

Vendredi 19 Novembre 2004

**Caractérisation statistique des sources aéroacoustiques en jets supersoniques
par vélocimétrie Laser à effet Doppler:
application à la prédiction du bruit de jet.**

F. Kerhervé



Laboratoire d'Etudes Aérodynamiques



Région
Poitou
Charentes
La démocratie participative



Trinity College Dublin



Marie Curie Fellowships

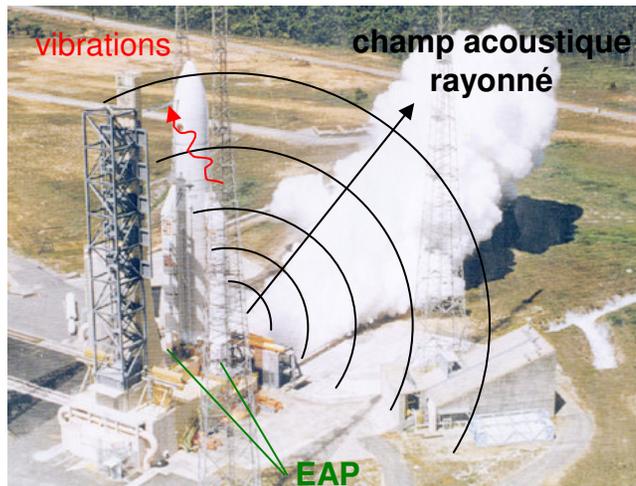
Introduction (1/3)

« **Caractérisation statistique des sources aéroacoustiques en jets supersoniques par vélocimétrie laser à effet Doppler:**
application à la prédiction du bruit de jet. »

Enjeux des études de prédiction du bruit d'écoulements

- Respect des **règles environnementales** (aviation civile)
- Enjeux stratégiques, **choix technologiques** (industries, aviation militaire, aérospatiale etc...)

Cas des lanceurs spatiaux ARIANE (CNES*)



Puissance acoustique au décollage de l'ordre de 190dB

Effets **vibro-acoustiques** non-négligeables

Effets dommageables possibles sur

- les éléments sensibles du lanceur
- la charge utile

➔ Etudes technologiques de **réduction de bruit** (injection d'eau, carneaux etc...)

*Centre National des Etudes Spatiales

Problématique sous-jacente à la prédiction du bruit rayonné:

Identification des **mécanismes de génération de bruit** internes à l'écoulement

- Etude directe du champ acoustique rayonné
 - ➔ Localisation des régions sources
(pas de réelle prédiction possible d'une configuration à l'autre)
- Etude de la dynamique de l'écoulement
 - ➔ Identification des sources
 - ➔ Lien avec le champ acoustique rayonné

Approches prédictives possibles

- Approches numériques complètes (LES, DNS)
- Approches statistiques
 - ➔ Modélisation des sources de bruit pour un écoulement permanent
 - ➔ **Traitement statistique** des sources et de leurs interactions
(analogie aéroacoustique)

Approche statistique du champ acoustique rayonné

➔ Relier les organisations spatiale et temporelle des sources de bruit au champ acoustique rayonné.

- Modélisation de la distribution spatiale de l'énergie des termes sources
(*Grandeurs aérodynamiques*)

- Champ de vitesse moyen et rms
- Energie cinétique de turbulence
- Composition spectrale du champ turbulent

- Modélisation des organisations spatiales et temporelles des sources
(*Grandeurs statistiques caractéristiques des sources aéroacoustiques*)

- Tenseur de corrélations spatio-temporelles
- Echelles intégrales de temps et de longueur
- Vitesse de convection

Métrologie employée pour la phase expérimentale:

Vélocimétrie Laser à effet Doppler

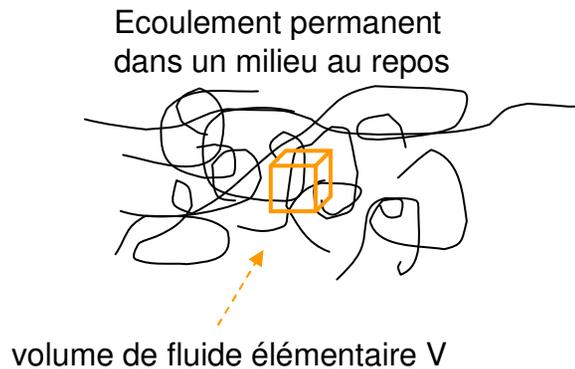
➔ Technique non invasive et adaptée aux écoulements très chauds

Plan de la présentation

- Introduction
- Bases théoriques
Analogie aéroacoustique de Lighthill et Application au bruit de jet
- Dispositifs expérimentaux et outils d'analyse
- Grandeurs aérodynamiques et Dynamique spectrale
- Caractérisation statistique des composantes aéroacoustiques
- Propositions de modélisation
- Application à la prédiction du bruit de jet
Simulations numériques
- Conclusions et Perspectives

Relier la turbulence au champ acoustique rayonné

Etablir une expression analytique de l'intensité acoustique rayonnée par un écoulement libre à partir des équations "classiques" de la mécanique des fluides.



Conservation de la quantité de mouvement (Navier-Stokes):

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j}$$

Conservation de la masse:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = 0$$

Equation d'onde inhomogène (milieu extérieur au repos), Lighthill 1952

$$\underbrace{\frac{\partial^2 \rho}{\partial t^2} - c_o^2 \Delta \rho}_{\text{opérateur d'onde}} = \underbrace{\frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \left[\rho u_i u_j + (p - c_o^2 \rho) \delta_{ij} - \tau_{ij} \right]}_{\text{terme source}}$$

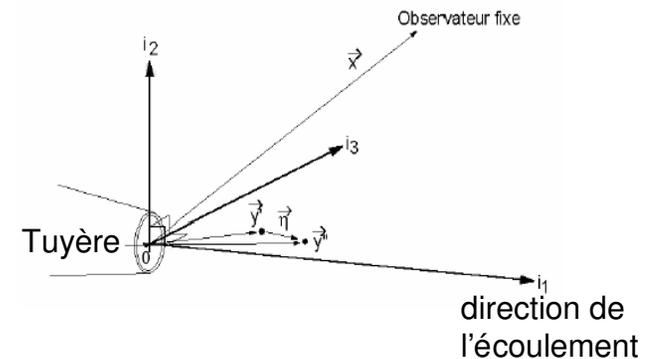
- Instationarité des forces convectives non linéaires
- Source d'origine thermique
- Fluctuations du tenseur des contraintes visqueuses

Fluctuations de masse volumique en champ lointain

Etude en champ lointain

- formalisme des fonctions de Green en espace libre –
résolution de l'équation d'onde inhomogène de Lighthill,
⇒ **fluctuations de masse volumique**

$$\rho'(\vec{x}, t) = \frac{x_i x_j}{4\pi c_o^4 |\vec{x}|^3} \int_V \frac{\partial^2 T_{ij}}{\partial t^2} \left(\vec{y}, t - \frac{|\vec{x}|}{c_o} \right) d\vec{y}$$



Intensité acoustique rayonnée en champ lointain

Le champ acoustique rayonné résulte de la **contribution d'un ensemble de sources de bruit qui interagissent entre elles** (Lighthill, 1952).

Goldstein, 1966:

$$I(\vec{x}, \tau) = \frac{x_i x_j x_k x_l}{16\pi^2 c_o^5 \rho_o |x|^6} \iint_V \frac{\partial^4}{\partial \tau^4} T_{ij}(y', t) T_{kl}(y' + \eta, t + \frac{x \cdot \eta}{c_o |x|} + \tau) dy' d\eta$$

acoustique

$$R_{ijkl} \left(y', \eta, \tau + \frac{x \cdot \eta}{c_o |x|} \right)$$

turbulence

tenseur de corrélations spatio-temporelles

Reformulation dans un repère mobile

Nature convective

Modification des fréquences intrinsèques perçues par un observateur fixe (effet Doppler)
Introduction du concept de repère mobile se déplaçant avec le champ turbulent.

(changement de variables: $\vec{\xi} = \vec{\eta} - \vec{i} U_c \tau$)

Nature potentiellement non compacte (efficacité acoustique)

Conservation du temps de retard lié au décalage perçue entre les ondes émises par deux volumes sources

Ffowcs-Williams, 1963

$$I(x, \tau) = \frac{x_i x_j x_k x_l}{16\pi^2 c_o^5 \rho_o |x|^6} \iint_V \frac{1}{C_D^5} \frac{\partial^4}{\partial \tau^4} R_{ijkl}(y', \xi, \tau/C_D) dy' d\xi$$

facteur d'amplification Doppler $C_D(M_c, \theta) = \left[(1 - M_c \cos \theta)^2 + \alpha^2 M_c^2 \right]^{1/2}$

Interprétation physique

$$I(x, \tau) = \frac{x_i x_j x_k x_l}{16\pi^2 c_o^5 \rho_o |x|^6} \int \int_V \frac{1}{C_D^5} \frac{\partial^4}{\partial \tau^4} R_{ijkl}(y', \xi, \tau/C_D) d\xi dy'$$

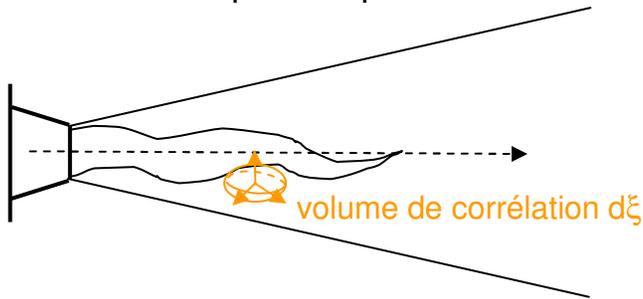
bruit total

\propto **bruit émis par le volume de fluide élémentaire**

(modélisation)

- Devenport et al, 2001 (turbulence anisotrope non-homogène)
- Chandrasekhar, 1950 (turbulence axysimétrique)
- Batchelor, 1953 (turbulence isotrope homogène)

Jet turbulent libre quelconque



- Dimensions spatiales (**échelles intégrales de longueurs**)
- Pulsation caractéristique (**échelle intégrale temporelle**)

$$l_{ijkl}^m = \int_0^{+\infty} R_{ijkl}^*(y, \xi_m, 0) d\xi_k \quad \tau_{ijkl}^m = \int_0^{+\infty} R_{ijkl}^*(y, \xi_m = 0, \tau) d\tau$$

