

Etude aéraulique et aéroacoustique de la production de consonnes fricatives par modèle physique

Soutenance de thèse - 24 septembre 2010

Olivier Estienne

Travaux réalisés au *Gipsa-Lab* - Département *Parole & Cognition* de
Grenoble et à l'*Institut Pprime* de Poitiers

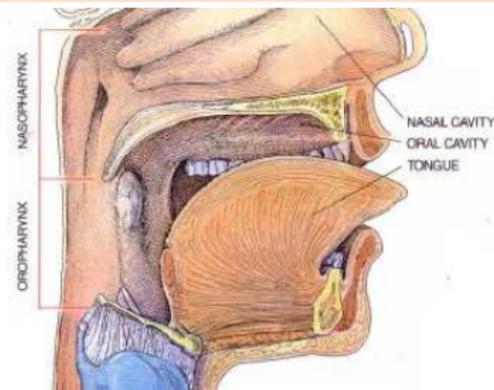
Direction de thèse : Annemie Van Hirtum (*Gipsa-Lab*) et Hélène
Bailliet (*Institut P' - Poitiers*)

Thèse financée sur un projet de l'Agence Nationale de la Recherche



Contexte de l'étude

- Compréhension des mécanismes physiques à l'origine de la production des sons de parole.
- Partie du système respiratoire/phonatoire
→ *voies aériennes supérieures* : *larynx* + ***conduit vocal***



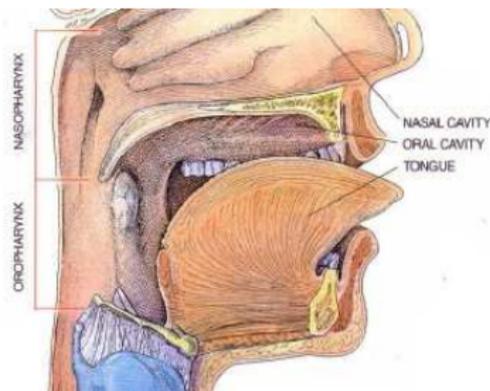
[Sataloff, 1992]

Contexte de l'étude

■ Consonne **fricative** :

- Du latin « fricare » → *frotter*.
- *Consonne réalisée avec une constriction importante du conduit vocal, de sorte que l'air phonatoire devient turbulent et s'écoule avec un bruit de friction caractéristique* [Larousse, 2010]

- En français : [z] – [j] – [v] (voisées) / [s]
– [ʃ] (*chaud*) – [f] (non-voisées)



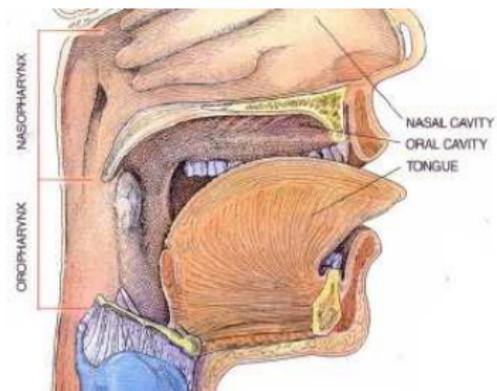
[Sataloff, 1992]

Contexte de l'étude

■ Consonne **fricative** :

- Du latin « fricare » → *frotter*.
- *Consonne réalisée avec une constriction importante du conduit vocal, de sorte que l'air phonatoire devient turbulent et s'écoule avec un bruit de friction caractéristique* [Larousse, 2010]

- En français : [z] – [j] – [v] (voisées) / [s]
– [ʃ] (*chaud*) – [f] (*non-voisées*)



[Sataloff, 1992]

Mécanisme général de production (non-voisées)

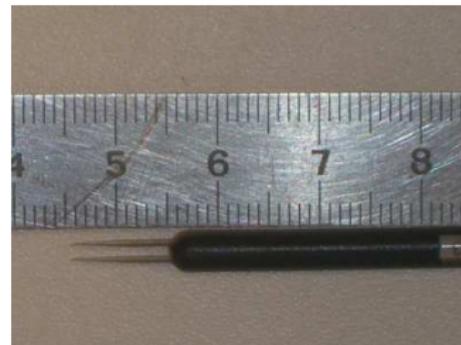
- Positionnement des articulateurs du conduit vocal pour former une constriction.
- Formation d'un **jet d'air turbulent** en aval de la constriction.
- Interaction du jet avec les autres articulateurs (dents, palais, lèvres)
⇒ production d'un **bruit aéroacoustique** caractéristique.

Inconvénients pour une étude « *in-vivo* »

■ Techniques de mesures du champ de vitesses en écoulement turbulent :

- Anémométrie à fil ou film chaud.
- Méthodes laser (Vélocimétrie Laser Doppler et Vélocimétrie à Images de Particules).

⇒ Non-adaptées aux mesures sur l'humain !

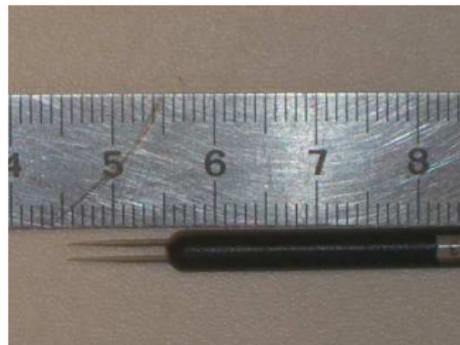


Inconvénients pour une étude « *in-vivo* »

■ Techniques de mesures du champ de vitesses en écoulement turbulent :

- Anémométrie à fil ou film chaud.
- Méthodes laser (Vélocimétrie Laser Doppler et Vélocimétrie à Images de Particules).

⇒ Non-adaptées aux mesures sur l'humain !



[Toda, 2006]

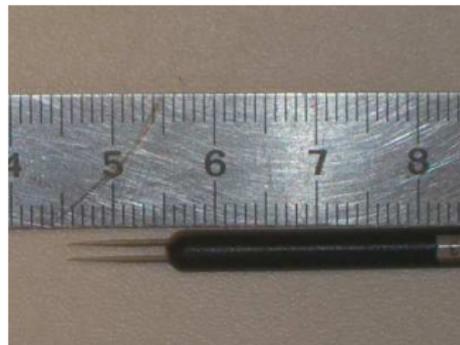
■ Fricatives prononcées par des locuteurs : problème de la variabilité articulaire entre les sujets / pour un même sujet.

Inconvénients pour une étude « *in-vivo* »

■ Techniques de mesures du champ de vitesses en écoulement turbulent :

- Anémométrie à fil ou film chaud.
- Méthodes laser (Vélocimétrie Laser Doppler et Vélocimétrie à Images de Particules).

⇒ Non-adaptées aux mesures sur l'humain !



[Toda, 2006]

■ Fricatives prononcées par des locuteurs : problème de la variabilité articulatoire entre les sujets / pour un même sujet.

⇒ Etude des mécanismes physiques de production des fricatives par modélisation.

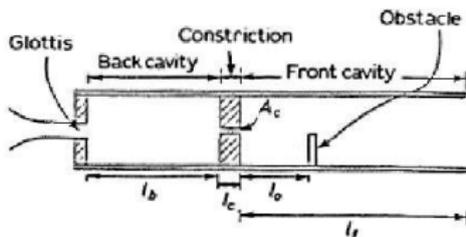
- 1 Introduction
- 2 Vers la modélisation physique des fricatives
 - Eléments de l'état de l'art
 - Modèle proposé et objectifs de l'étude
- 3 Influence des paramètres géométriques du modèle
 - Banc expérimental pour les mesures avec la maquette
 - Evolution fréquentielle du bruit rayonné
 - Evolution de la pression en entrée de l'écoulement
- 4 Etude du comportement de l'écoulement en maquette
 - Localisation des pertes de charge le long du canal
 - Mécanismes de l'écoulement : apport de la modélisation
- 5 Bilan et perspectives

■ Premiers modèles : étude du bruit produit avec une seule constriction [Stevens, 1971] (importance de l'aire, la forme, le nombre de Reynolds de l'écoulement).

