes de distorsion aux basses fréquences.
- Tuyère acoustique : diminution du bruit aérodynamique et des couplages non-linéaires
- Optimisation numérique : minimisation de la vorticité au cours du temps dans le flux instationnaire
- Castax : interface de contrôle à Cast3M

Perspectives

- Schéma numérique compressible + turbulence
- Couplage fluide / membrane
- Approche multi-domaines, liaisons avec les éléments finis de frontière (rayonnement)
- Autres applications:
 - conversion thermoacoustique
 - motorisation aéronautique
 - systèmes à force marée-motrice...



guillaume.pellerin@cnam.fr
<http://svn.parisson.org/castax/>

Etude du haut-parleur aux forts déplacements. Application à l'optimisation des tuyères acoustiques.



(c) 2004 Guillaume Pellerin

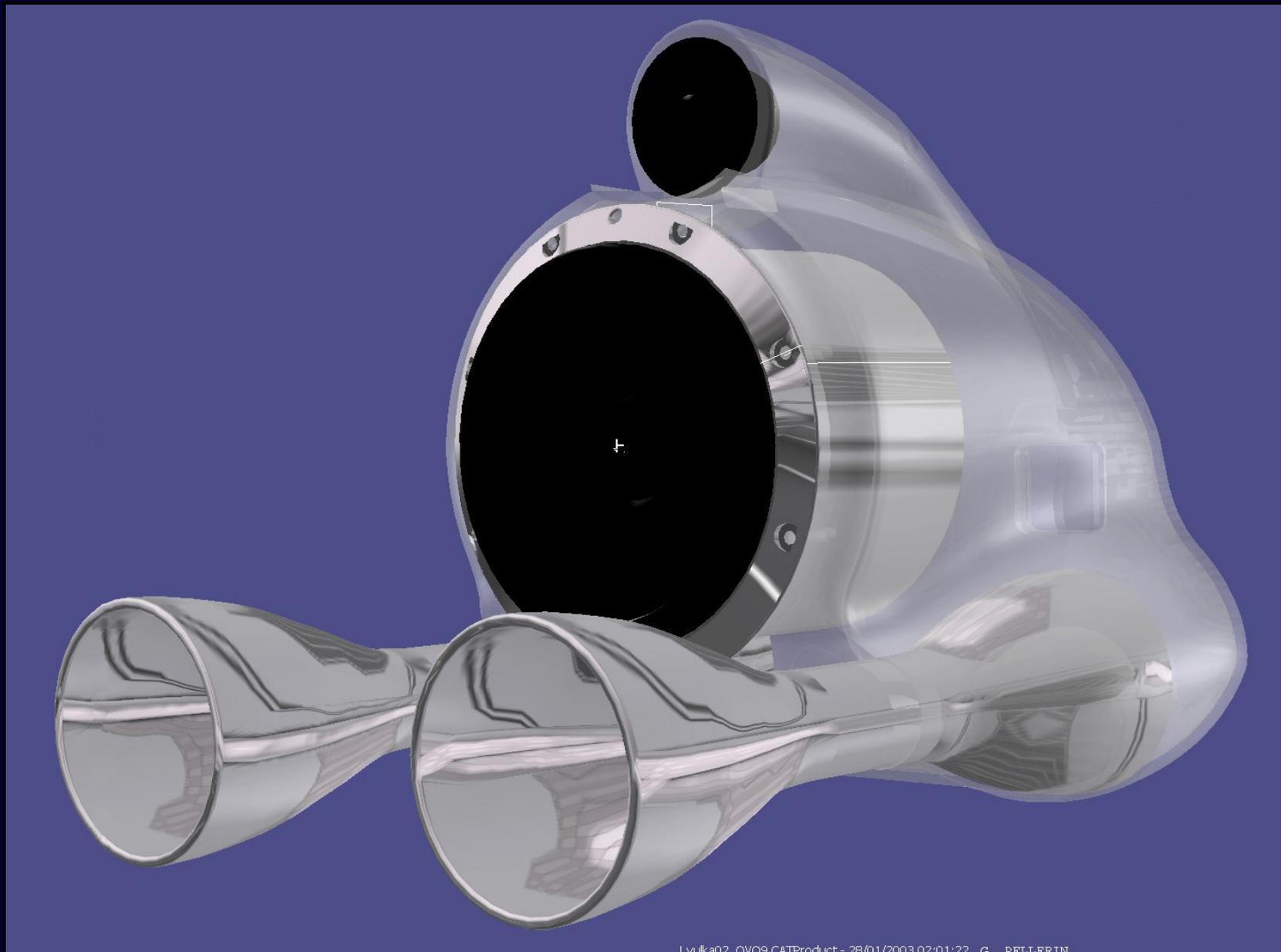
Lyułka V2.0

Etude du haut-parleur aux forts déplacements. Application à l'optimisation des tuyères acoustiques.



Lyułka V2.0

Etude du haut-parleur aux forts déplacements.



Lvulka02_OVO9.CATProduct - 26/01/2003 02:01:22 - G. PELLERIN

(c) 2004 Guillaume Pellerin

Prochainement: Haliaetus V2.0

Etude du haut-parleur aux forts déplacements.



(c) 2004 Guillaume Pellerin

Haliaetus Lyulka