Nature des contributions

■ **Identification des différentes contributions**

Tenseur de Lighthill,

$$T_{ij} = \underbrace{\rho u_i u_j}_{\text{sources d'origine aérodynamique}} + \underbrace{(p - c_o^2 \rho) \delta_{ij}}_{\text{sources d'origine thermique}} \quad S = \frac{\partial}{\partial t}(p - \rho c_o^2)$$

$$A_{ij} = \rho u_i u_j$$

$$I(x, \tau) = \frac{x_i x_j x_k x_l}{16\pi^2 c_o^5 \rho_o |x|^6} \left[\frac{\partial^4}{\partial \tau^4} \iint \frac{1}{C_D^5} \widetilde{A}_{ij} \widetilde{A}_{kl} \widetilde{r}_{ijkl}^a(y, \xi, \tau/C_D) dy' d\xi \right. \\ \left. + \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \iint \frac{1}{C_D^5} \widetilde{S}_{ij} \widetilde{S}_{kl} \widetilde{r}_{ijkl}^s(y, \xi, \tau/C_D) dy' d\xi \right. \\ \left. + 2 \frac{\partial^3}{\partial \tau^3} \iint \frac{1}{C_D^5} \widetilde{A}_{ij} \widetilde{S}_{kl} \widetilde{r}_{ijkl}^m(y, \xi, \tau/C_D) dy' d\xi \right]$$

interactions

“aérodynamique/aérodynamique”

“thermique/thermique”

“mixte”

mesures 1-point mesures 2-points

Développement du tenseur de corrélation turbulentes

Théorie de Ribner, 1969

$$R_{ijkl}^a(y, \xi, \tau) = \overline{u'_{ti} u'_{tj} u''_{tk} u''_{tl}} + U' U'' (\delta_{ik} \overline{u'_{tj} u''_{tl}} + \delta_{jl} \overline{u'_{ti} u''_{tk}} + \delta_{jk} \overline{u'_{ti} u''_{tl}} + \delta_{il} \overline{u'_{tj} u''_{tk}}) - U' (\delta_i \overline{u'_{tj} u''_{tk} u''_{tl}} + \delta_j \overline{u'_{ti} u''_{tk} u''_{tl}}) - U'' (\delta_k \overline{u'_{ti} u'_{tj} u''_{tl}} + \delta_l \overline{u'_{ti} u'_{tj} u''_{tk}})$$

ordre 4 « **bruit propre** »
 ordre 2 « **bruit de cisaillement** »
 ordre 3

Dimension du tenseur de corrélation:

	Br. Cisaillement	Br. Propre	
$\overline{u'_1 u'_1 u''_1 u''_1} \int =$	$4U' U'' \overline{u'_{t1} u''_{t1}}$	$\overline{u'^2_{t1} u''^2_{t1}}$	1
$\overline{u'_1 u'_2 u''_1 u''_2} \int =$	$U' U'' \overline{u'_{t2} u''_{t2}}$	$\overline{u'_{t1} u'_{t2} u''_{t1} u''_{t2}}$	4
$\overline{u'_1 u'_3 u''_1 u''_3} \int =$	$U' U'' \overline{u'_{t3} u''_{t3}}$	$\overline{u'_{t1} u'_{t3} u''_{t1} u''_{t3}}$	4
$\overline{u'_1 u'_1 u''_2 u''_2} \int =$		$\overline{u'^2_{t1} u''^2_{t2}}$	2
$\overline{u'_1 u'_1 u''_3 u''_3} \int =$		$\overline{u'^2_{t1} u''^2_{t3}}$	2
$\overline{u'_2 u'_2 u''_2 u''_2} \int =$		$\overline{u'^2_{t2} u''^2_{t2}}$	1
$\overline{u'_3 u'_3 u''_3 u''_3} \int =$		$\overline{u'^2_{t3} u''^2_{t3}}$	1
$\overline{u'_2 u'_3 u''_2 u''_3} \int =$		$\overline{u'_{t2} u'_{t3} u''_{t2} u''_{t3}}$	2
$\overline{u'_2 u'_2 u''_3 u''_3} \int =$		$\overline{u'^2_{t2} u''^2_{t3}}$	2

➡ Indépendance de la directivité de chacune des composantes quadripolaires.

Détermination complète du tenseur de corrélation **irréaliste**:

- ➡ 36 corrélations quadripolaires x 4D
- ➡ hypothèses simplificatrices

Cas particulier d'hypothèse de turbulence isotrope

$$R_{ijkl}^a(y, \xi, \tau) \sim \overline{u'^2_{t1} u''^2_{t1}} + 4U' U'' \overline{u'_{t1} u''_{t1}}$$

Travaux expérimentaux existants

régimes	détermination des échelles turbulentes caractéristiques	calcul du champ acoustique rayonné
subsonique ou subcritique	Laurence, 1956	x
	Davies et al, 1963	x
	Fisher and Davies, 1964	x
	Chu, 1966	turbulence inhomogène, anisotropie, modèle de corrélation gaussien
	[Seiner and Reethof, 1974]	x
	Jordan et al, 2003	hypothèse d'anisotropie, modèle de corrélation gaussien, contribution individuelle des quadrapoles
	Harper-Bourne, 2003	référentiel fixe, hypothèse d'anisotropie, modèle de corrélation gaussien, dépendance fréquentielle des échelles de turbulences
	[Ohara et al, 2004	anisotropie, inhomogénéité]
supersonique	Lau et al, 1979	x
	Lau, 1980	x

Plan de la présentation

- Introduction
- Bases théoriques
Analogie aéroacoustique de Lighthill et Application au bruit de jet
- **Dispositifs expérimentaux et outils d'analyse**
- Grandeurs aérodynamiques et Dynamique spectrale
- Caractérisation statistique des composantes aéroacoustiques
Modélisation simplifiée du tenseur de corrélation
- Amélioration de la modélisation
- Application à la prédiction du bruit de jet
Simulations numériques
- Conclusions et Perspectives

Jet supersonique FROID (263K et 380m/s), tuyère 52mm

Mesures du champ de vitesse par VLD 1 point et 1D

- grandeurs aérodynamiques –
- dynamique spectrale du champ turbulent –

Mesures par VLD 2 points et 1D

- propriétés turbulentes statistiques -

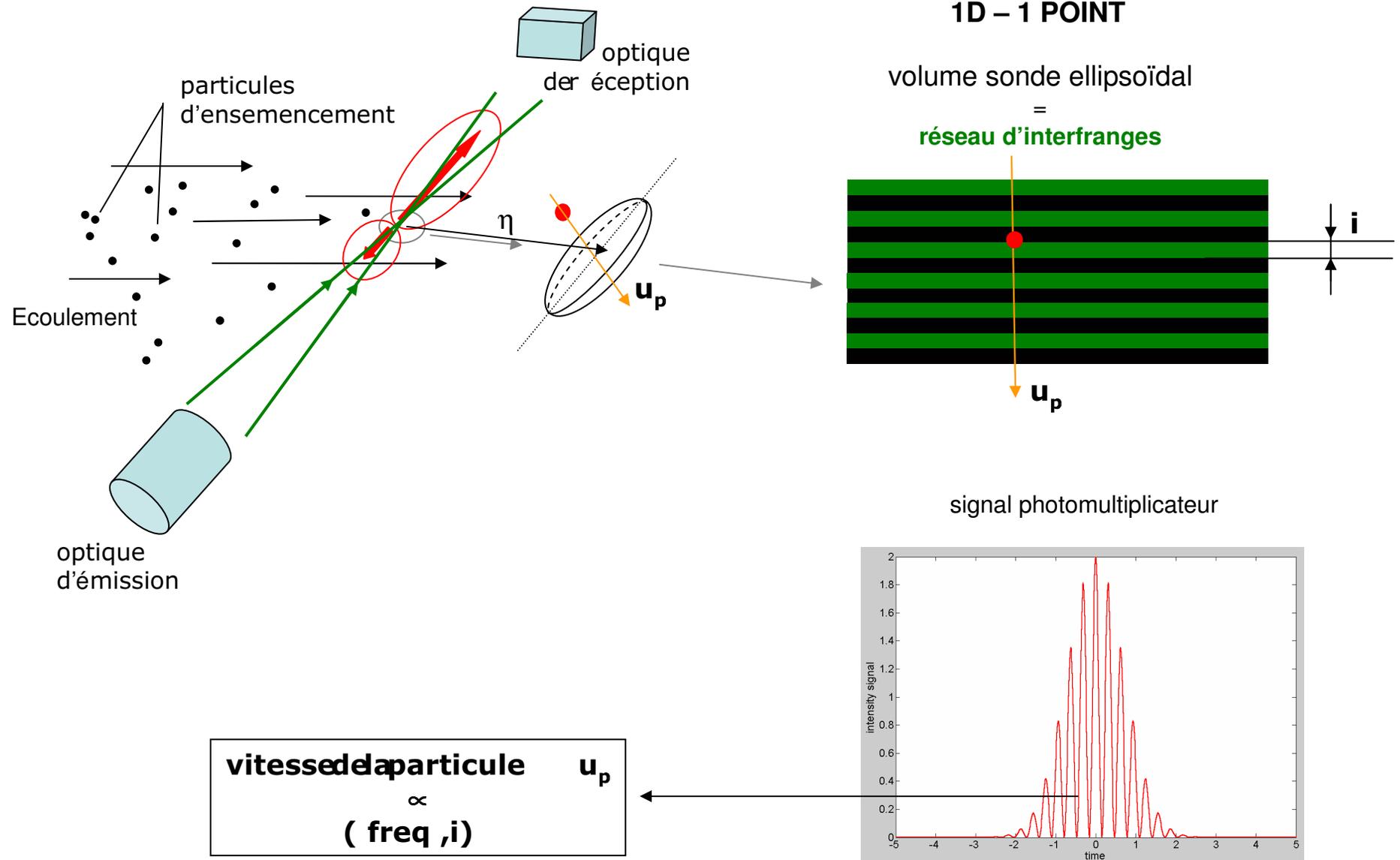
Jet supersonique CHAUD (~900K et 1700m/s), tuyère 50mm