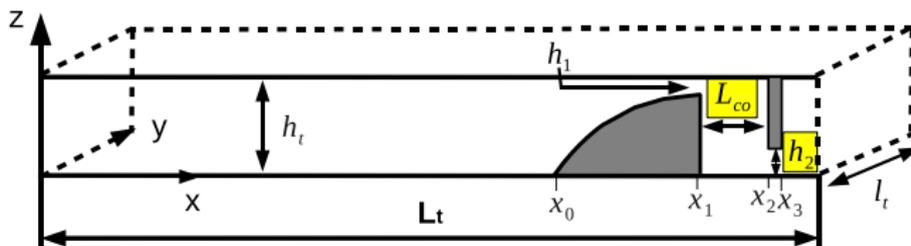
■ Premiers modèles : étude du bruit produit avec une seule constriction [Stevens, 1971] (importance de l'aire, la forme, le nombre de Reynolds de l'écoulement).

■ Modèles mécaniques de Shadle ([Shadle, 1990], [Shadle et al., 2008]) : géométrie du conduit vocal *cruciale* :

- forme et position de la constriction
- présence des articulateurs en aval (obstacle)
- pression / débit en amont

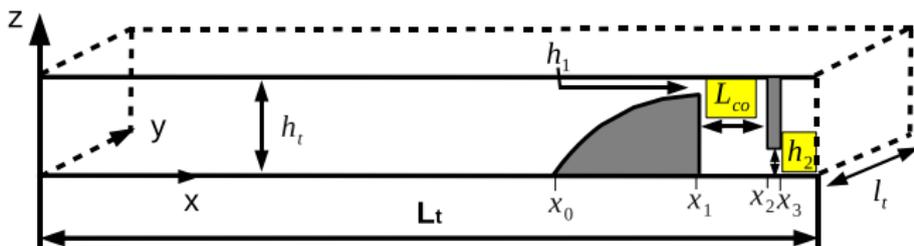


Modèle du conduit vocal proposé



- Canal droit uniforme contenant deux articulateurs (config. [s] ou [ʃ]) :
 - Langue en forme de «demi-ellipse», avec fin abrupte (prédiction séparation) → constriction positionnée asymétriquement. Mobile en translation selon l'axe \vec{x} .
 - Obstacle rectangulaire fixe modélisant la rangée de *dents* supérieure.

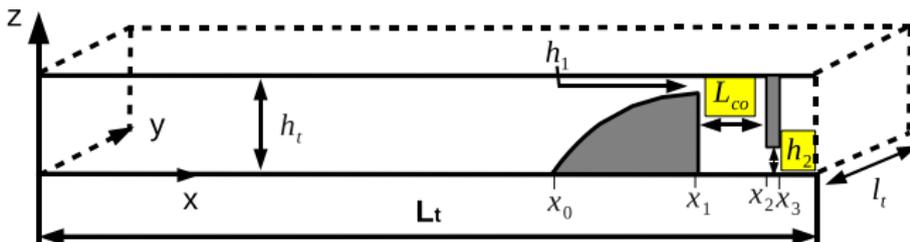
Modèle du conduit vocal proposé



- Canal droit uniforme contenant deux articulateurs (config. [s] ou [ʃ]) :
 - Langue en forme de «demi-ellipse», avec fin abrupte (prédiction séparation) → constriction positionnée asymétriquement. Mobile en translation selon l'axe \vec{x} .
 - Obstacle rectangulaire fixe modélisant la rangée de *dents* supérieure.

Deux paramètres géométriques associés au modèle

- Distance langue-dents L_{co}
- Hauteur de constriction à l'obstacle h_2



■ Dimensionnement de la maquette (échelle 1) d'après les données disponibles dans la littérature :

Grandeur	Notation	Echelle (litt.)	Modèle
Géométrie du conduit vocal			
Ht. de constriction palato-linguale	h_1	1 - 4 mm	3 mm
Distance langue-dents	L_{co}	1-10 mm	3-24 mm
Ht. de constriction au niveau des dents	h_2	1 - 2 mm	0.6-6.8 mm
Epaisseur d'une dent	L_{ob}	1 - 2 mm	3 mm
Longueur du conduit vocal	L_t	150 - 190 mm	180 mm
Ht. du conduit vocal (avant constriction)	h_t	10 - 20 mm	16 mm
Largeur du conduit vocal	l_t	15 - 25 mm	21 mm
Ecoulement			
Nombre de Reynolds	Re	4000-10000	

Objectifs de l'étude

Améliorer la compréhension des mécanismes physiques associés à la production de fricatives.

Questions abordées :

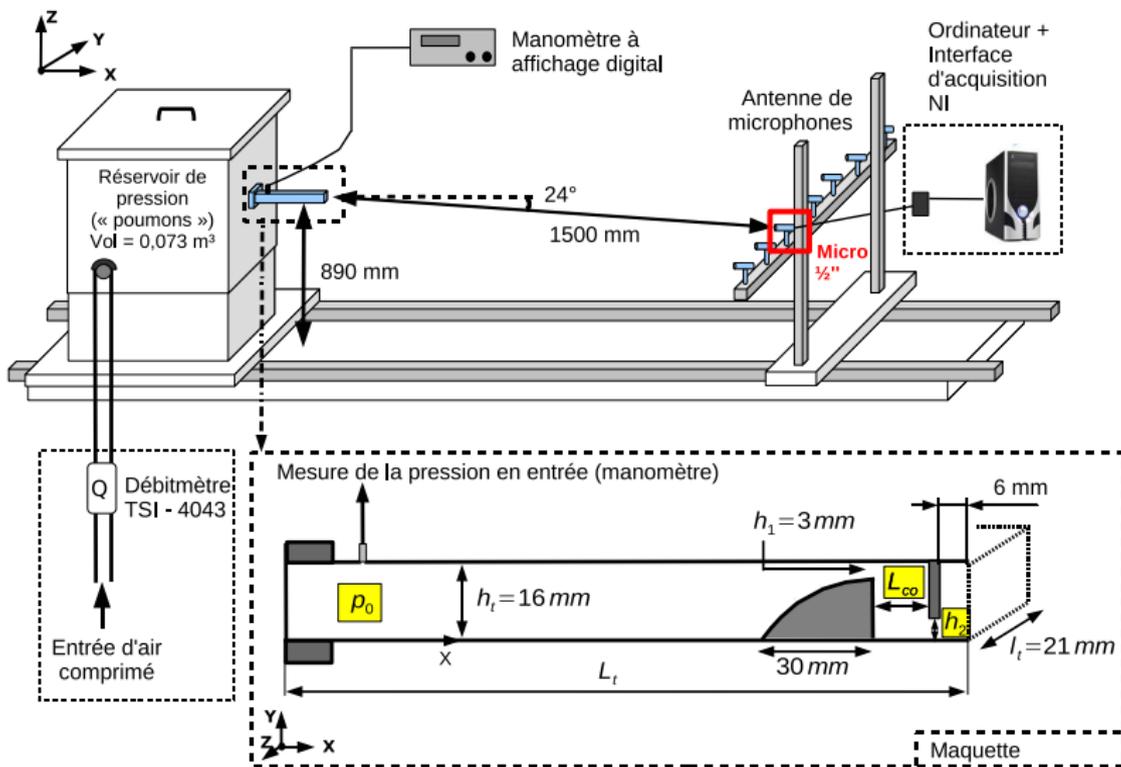
- Quels sont les effets significatifs sur le bruit rayonné lorsque les paramètres géométriques varient ?
- Comment le comportement de l'écoulement en maquette évolue-t-il en fonction du positionnement articulaire contrôlé par ces paramètres ?
- Ce comportement peut-il être associé à des cas connus d'écoulements turbulents, adaptés à notre géométrie de conduit vocal ?