Mesures du champ de vitesse par VLD 1 point et 2D

- grandeurs aérodynamiques –

Mesures simultanées de pression acoustique en champ lointain

Vélocimétrie Laser à Effet Doppler



Propriétés des signaux de vélocimétrie Laser Doppler

Jet supersonique froid: **25kHz~40kHz**

Jet supersonique chaud: **15kHz~20kHz**

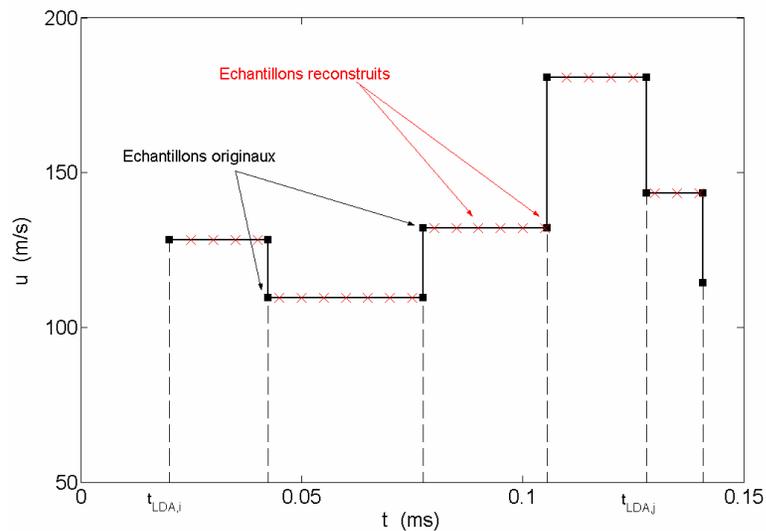
Echantillonnage irrégulier

Développement de procédures de traitement adaptées pour l'analyse spectrale

Reconstruction préalable du signal

Simon & Fitzpatrick 2004

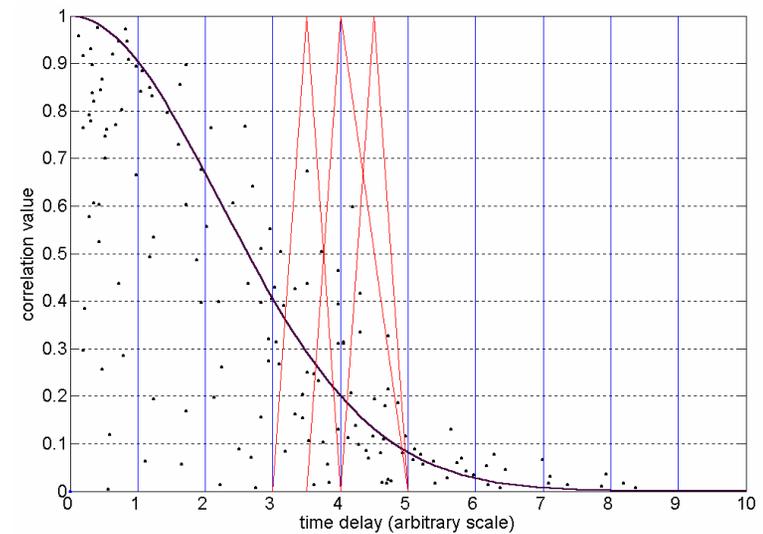
(*"sample-and-hold reconstruction scheme"*)



Calcul direct de la fonction de corrélation

Nobach 1998

(*technique de classification par case*)

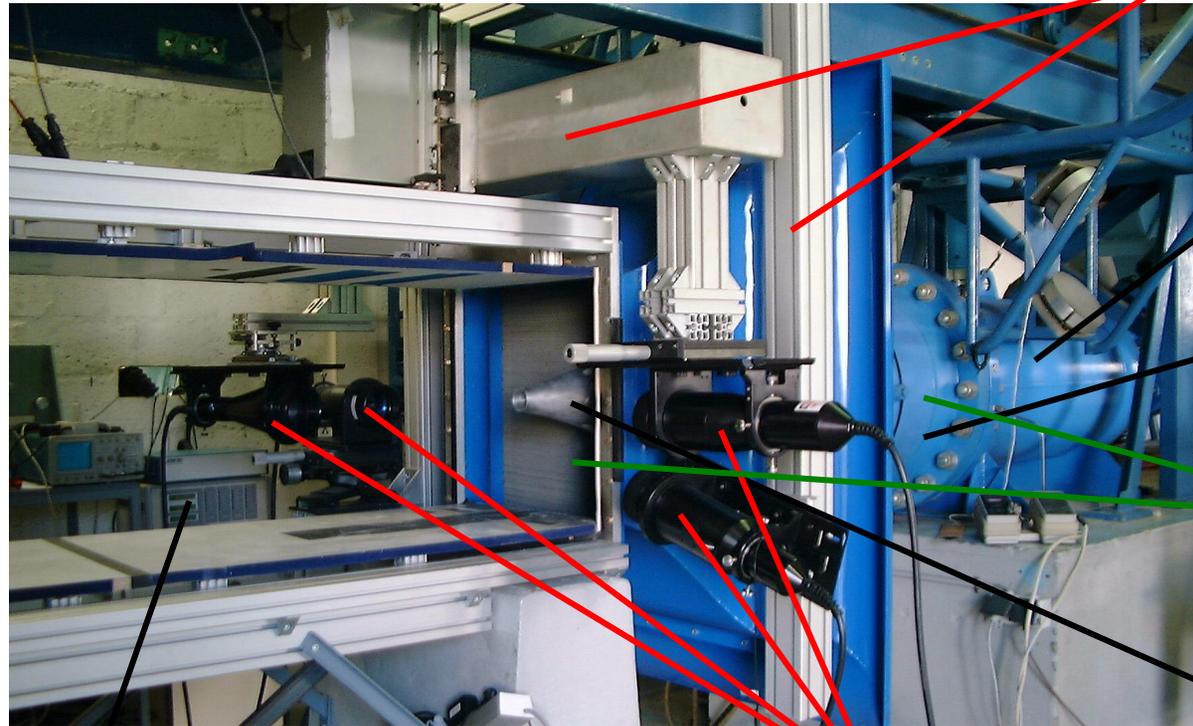


Etude comparative des deux techniques d'estimation pour des signaux réels

Kerhervé *et al*, 2004

Jet supersonique FROID (263K et 380m/s), tuyère 52mm

Soufflerie supersonique S150 du CEAT* de Poitiers



systemes de déplacement 2 axes
pas de 0.1mm

chambre de tranquillisation

convergent

ensemencement mixte
particules de SiO₂
~ 0.3µm

tuyère CD, Mach 1,3

veine d'essai
500x500 mm²

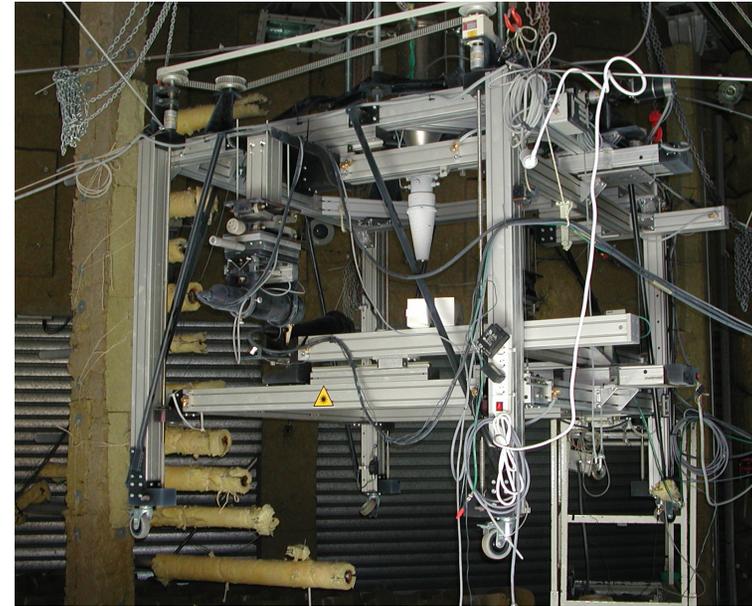
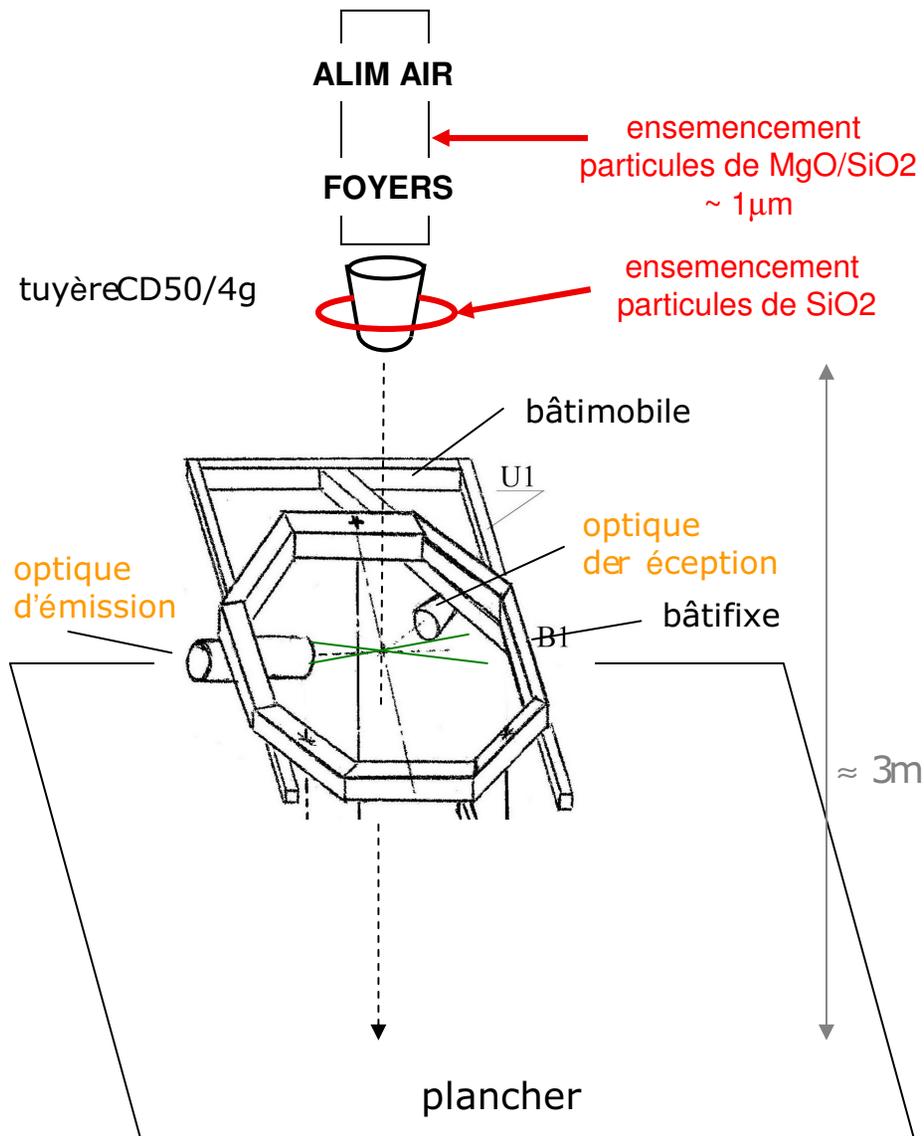
optiques laser
(2x émission-réception)

Absence de traitement acoustique

*Centre d'Etudes Aérodynamiques et Thermiques

Jet supersonique CHAUD (~900K et 1500m/s), tuyère 50mm

Banc MARTEL*



Contraintes

- Configuration de l'installation
- Règles de sécurité en phase de fonctionnement
- Ensemencement
- Gradients de température

Dispositifs mis en place

- Pilotage à distance
- Correction des faisceaux en temps réel
- Caméras de contrôle

* Moyen Aéroacoustique de Recherche et de Technologie sur l'Environnement des Lanceurs

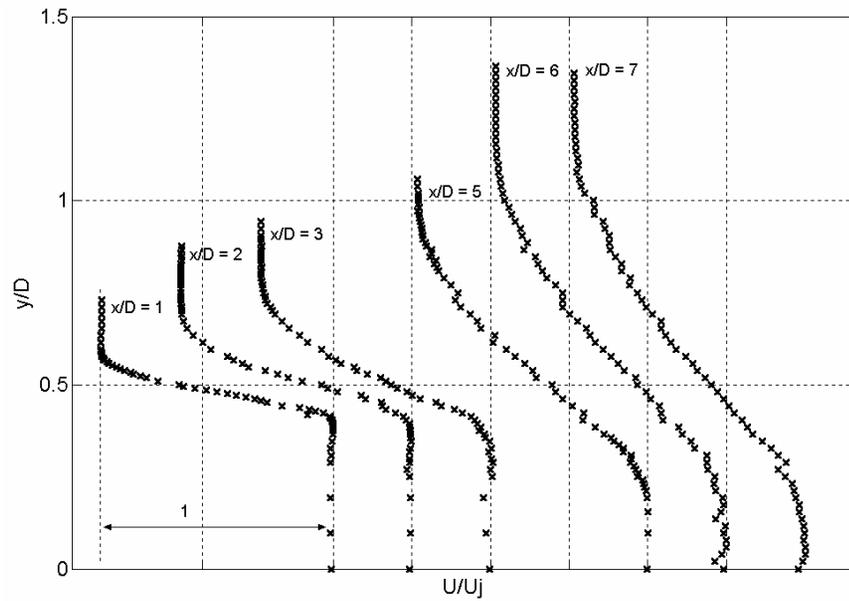
Plan de la présentation

- Introduction
- Bases théoriques
Analogie aéroacoustique de Lighthill et Application au bruit de jet
- Dispositifs expérimentaux et outils d'analyse
- **Grandeurs aérodynamiques et Dynamique spectrale**
- Caractérisation statistique des composantes aéroacoustiques
- Propositions de modélisation
- Application à la prédiction du bruit de jet
Simulations numériques
- Conclusions et Perspectives

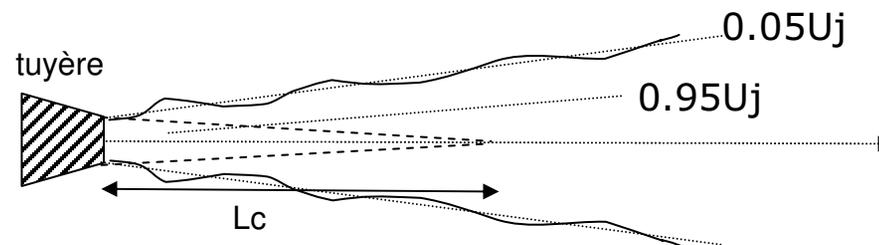
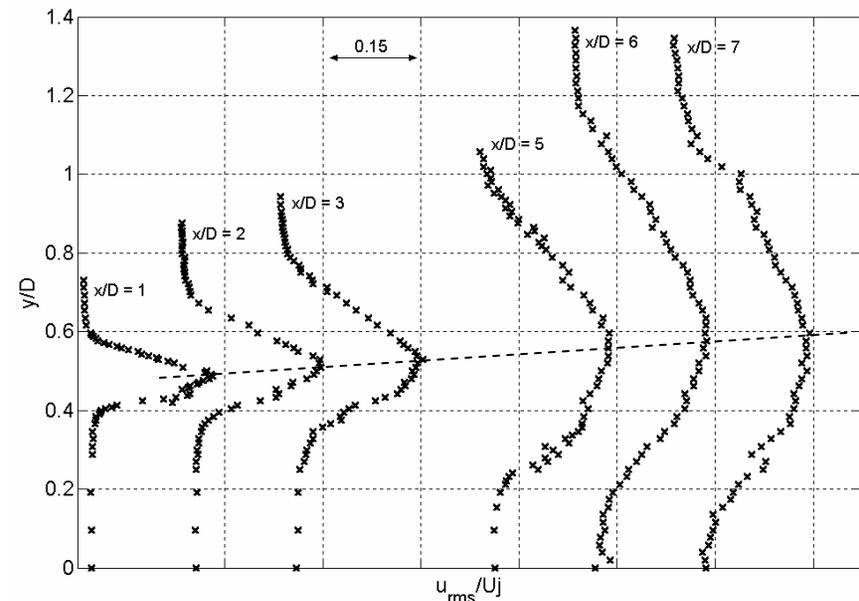
Caractérisation aérodynamique des jets étudiés

Jet supersonique froid

Vitesse moyenne longitudinale

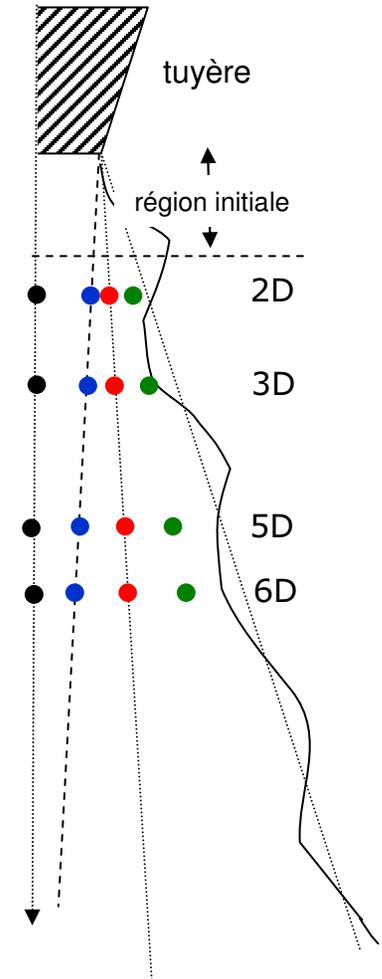
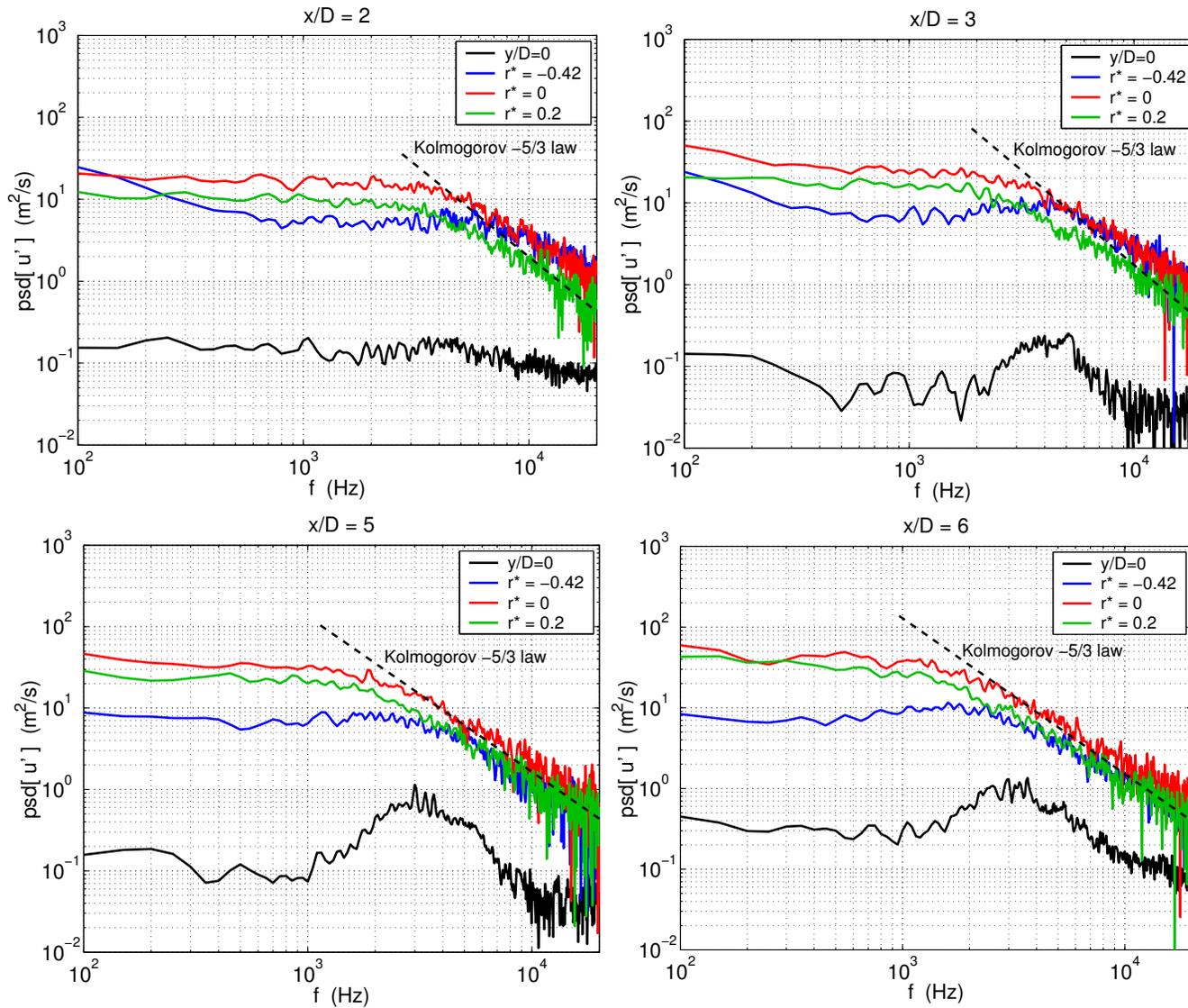