Plan de la présentation

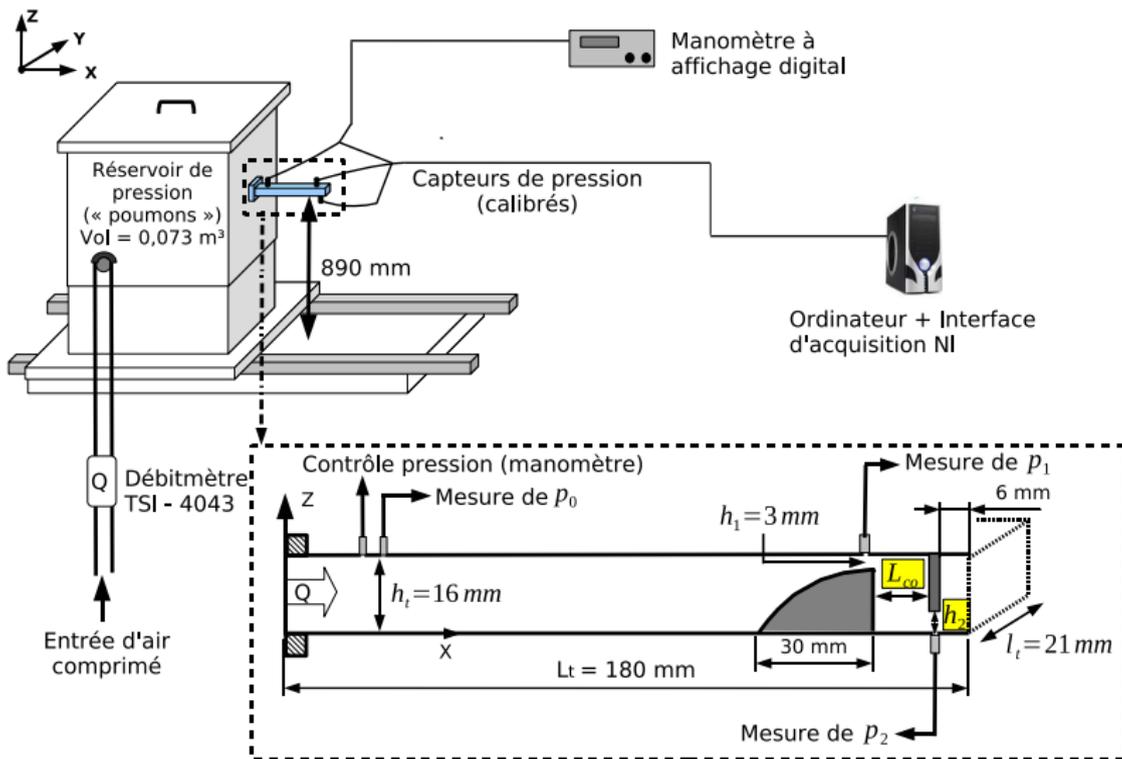
- 1 Introduction
- 2 Vers la modélisation physique des fricatives
 - Eléments de l'état de l'art
 - Modèle proposé et objectifs de l'étude
- 3 Influence des paramètres géométriques du modèle
 - Banc expérimental pour les mesures avec la maquette
 - Evolution fréquentielle du bruit rayonné
 - Evolution de la pression en entrée de l'écoulement
- 4 Etude du comportement de l'écoulement en maquette
 - Localisation des pertes de charge le long du canal
 - Mécanismes de l'écoulement : apport de la modélisation
- 5 Bilan et perspectives

- 1 Introduction
- 2 Vers la modélisation physique des fricatives
 - Eléments de l'état de l'art
 - Modèle proposé et objectifs de l'étude
- 3 Influence des paramètres géométriques du modèle
 - Banc expérimental pour les mesures avec la maquette
 - Evolution fréquentielle du bruit rayonné
 - Evolution de la pression en entrée de l'écoulement
- 4 Etude du comportement de l'écoulement en maquette
 - Localisation des pertes de charge le long du canal
 - Mécanismes de l'écoulement : apport de la modélisation
- 5 Bilan et perspectives

Dispositif expérimental pour les mesures acoustiques



Dispositif expérimental pour les mesures d'écoulement d'air



Conditions expérimentales

Valeurs des paramètres géométriques
(maquette avec deux articulateurs) :

h_2 (mm)	$1 - \frac{h_2}{h_t}$	A_2 (cm ²)	L_{co} (mm)
0.6	96%	0.126	3
1.5	91%	0.315	5
2.6	84 %	0.546	10
5.5	66 %	1.155	16
6.8	58 %	1.428	24

Conditions en entrée de l'écoulement

- Différents débits \tilde{Q} (limitation selon h_2).
- Soit un nombre de Reynolds max :
 $Re_0 = \mathcal{O}(10^5)$.

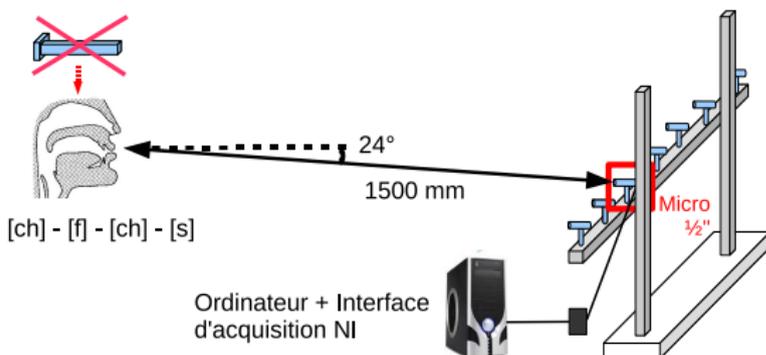
- Conversion analogique/numérique du signal : carte d'acquisition National Instruments PCI-6225. Fréquence d'échantillonnage : $F_e = 50kHz$ par signal.
- Banc expérimental dans une pièce (dimensions : $4.4 \times 4.0 \times 3.0$ m).

- Analyse spectrale des signaux :
 - Fréquences < 50 Hz retirées.
 - Méthode de Welch sur 1s de signal.

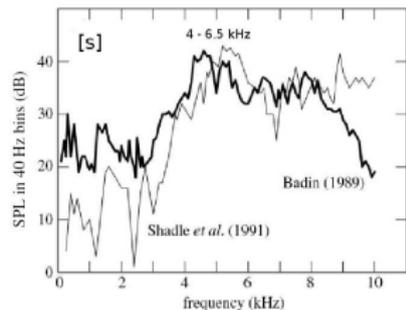
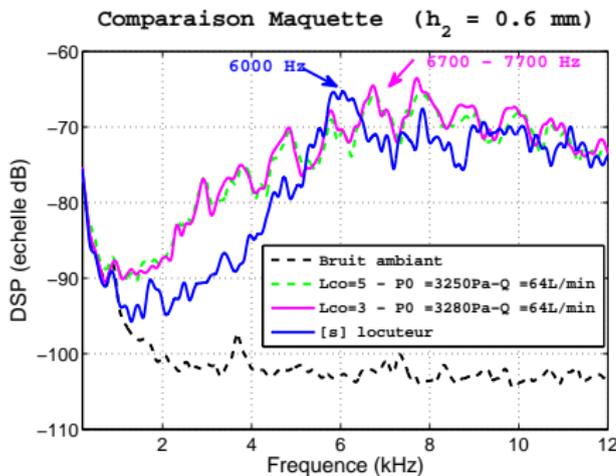
■ Analyse spectrale des signaux :

- Fréquences < 50 Hz retirées.
- Méthode de Welch sur 1s de signal.

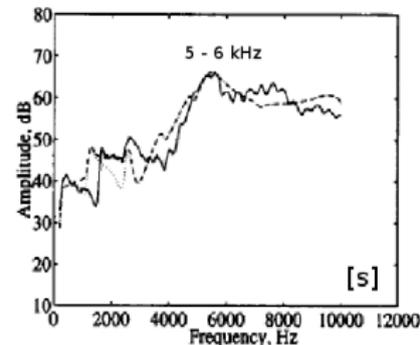
■ Enregistrement d'une séquence de fricatives [ʃ]-[f]-[ʃ]-[s] produites par un locuteur, positionné identiquement à la maquette :



Comparaison avec la consonne [s]

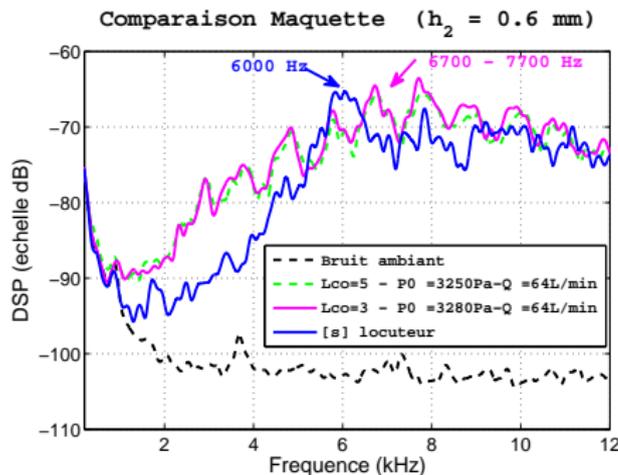


[Howe and McGowan, 2005]

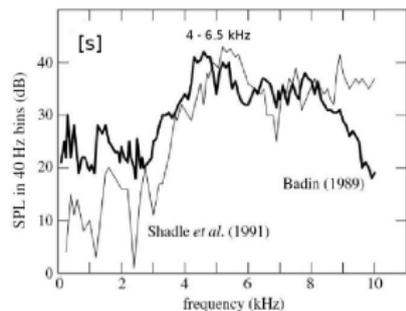


[Narayanan and Alwan, 2000]

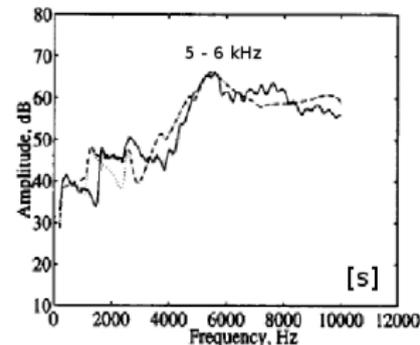
Comparaison avec la consonne [s]



⇒ Reproduction du phénomène par la maquette.