Vitesse rms longitudinale



Jet supersonique froid S150 (380m/s 263K)

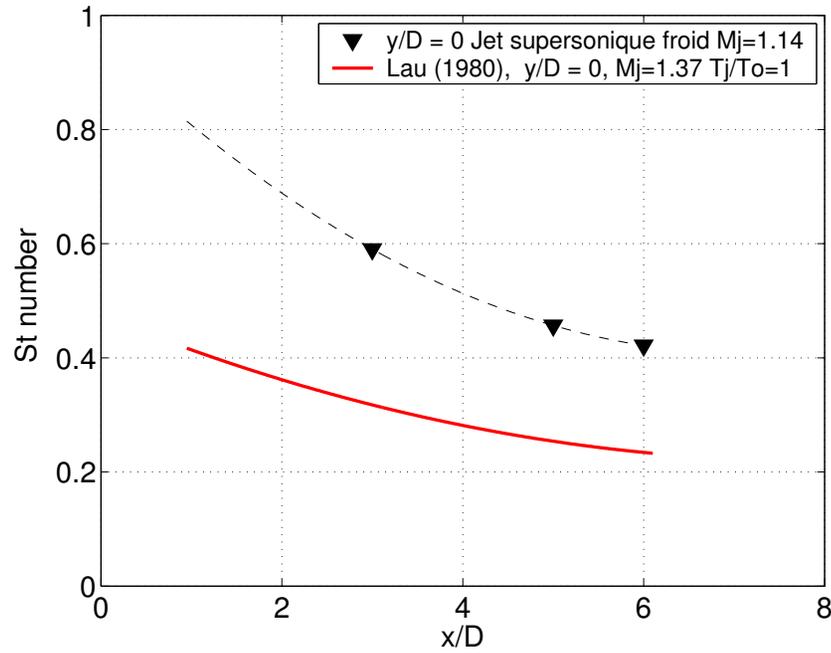
Spectre des fluctuations longitudinales de la vitesse



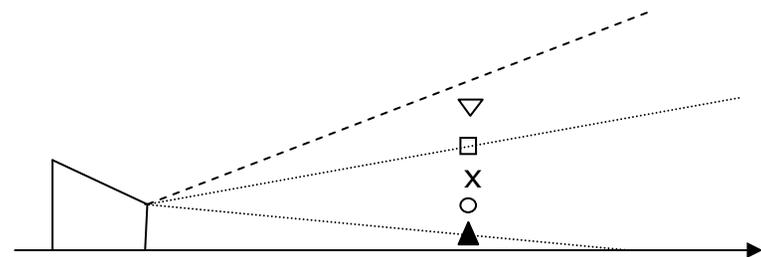
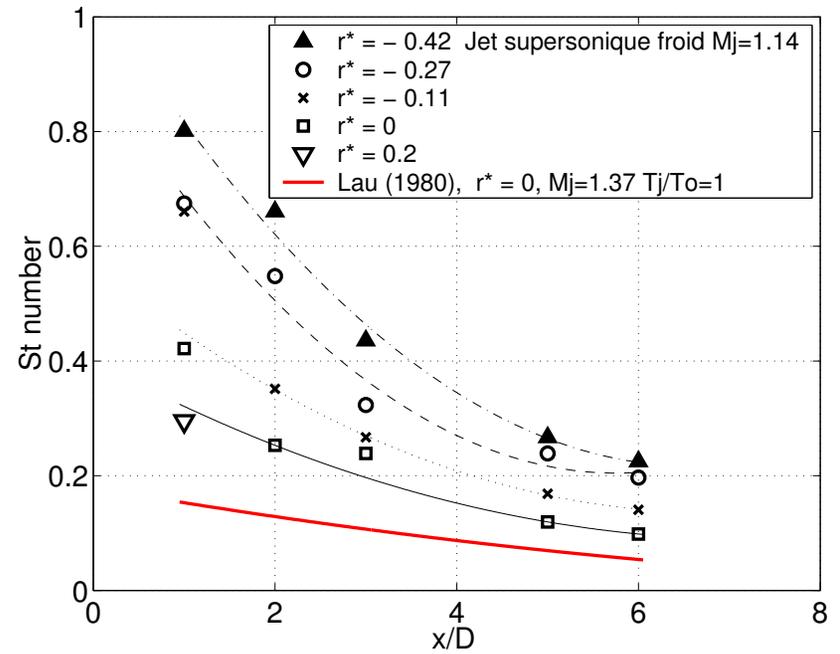
Jet supersonique froid S150 (380m/s 263K)

Evolution de l'instabilité dominante

Distributionsur l'axedujet



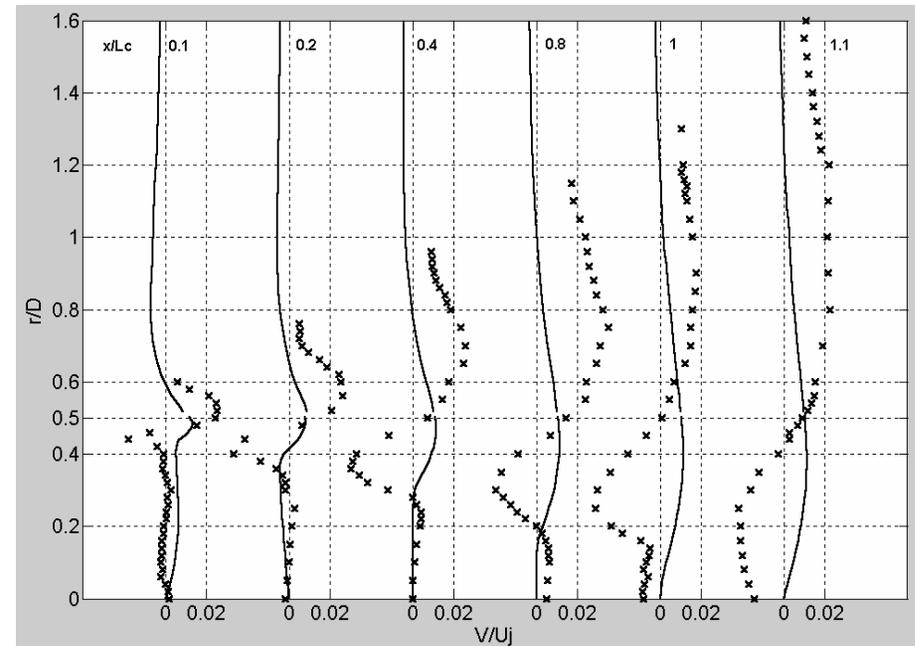
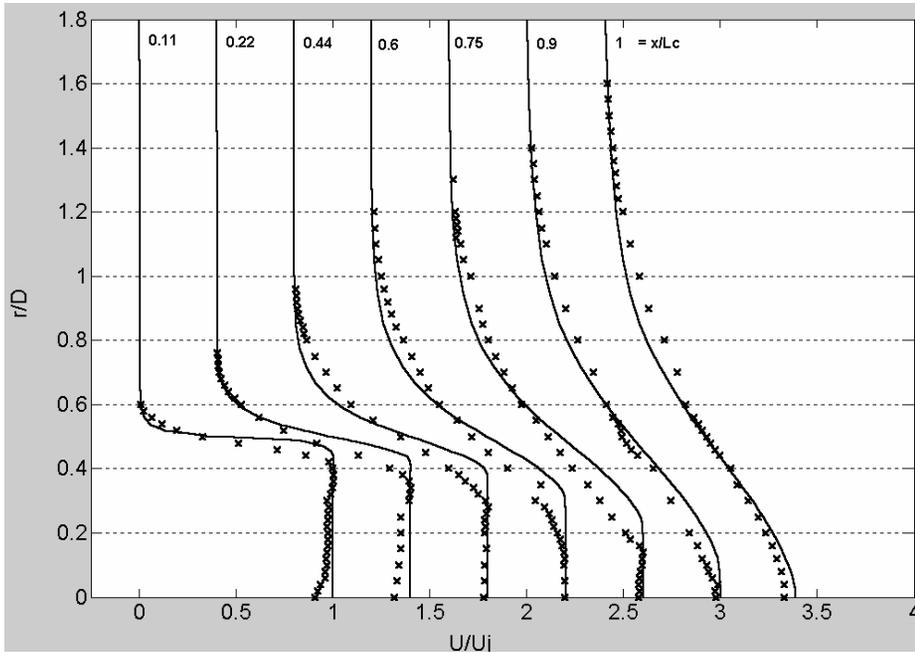
Distributiondanslacouchedemélange



Caractérisation aérodynamique des jets étudiés

Jet supersonique chaud MARTEL

Vitesses moyennes longitudinale et radiale



Longueur du cône potentiel:

- Expérience: 10D
- Simulations: 16D

x : mesures

— : simulations numériques AMLJET (EADS-LV*)

* European Aeronautics Defence and Space Company - Launch Vehicle

Plan de la présentation

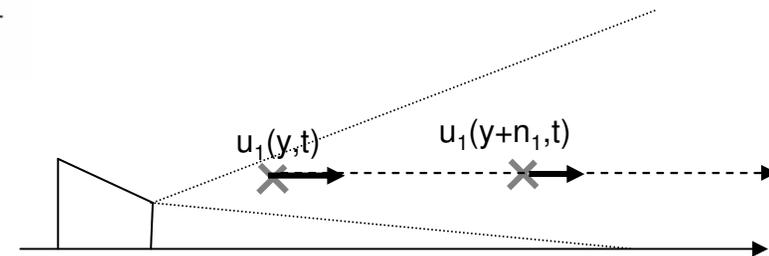
- Introduction
- Bases théoriques
Analogie aéroacoustique de Lighthill et Application au bruit de jet
- Dispositifs expérimentaux et outils d'analyse
- Grandeurs aérodynamiques et Dynamique spectrale
- **Caractérisation statistique des composantes aéroacoustiques**
- Propositions de modélisation
- Application à la prédiction du bruit de jet
Simulations numériques
- Conclusions et Perspectives