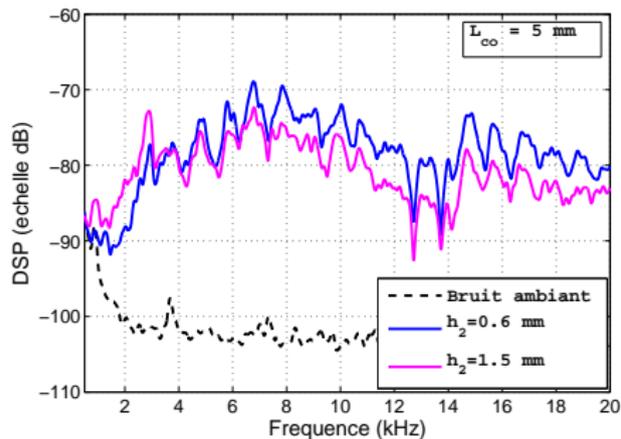
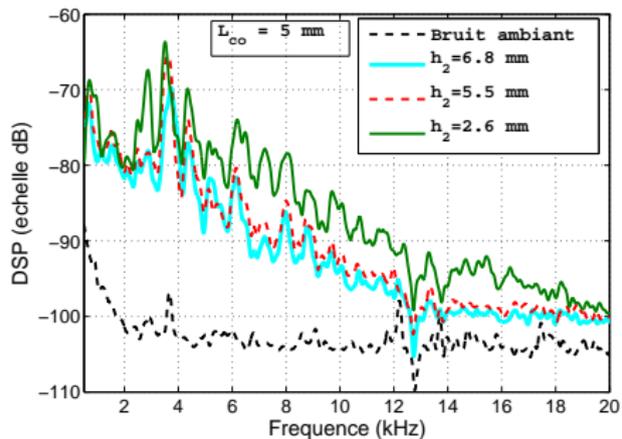


[Howe and McGowan, 2005]

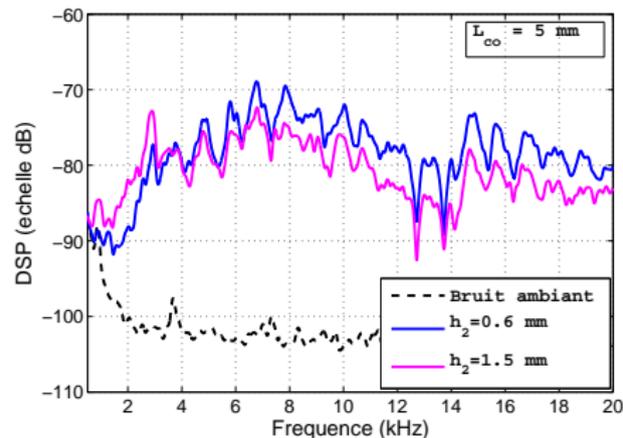
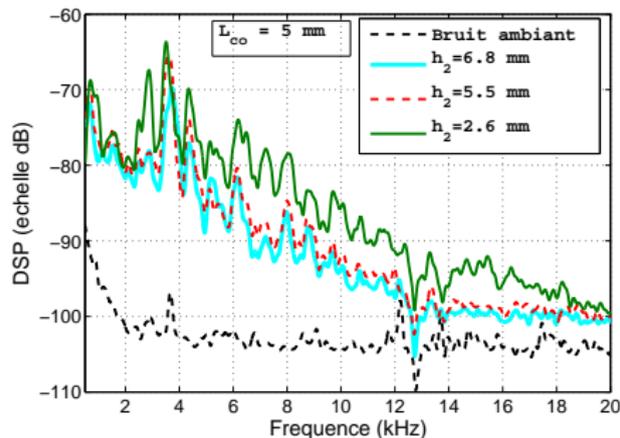


[Narayanan and Alwan, 2000]

Influence de la hauteur de la constriction aux dents h_2



Influence de la hauteur de la constriction aux dents h_2

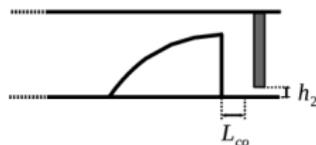


■ Deux formes spectrales globales différentes selon la hauteur de la constriction aux dents h_2 :

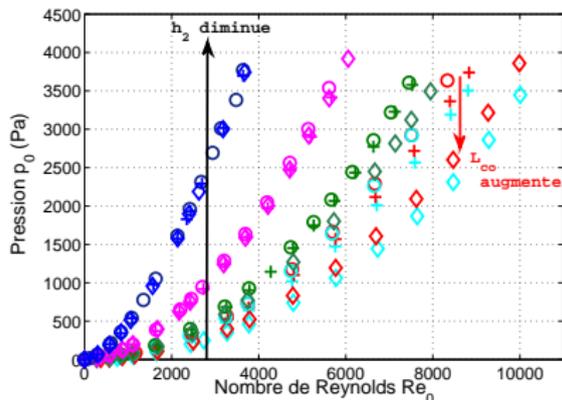
- 0.6 et 1.5 mm : bruit large bande à haute amplitude dominant.
- 2.6, 5.5 et 6.8 mm : zone avec pics de DSP

Pression en entrée p_0 – pertes de charges globales

- Effet de l'ouverture h_2 aux dents :
 → Pour Re_0 fixé : p_0 augmente quand la hauteur h_2 est plus petite.

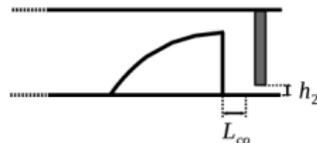


h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-

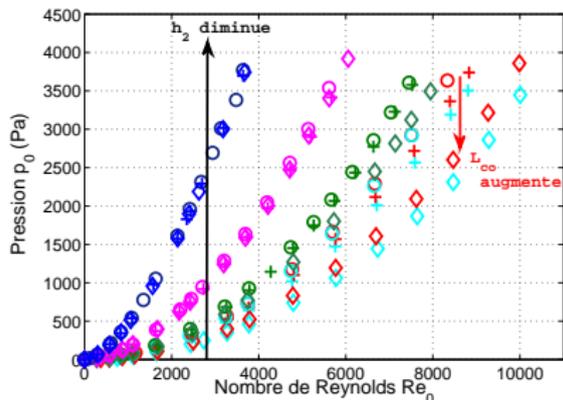


Pression en entrée p_0 – pertes de charges globales

- Effet de l'ouverture h_2 aux dents :
→ Pour Re_0 fixé : p_0 augmente quand la hauteur h_2 est plus petite.
- Positionnement de la langue :
→ Cas $h_2 = 0.6$ et 1.5 mm : influence quasi négligeable (L_{co}).
→ Cas $h_2 \geq 2.6$ mm : influence proportionnelle à l'ouverture aux dents h_2 . Pression p_0 plus élevée quand la langue est rapprochée.

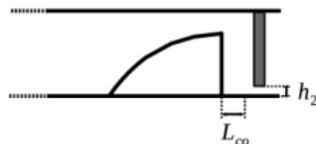


h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-



Pression en entrée p_0 – pertes de charges globales

- Effet de l'ouverture h_2 aux dents :
→ Pour Re_0 fixé : p_0 augmente quand la hauteur h_2 est plus petite.

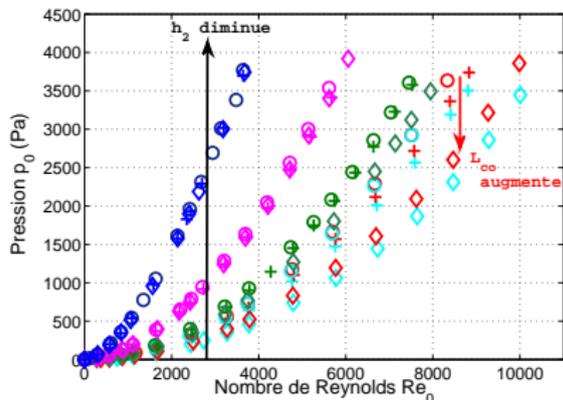


- Positionnement de la langue :
→ Cas $h_2 = 0.6$ et 1.5 mm : influence quasi négligeable (L_{co}).
→ Cas $h_2 \geq 2.6$ mm : influence proportionnelle à l'ouverture aux dents h_2 . Pression p_0 plus élevée quand la langue est rapprochée.

h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-

⇒ Effet prépondérant de la constriction aux dents

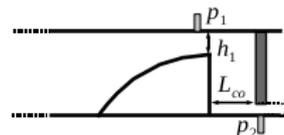
- Influence sur l'écoulement au niveau des articulateurs ?



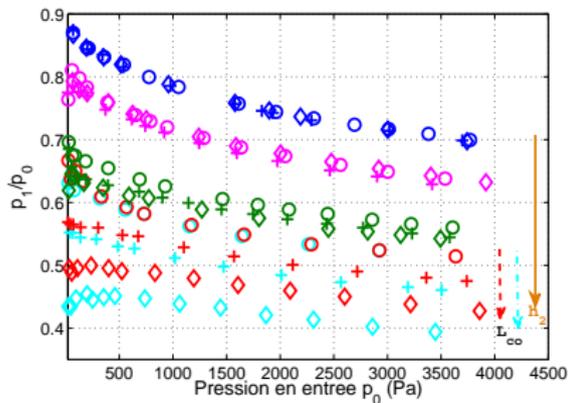
- 1 Introduction
- 2 Vers la modélisation physique des fricatives
 - Eléments de l'état de l'art
 - Modèle proposé et objectifs de l'étude
- 3 Influence des paramètres géométriques du modèle
 - Banc expérimental pour les mesures avec la maquette
 - Evolution fréquentielle du bruit rayonné
 - Evolution de la pression en entrée de l'écoulement
- 4 Etude du comportement de l'écoulement en maquette
 - Localisation des pertes de charge le long du canal
 - Mécanismes de l'écoulement : apport de la modélisation
- 5 Bilan et perspectives

Pression au niveau de la langue p_1

- Pertes de charge en amont du bout de langue plus importantes quand h_2 augmente.

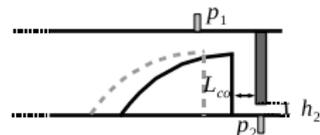


h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-



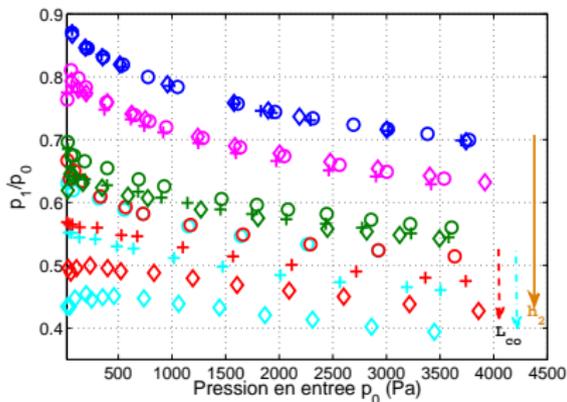
Pression au niveau de la langue p_1

- Pertes de charge en amont du bout de langue plus importantes quand h_2 augmente.



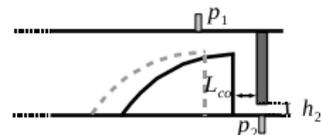
- Positionnement de la langue :
 - Cas $h_2 = 5.5$ et 6.8 mm $> h_1$: forte variation avec le paramètre L_{co} : indique accélération de l'écoulement dans le rétrécissement.
 - Cas $h_2 \leq 2.6$ mm : peu de variation de p_1 p/r à L_{co} .

h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-

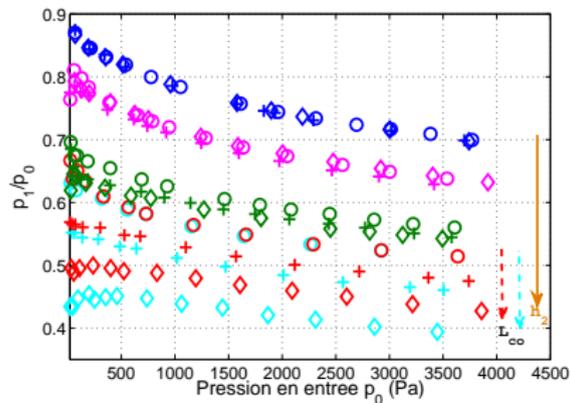


Pression au niveau de la langue p_1

- Pertes de charge en amont du bout de langue plus importantes quand h_2 augmente.
- Positionnement de la langue :
 - Cas $h_2 = 5.5$ et 6.8 mm $> h_1$: forte variation avec le paramètre L_{co} : indique accélération de l'écoulement dans le rétrécissement.
 - Cas $h_2 \leq 2.6$ mm : peu de variation de p_1 p/r à L_{co} .



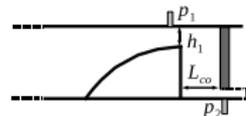
h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-



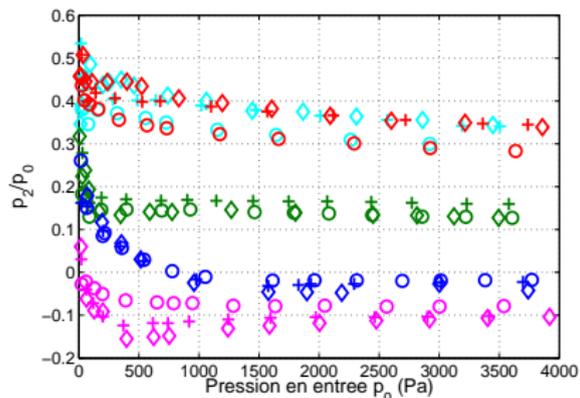
⇒ Induit un comportement d'écoulement différent avant la séparation partielle.

Pression à l'obstacle p_2

- Dépendance forte de la hauteur h_2 + évolution non-linéaire de \tilde{p}_2 :
 $p_2(h_2 = 1.5) < p_2(h_2 = 0.6)$.

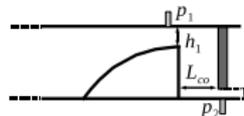


h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-



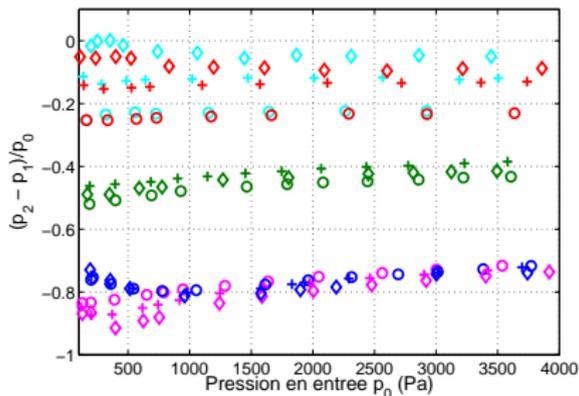
Pression à l'obstacle p_2

- Dépendance forte de la hauteur h_2 + évolution non-linéaire de \tilde{p}_2 :
 $p_2(h_2 = 1.5) < p_2(h_2 = 0.6)$.



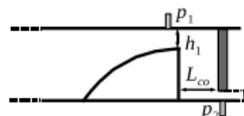
- Entre langue et obstacle :
 - ★ **petite ouverture** $h_2 < h_1 = 3$ mm : majorité des pertes de charge → accélération de l'écoulement (effet Bernoulli)
 - ★ **grande ouverture** $h_2 > h_1$: peu de pertes → alors situées en aval de l'obstacle

h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-



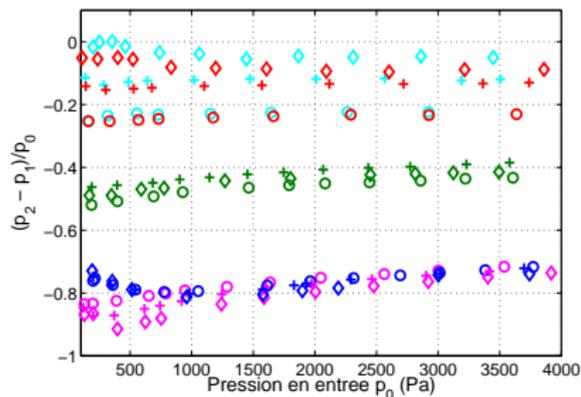
Pression à l'obstacle p_2

- Dépendance forte de la hauteur h_2 + évolution non-linéaire de \tilde{p}_2 :
 $p_2(h_2 = 1.5) < p_2(h_2 = 0.6)$.