Détermination des propriétés turbulentes intégrales

Configuration de jet supersonique (380m/s) et froid (263K)

Fonction de corrélation spatio-temporelle d'ordre 2

$$r_{ij}(y, \eta, \tau) = \frac{\overline{u_{ti}(y, t) \cdot u_{tj}(y + \eta, t + \tau)}}{[\sigma_i \cdot \sigma_j]^{1/2}} \quad \sigma_i = \overline{u_{ti}^2}$$



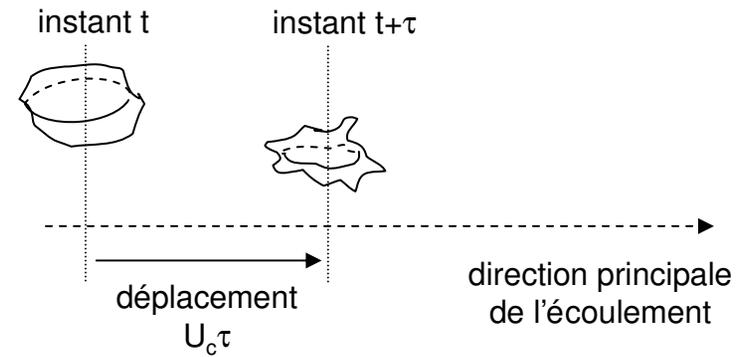
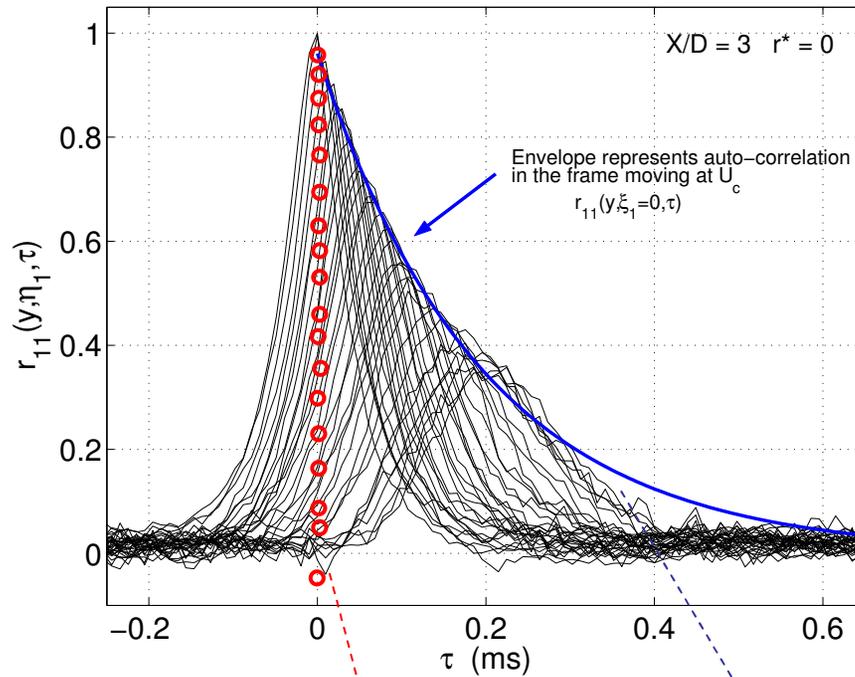
- ➔ Caractérise la région du fluide sur laquelle le champ turbulent local reste bien corrélé et son évolution temporelle

$$r_{ij}(y, \eta, \tau) = f(\ell_{ij}^1, \ell_{ij}^2, \ell_{ij}^3, \tau_{ij})$$

échelles caractéristiques **relatives**
aux sources aéroacoustiques

- ➔ **Détermination des échelles caractéristiques**
(efficacité et dynamique des mécanismes de conversion de l'énergie cinétique turbulente)
- ➔ **Validation d'un modèle de distribution de sources** en écoulement supersonique

Détermination des échelles caractéristiques intégrales

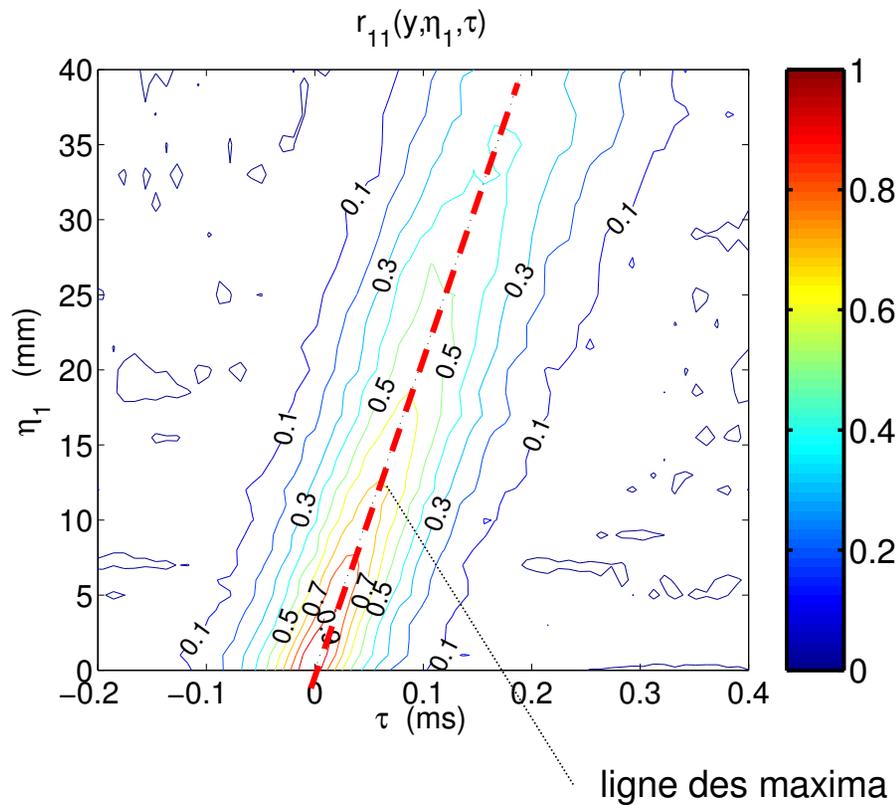


$$\ell = \int_0^{+\infty} r_{11}(y, \eta_1, 0) d\eta_1$$

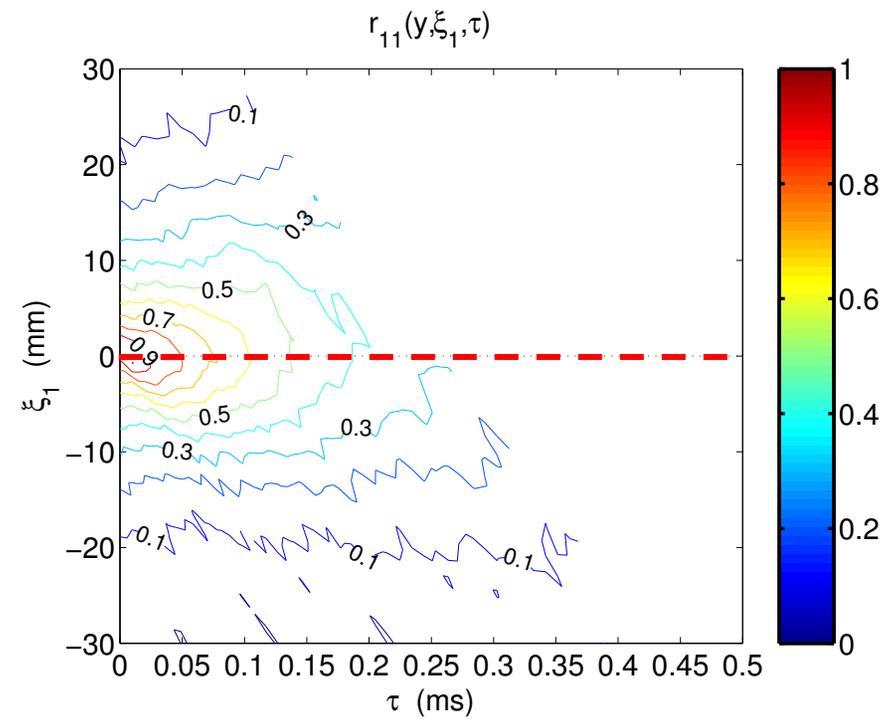
$$\tau_\xi = \int_0^{+\infty} r_{11}(y, U_c \tau, \tau) d\tau$$