- Entre langue et obstacle :
 - ★ petite ouverture $h_2 < h_1 = 3$ mm : majorité des pertes de charge → accélération de l'écoulement (effet Bernoulli)
 - ★ grande ouverture $h_2 > h_1$: peu de pertes → alors situées en aval de l'obstacle

h_2 (mm)	L_{cp} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-

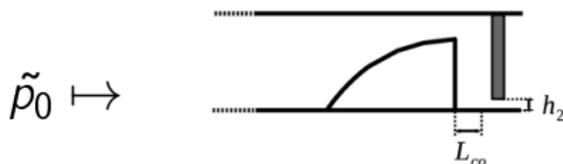


→ Mécanismes associés aux pertes ?

- 1 Introduction
- 2 Vers la modélisation physique des fricatives
 - Eléments de l'état de l'art
 - Modèle proposé et objectifs de l'étude
- 3 Influence des paramètres géométriques du modèle
 - Banc expérimental pour les mesures avec la maquette
 - Evolution fréquentielle du bruit rayonné
 - Evolution de la pression en entrée de l'écoulement
- 4 Etude du comportement de l'écoulement en maquette
 - Localisation des pertes de charge le long du canal
 - Mécanismes de l'écoulement : apport de la modélisation
- 5 Bilan et perspectives

Simplification des équations de Navier-Stokes : hypothèses

Problème initial :



$$\mapsto Q = f(\tilde{p}_0, h_2, L_{co}) \mapsto p(x)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \\ \frac{\partial(\rho \vec{u})}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u} \otimes \vec{u}) = -\text{grad } p + \text{div } \vec{\bar{\tau}} \\ \frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \text{div}(\rho h \vec{u}) = -\text{div } \vec{q} + \frac{\partial p}{\partial t} + \vec{u} \cdot \text{grad } p + \text{grad } \vec{u} : \vec{\bar{\tau}} \end{array} \right.$$

Simplification des équations de Navier-Stokes : hypothèses

- Nombre de Mach : $M^2 = \left(\frac{u}{c_0}\right)^2 = \mathcal{O}(10^{-2}) \Rightarrow$ écoulement *incompressible*
 $\Rightarrow \rho \simeq \rho_0 = \text{Cte}$ et $\nu = \text{Cte}$.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{u}) = 0 \Rightarrow \text{div}(\vec{u}) = 0 \\ \frac{\partial(\vec{u})}{\partial t} + \underbrace{\text{div}(\rho \vec{u} \otimes \vec{u})}_{(\vec{u} \cdot \text{grad})\vec{u}} = -\frac{1}{\rho_0} \text{grad } p + \underbrace{\text{div} \vec{\tau}}_{\nu \Delta \vec{u}} \end{array} \right.$$

Simplification des équations de Navier-Stokes : hypothèses

- Nombre de Mach : $M^2 = \left(\frac{u}{c_0}\right)^2 = \mathcal{O}(10^{-2}) \Rightarrow$ écoulement *incompressible*
 $\Rightarrow \rho \simeq \rho_0 = \text{Cte}$ et $\nu = \text{Cte}$.
- Rapports géométriques $\left(\frac{h_1}{l_t}, \frac{h_2}{l_t}\right) = \mathcal{O}(10^{-1}) \Rightarrow$ écoulement bidimensionnel.

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{div}(\vec{u}) = 0 \\ \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \text{grad}) \vec{u} = -\frac{1}{\rho_0} \text{grad } p + \nu \Delta \vec{u} \\ \vec{u} = u(x, z), p = p(x, z) \end{array} \right.$$

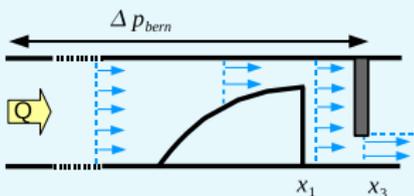
Hypothèses supplémentaires

- Fricatives maintenues \rightarrow *régime permanent*.
- Mouvement *irrotationnel* de l'écoulement.
- *Fluide parfait* \Rightarrow évolution des grandeurs selon x .

Théorème de Bernoulli (entre $x = 0$ et x) :

$$p_0 + \frac{\rho_0 Q^2}{2l_t^2 h_t^2} = p(x) + \frac{\rho_0 Q^2}{2l_t^2 h(x)^2} \Rightarrow \Delta p_{bern} = \frac{\rho_0 Q^2}{2l_t^2} \left(\frac{1}{h(x)^2} - \frac{1}{h_t^2} \right), \forall x$$

+ Hypothèse de séparation : $p(x \geq x_s) = p_{post-constriction}$



$$\Rightarrow Q = l_t \sqrt{\frac{2\rho_0}{\rho_0 \left(\frac{1}{h_2^2} - \frac{1}{h_t^2} \right)}}$$

■ Prise en compte des effets visqueux → terme de Poiseuille :

$$\Delta p_{pois} = p_A - p_B = \frac{12\mu Q}{l_t} \int_{x_A}^{x_B} \frac{1}{h(x)^3} dx$$

■ Prise en compte des effets visqueux → terme de Poiseuille :

$$\Delta p_{pois} = p_A - p_B = \frac{12\mu Q}{l_t} \int_{x_A}^{x_B} \frac{1}{h(x)^3} dx$$

→ Effets de viscosité plus importants (quantitativement) en écoulement réel pour p_0 basse / Apport qualitatif

■ Prise en compte des effets visqueux → terme de Poiseuille :

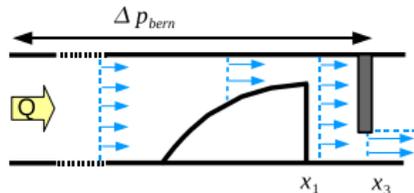
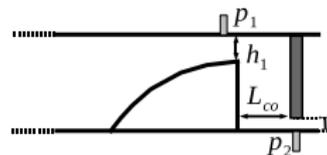
$$\Delta p_{pois} = p_A - p_B = \frac{12\mu Q}{l_t} \int_{x_A}^{x_B} \frac{1}{h(x)^3} dx$$

→ Effets de viscosité plus importants (quantitativement) en écoulement réel pour p_0 basse / Apport qualitatif

Résultats principaux avec le modèle basé sur le théorème de Bernoulli

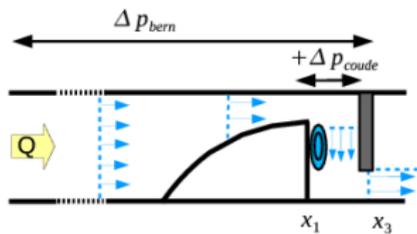
$$\Rightarrow \Delta p(0 \rightarrow x_3) = \Delta p_{bern} + \Delta p_{pois} :$$

- Estimation de p_1 qualitativement correcte du point de vue de l'influence des paramètres.
- Ouverture $h_2 > h_1$: surestimation importante du débit Q calculé \Rightarrow Sous-estimation importante de la pression p_1 à la langue.



→ Inclure les pertes des effets turbulents post-constriction(s).

Pertes additionnelles par turbulence : conduite coudée



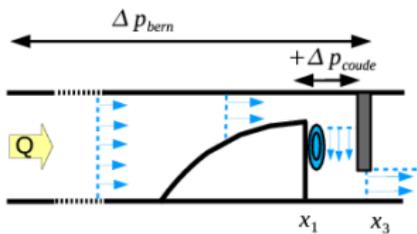
$$\Delta p = p_0 - p(x)$$

$$\Delta p = \Delta p_{bern} + \Delta p_{coude} + \Delta p_{pois}$$

$$\Delta p_{coude} = \frac{1}{2} \frac{\rho_0 Q^2}{l_f^2 h_1^2} K_C$$

$$[\text{Blevins, 1992}] \rightarrow K_C = 1.1 \beta \left(\frac{2 \cdot 10^5}{Re_1} \right)^{0.2}$$

Pertes additionnelles par turbulence : conduite coudée



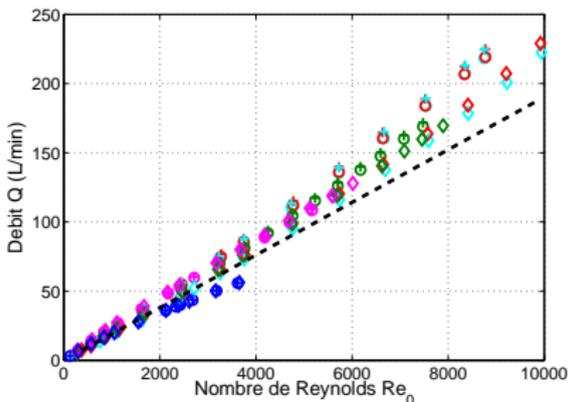
$$\Delta p = p_0 - p(x)$$

$$\Delta p = \Delta p_{bern} + \Delta p_{coude} + \Delta p_{pois}$$

$$\Delta p_{coude} = \frac{1}{2} \frac{\rho_0 Q^2}{l_f^2 h_1^2} K_C$$

- Débit : estimation correcte p/r modèle de Bernoulli ($|ER| < 40 \%$ contre $|ER| > 100 \%$).

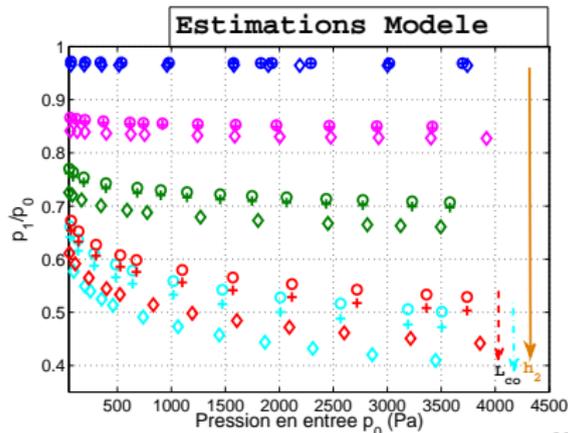
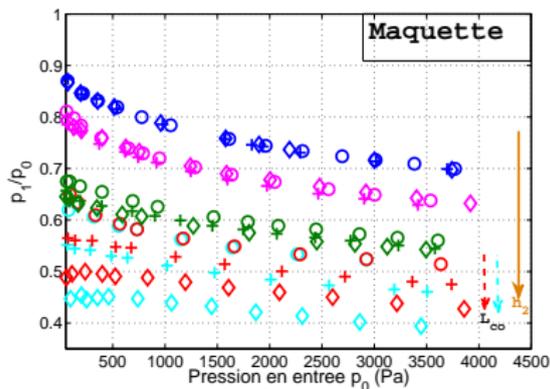
$$[\text{Blevins, 1992}] \rightarrow K_C = 1.1 \beta \left(\frac{2 \cdot 10^5}{Re_1} \right)^{0.2}$$



Pertes additionnelles par turbulence : conduite coudée

h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-

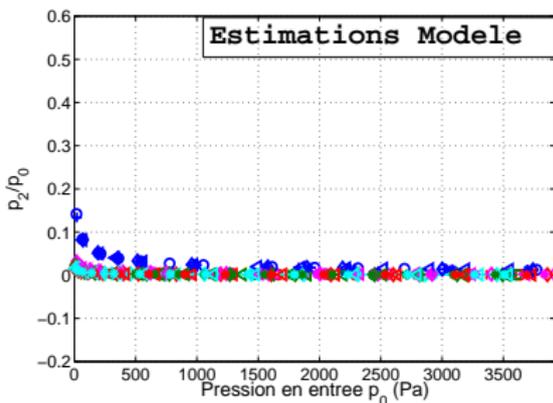
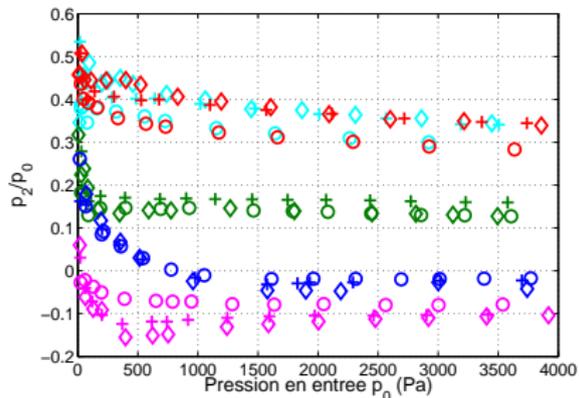
- Débit : estimation correcte p/r modèle de Bernoulli ($|ER| < 40 \%$ contre $|ER| > 100 \%$).
- Pression p_1 : variations qualitativement retrouvées et pour les grandes ouvertures aux dents *quantitativement améliorées* p/r Bernoulli ($p_1 < 0$ pour $h_2 \leq 2.6$ mm).



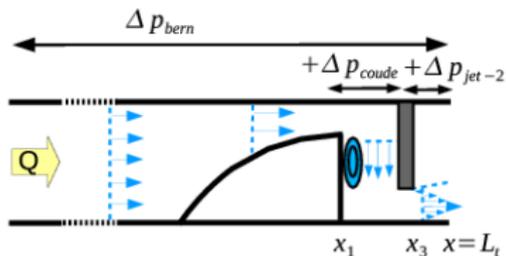
Pertes additionnelles par turbulence : conduite coudée

h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-

- Débit : estimation correcte p/r modèle de Bernoulli ($|ER| < 40\%$ contre $|ER| > 100\%$).
- Pression p_1 : variations qualitativement retrouvées et pour les grandes ouvertures aux dents *quantitativement améliorées* p/r Bernoulli ($p_1 < 0$ pour $h_2 \leq 2.6$ mm).
- Pression p_2 (constriction dents) : quasi-nulle (viscosité uniquement).



Ajout des pertes pour l'élargissement post-constriction



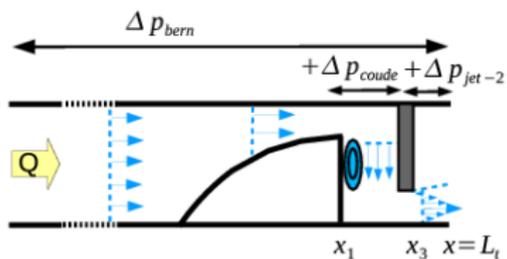
$$\Delta p = p_0 - p(x)$$

$$\Delta p = \Delta p_{bern} + \Delta p_{coude} + \Delta p_{jet-2}$$

$$\Delta p_{jet-2} = -\frac{\rho_0 Q^2}{2l_t^2 h_2^2} K_{J-2}$$

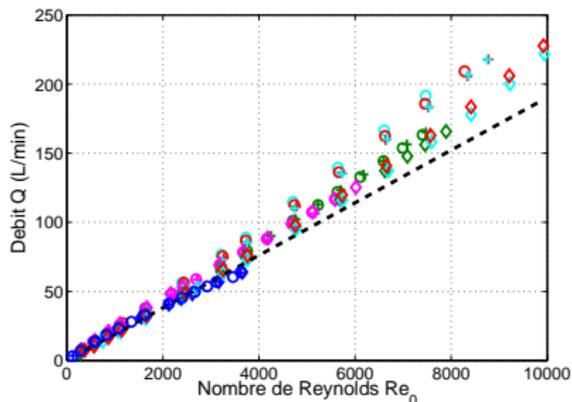
$$K_{J-2} = 2 \frac{h_2^2 (l_t + h_{j-2})^2}{h_{j-2}^2 (h_2 + l_t)^2} \left(1 - \frac{h_2^2 (l_t + h_{j-2})^2}{h_{j-2}^2 (h_2 + l_t)^2} \right)$$