Détermination de la vitesse de convection

iso-contours de corrélation



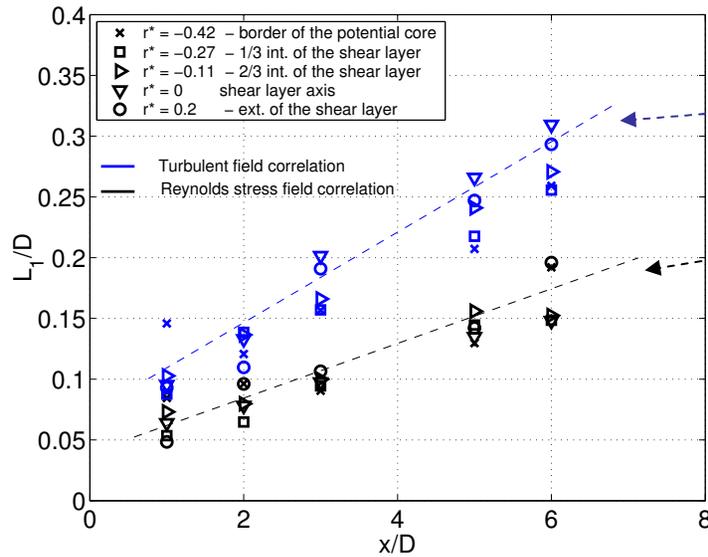
- REPERÉFIXE -



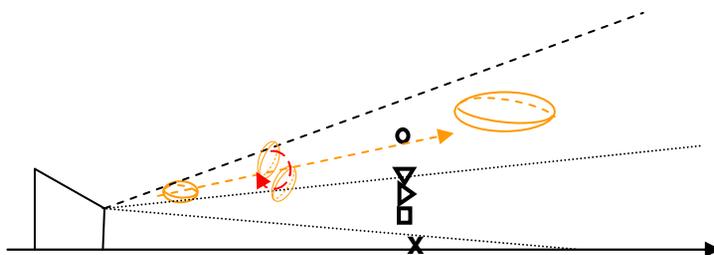
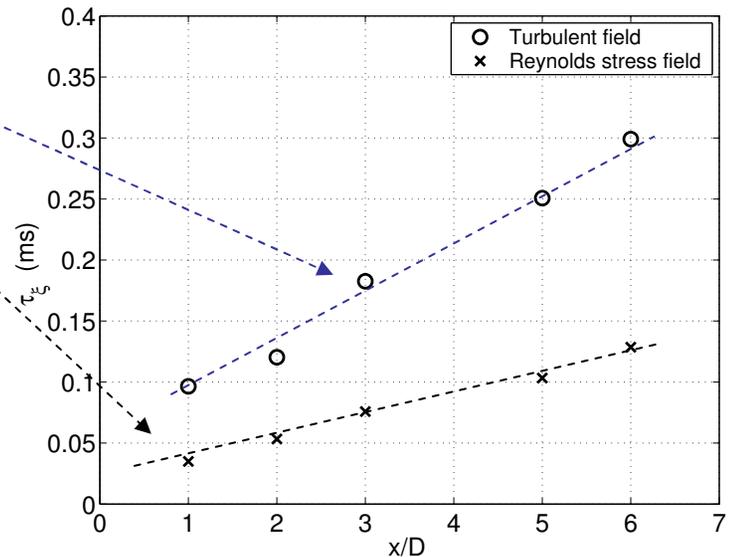
- REPEREMOBILE -

Evolution des échelles intégrales turbulentes

Echelle intégrale de longueur

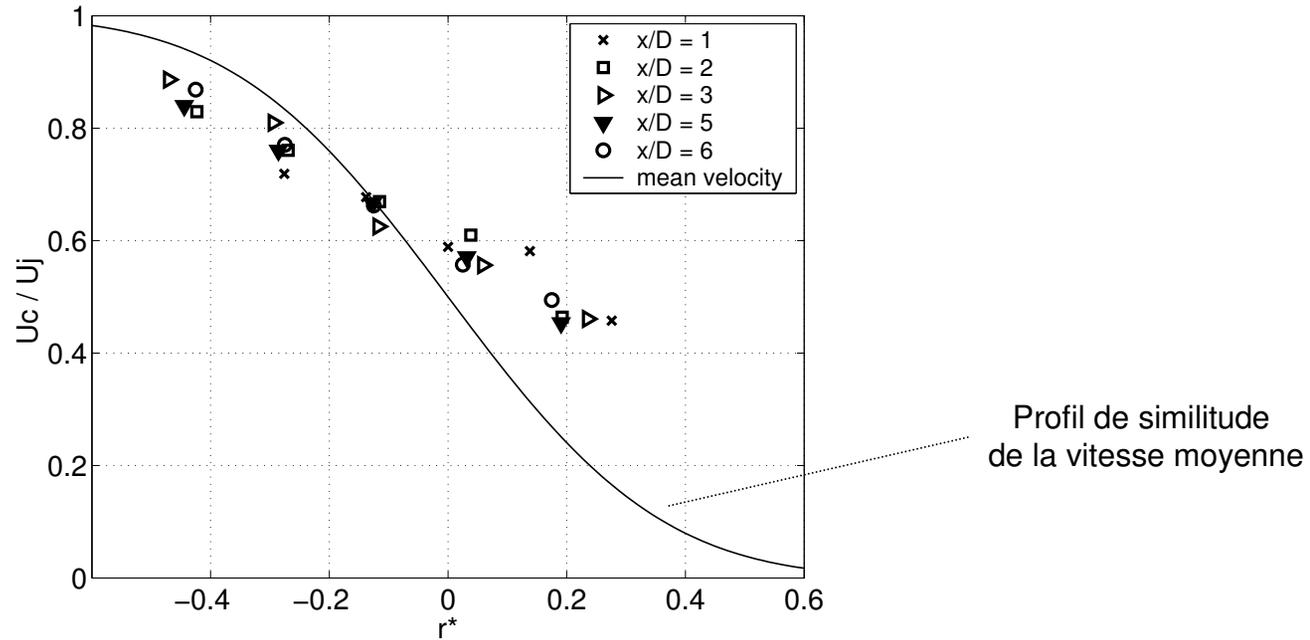


Echelle intégrale de temps



- ➔ Evolution spatiale et temporelle des sources
- ➔ Contributions relatives des régions sources au spectre d'intensité acoustique
- ➔ Composition spectrale des composantes de bruit propre et de bruit de cisaillement

Distribution radiale de la vitesse de convection

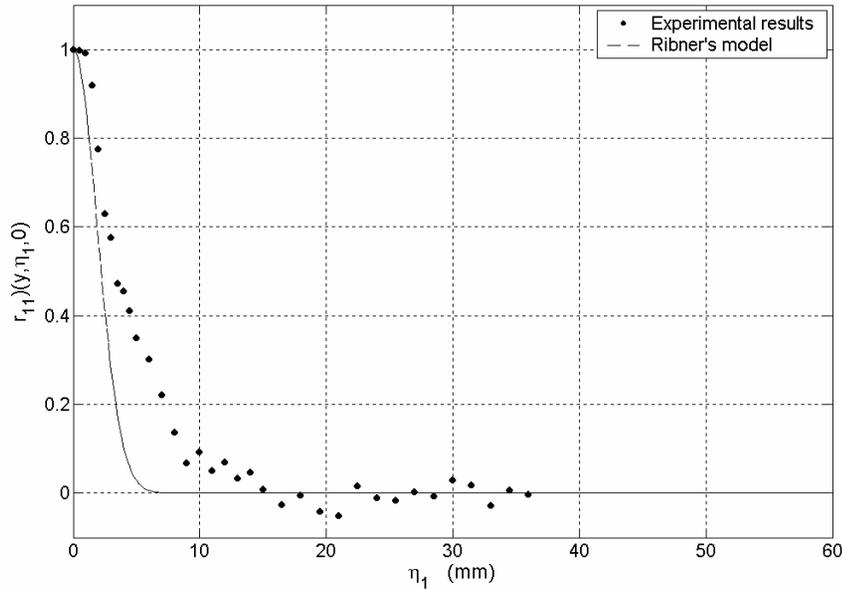


- ➔ Pas de valeur unique pour la vitesse de convection
- ➔ Indépendance des composantes spectrales turbulentes ?

Modélisation de la fonction de corrélation

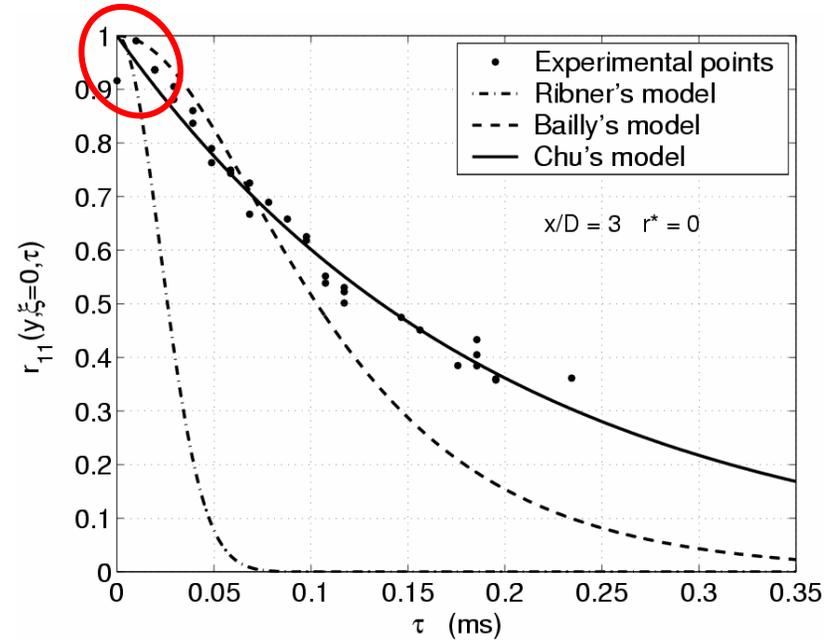
$$r_{ij}(y, \xi, \tau) = R_{ij}(y, \xi) g_{ij}(\tau)$$

Décroissance spatiale



Ribner, 1969 $R(y, \xi, 0) = \exp\left[-\pi \frac{\xi^2}{\ell^2}\right]$

Décroissance temporelle



Ribner, 1969 $g(\tau) = \exp\left[-\pi \omega_\xi^2 \tau^2\right]$

Chu, 1966 $g(\tau) = \exp\left[-\omega_\xi \tau\right]$

Bailly, 1997 $g(\tau) = \frac{1}{\cosh(\beta \omega_\xi \tau)}$

Plan de la présentation

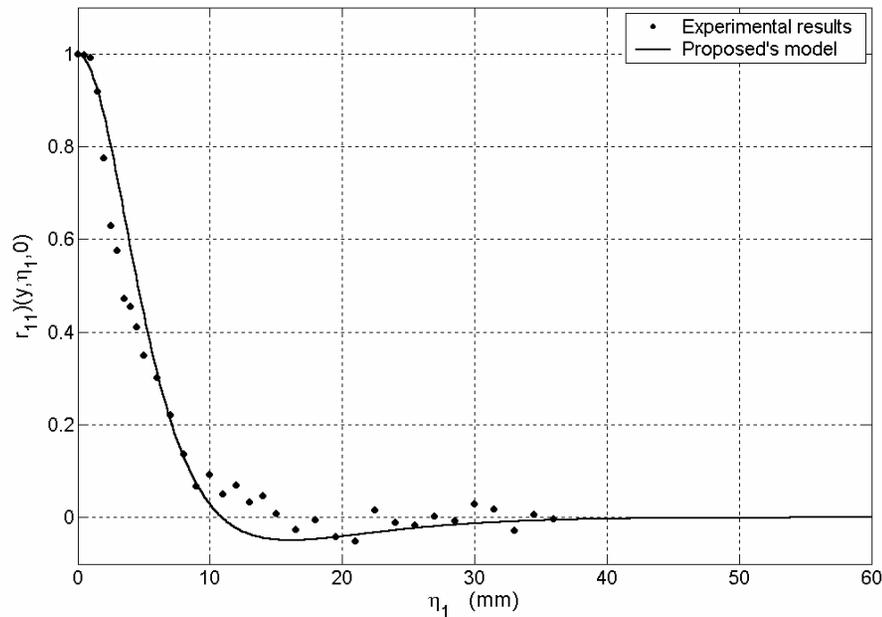
- Introduction
- Bases théoriques
Analogie aéroacoustique de Lighthill et Application au bruit de jet
- Dispositifs expérimentaux et outils d'analyse
- Grandeurs aérodynamiques et Dynamique spectrale
- Caractérisation statistique des composantes aéroacoustiques
- **Propositions de modélisation**
- Application à la prédiction du bruit de jet
Simulations numériques
- Conclusions et Perspectives