Ajout des pertes pour l'élargissement post-constriction

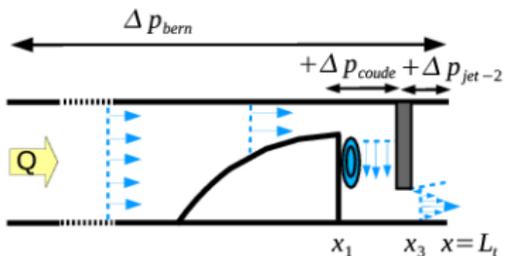


h_2 (mm)	L_{co} (mm)
0.6	3 - ○
1.5	5 - +
2.6	10 - ◇
5.5	-
6.8	-

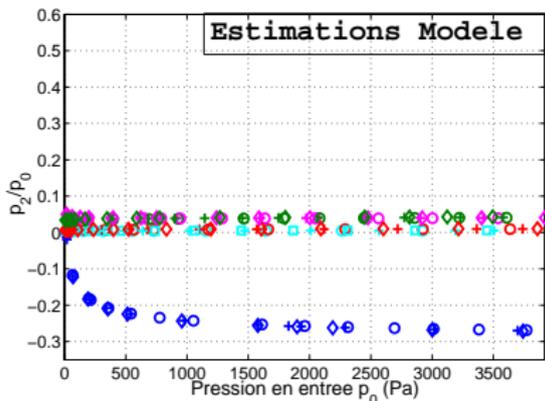
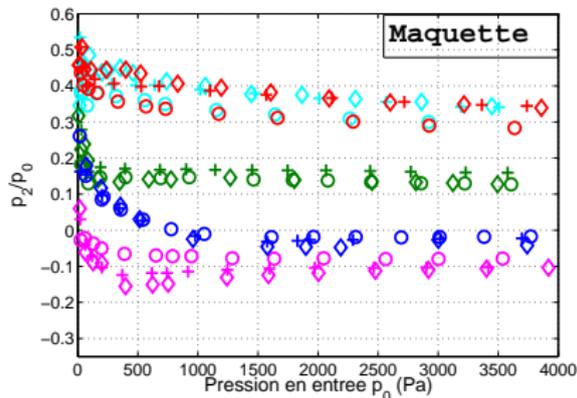
- Débit (et p_1) : changement négligeable ($< 5\%$).



Ajout des pertes pour l'élargissement post-constriction

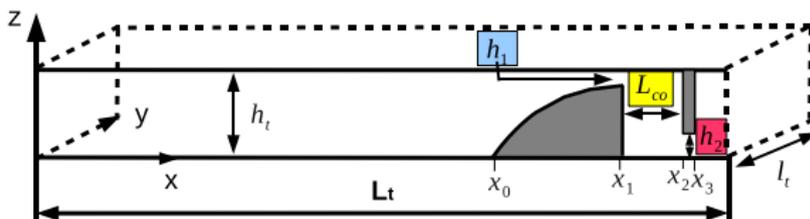


- Débit (et p_1) : changement négligeable ($< 5\%$).
- Pression p_2 (dents) : prédiction de $p_2 < 0$ quand $h_2 = 0.6\text{ mm}$, mais pertes surestimées. Effets de viscosité bien prédits (Poiseuille).
- Autres ouvertures : effets de h_2 et L_{co} non retrouvés qualitativement.

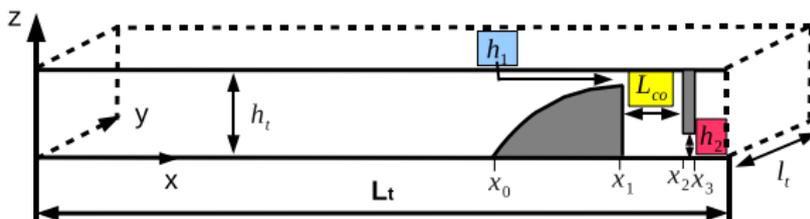


- 1 Introduction
- 2 Vers la modélisation physique des fricatives
 - Eléments de l'état de l'art
 - Modèle proposé et objectifs de l'étude
- 3 Influence des paramètres géométriques du modèle
 - Banc expérimental pour les mesures avec la maquette
 - Evolution fréquentielle du bruit rayonné
 - Evolution de la pression en entrée de l'écoulement
- 4 Etude du comportement de l'écoulement en maquette
 - Localisation des pertes de charge le long du canal
 - Mécanismes de l'écoulement : apport de la modélisation
- 5 Bilan et perspectives

- Intérêt du modèle et des paramètres géométriques considérés :
 - Reproductibilité de phénomènes aéroacoustiques liés aux fricatives.
 - Influence significative de la **hauteur de la constriction aux dents (h_2)** – par rapport à **la hauteur de constriction à la langue (h_1)**. Deux cas principaux avec phénomènes aéroacoustiques différents pour le bruit rayonné.
 - Influence non négligeable de la distance langue-dents pour les plus grandes ouvertures ($h_2 \geq 2.6$ mm).



- Intérêt du modèle et des paramètres géométriques considérés :
 - Reproductibilité de phénomènes aéroacoustiques liés aux fricatives.
 - Influence significative de la **hauteur de la constriction aux dents (h_2)** – par rapport à la **hauteur de constriction à la langue (h_1)**. Deux cas principaux avec phénomènes aéroacoustiques différents pour le bruit rayonné.
 - Influence non négligeable de la distance langue-dents pour les plus grandes ouvertures ($h_2 \geq 2.6$ mm).



- Répartition des pertes de charge le long de la maquette : varie principalement selon la **hauteur de la constriction aux dents** :
 - *Inférieure* à h_1 : pertes importantes entre langue et constriction dents
 - **Supérieure** à h_1 : pertes amont constriction langue + aval de la constriction dents

■ Modélisation des pertes liées à la turbulence :

- Importance du terme de Bernoulli pour les *petites ouvertures* aux dents.
- Effets qualitativement retrouvés par les modèles théoriques d'écoulement en amont de l'obstacle, prédictions améliorées quantitativement avec les **pertes associées à la turbulence en conduite coudée**. pour **les grandes ouvertures**.
- Difficultés à prédire la **pression à l'obstacle : écoulement en aval et séparation**.

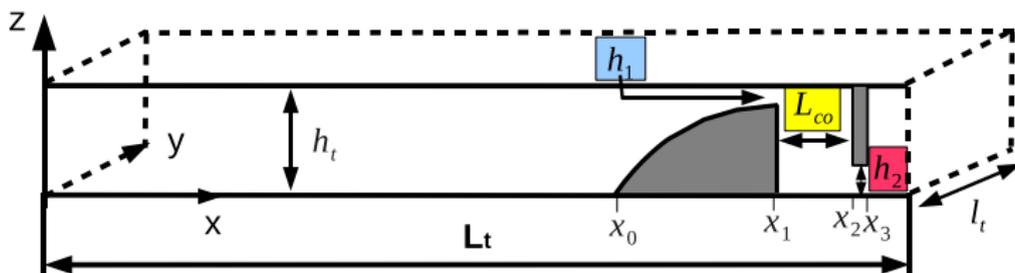
■ Modélisation des pertes liées à la turbulence :

- Importance du terme de Bernoulli pour les *petites ouvertures* aux dents.
- Effets qualitativement retrouvés par les modèles théoriques d'écoulement en amont de l'obstacle, prédictions améliorées quantitativement avec les **pertes associées à la turbulence en conduite coudée**. pour **les grandes ouvertures**.
- Difficultés à prédire la **pression à l'obstacle : écoulement en aval et séparation**.

Perspectives dans la poursuite de cette étude

- Analyse des fluctuations de pression mesurées.
- Visualisation d'écoulement à l'intérieur de la maquette et mesures de champs de vitesse.
- Améliorer la complexité de la maquette de conduit vocal pour tendre vers la réalité (ajout d'une seconde dent, forme des constrictionns ronde-elliptique, langue arrondie).

Merci pour votre attention !





Blevins, R. (1992).

Applied fluid dynamics handbook.



Howe, M. and McGowan, R. (2005).

Aeroacoustics of [s].

Proc. R. Soc. A, 461:1005–1028.



Narayanan, S. and Alwan, A. (2000).

Noise source models for fricative consonants.

IEEE Transactions on speech and audio processing, 8(2):328–344.



Pelorson, X., Hirschberg, A., Van Hasselt, R., Wijnands, A., and Auregan, Y. (1994).

Theoretical and experimental study of quasisteady-flow separation within the glottis during phonation. application to a modified two-mass model.

J. Acoust. Soc. Am., 96(6):3416–3431.



Sataloff, R. (1992).

The human voice.

Scientific American.



Shadle, C. (1990).

Articulatory-acoustic relationships in fricative consonants.

Speech Production and Speech modeling, pages 187–209.



Shadle, C., Berezina, M., Proctor, M., and Iskarous, K. (2008).

Mechanical models of fricatives based on mri-derived vocal tract shapes.

In Proceedings of 8th International Seminar on Speech Production, pages 417–420. ISSP.



Stevens, K. (1971).

Airflow and turbulence noise for fricative and stop consonants : static considerations.

Journal of the Acoustical Society of America, 50 (4):1180 – 1192.

l.



Toda, M. (2006).

Deux stratégies articulatoires pour la réalisation du contraste acoustique des sibilantes /s/ et /ʃ/ en français.

In Journées d'Etudes de la Parole.