Proposition de modélisation

Modélisation de la décroissance spatiale

$$r_{ij}(y, \xi, \tau) = R_{ij}(y, \xi) g_{ij}(\tau)$$

Décroissance spatiale



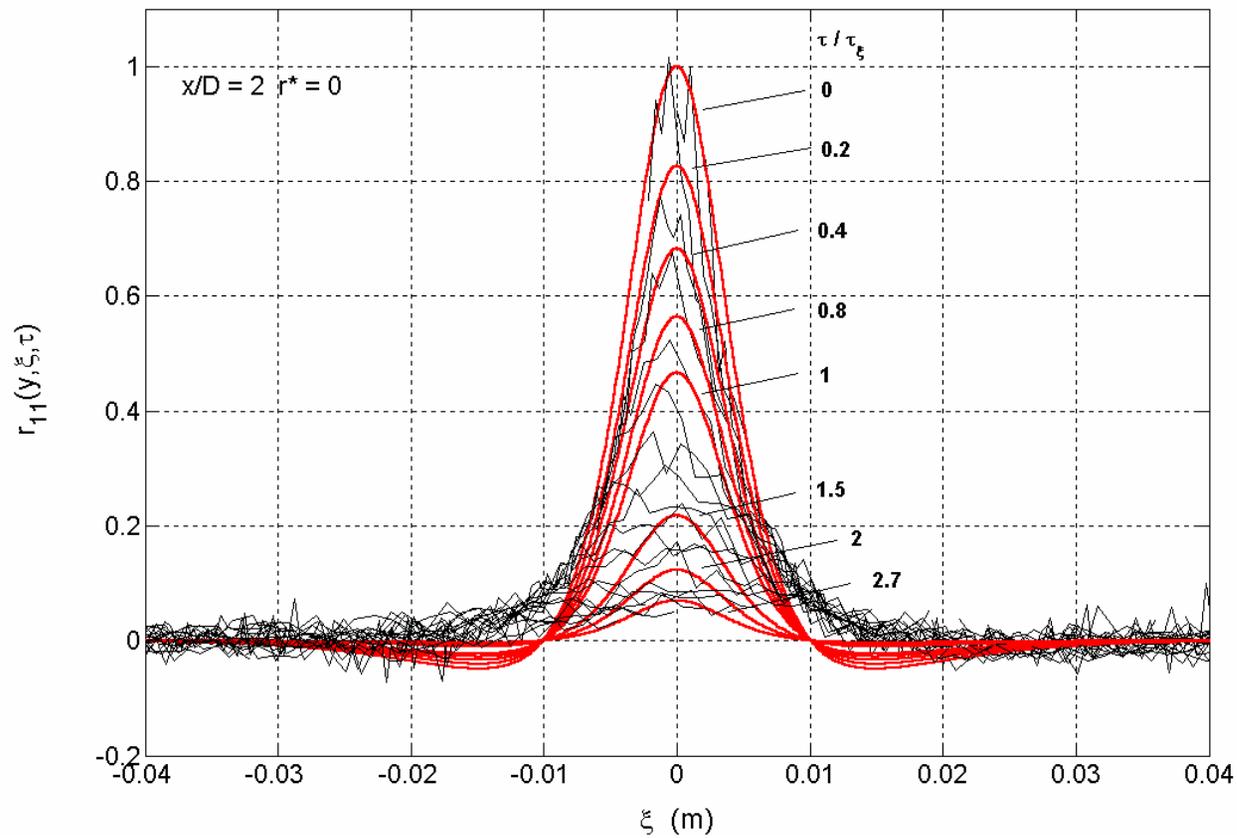
$$R_{\kappa}(y, \xi_1) = \frac{1}{\cosh(\kappa \xi_1)} \left[1 - \frac{\kappa}{2} \xi_1 \tanh(\kappa \xi_1) \right]$$

avec $\kappa = \frac{1}{2} \frac{\sqrt{\pi}}{\ell}$

(dérivée de Batchelor, 1952 et de Bailly, 1997)

➔ Reproduction des oscillations à grandes longueurs d'ondes
(*caractère tourbillonnaire*)

Modélisation de la corrélation spatio-temporelle dans le repère mobile



— résultats expérimentaux
— modélisation proposée

Dépendance fréquentielle de l'échelle intégrale de longueur

➔ **Prendre en compte la nature multi-échelle du champ turbulent dans la modélisation du tenseur de corrélation**

$$r_{11}(y, \eta_1, \tau) = \frac{\overline{u_{t1}(y, t) \cdot u_{t1}(y + \eta_1, t + \tau)}}{\left[\overline{u_{t1}(y, t)^2} \cdot \overline{u_{t1}(y + \eta_1, t)^2} \right]^{1/2}} \quad r_{11}(y, \eta_1, \tau) = \frac{\int_0^{+\infty} S_{11}(y, \eta_1, \omega) e^{j\omega\tau} d\omega}{\left[\int_0^{+\infty} S_1(y, \omega) d\omega \int_0^{+\infty} S_1(y + \eta_1, \omega) d\omega \right]^{1/2}}$$

Décomposition par bande de fréquence

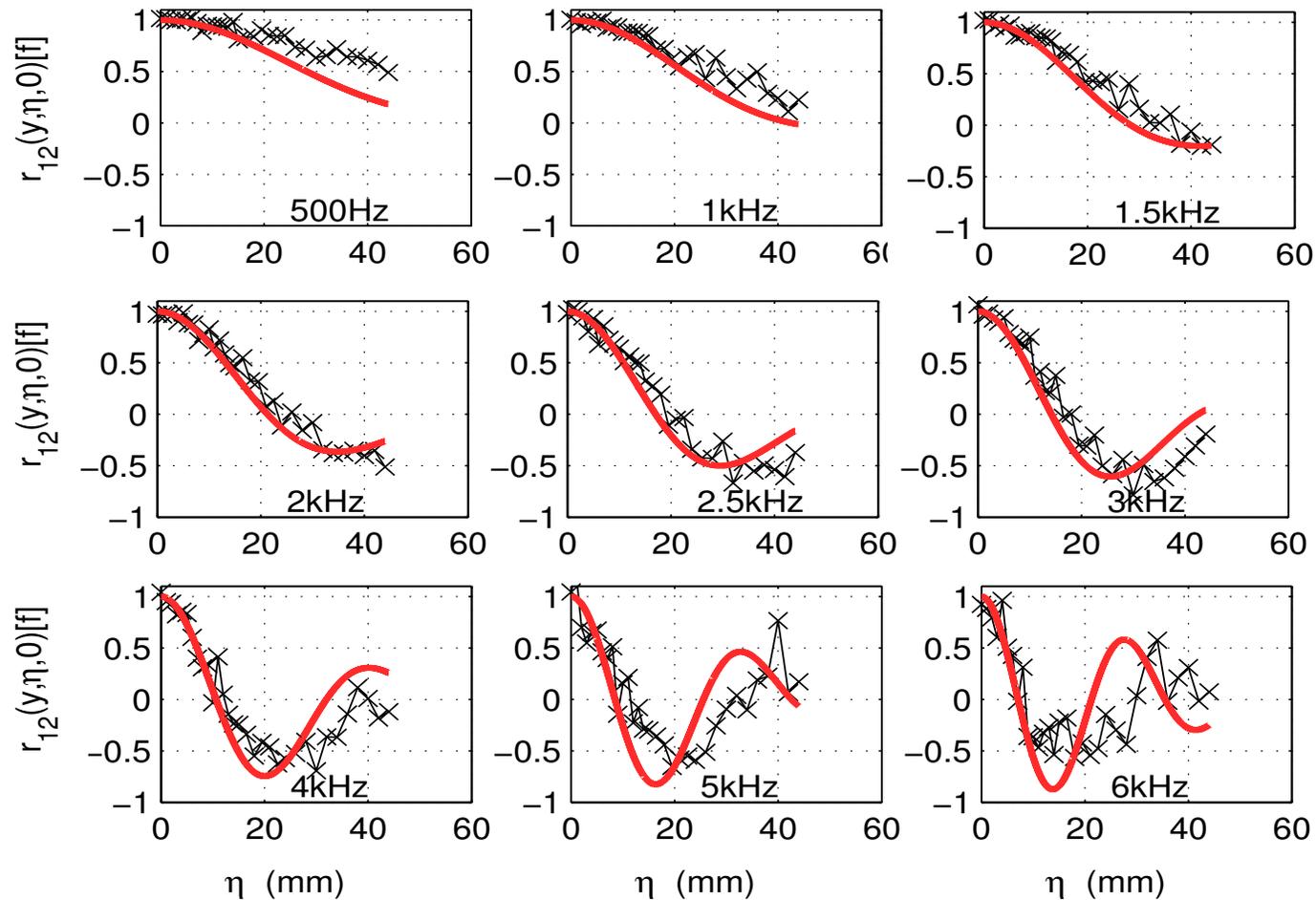
Townsend, 1976

Lumley & Takeuchi, 1976

$$r_{11}(y, \eta_1, 0)[\omega] = \frac{\operatorname{Re} \left[S_{11}(y, \eta_1, \omega) \right]}{\left[S_1(y, \omega) S_1(y + \eta_1, \omega) \right]^{1/2}}$$

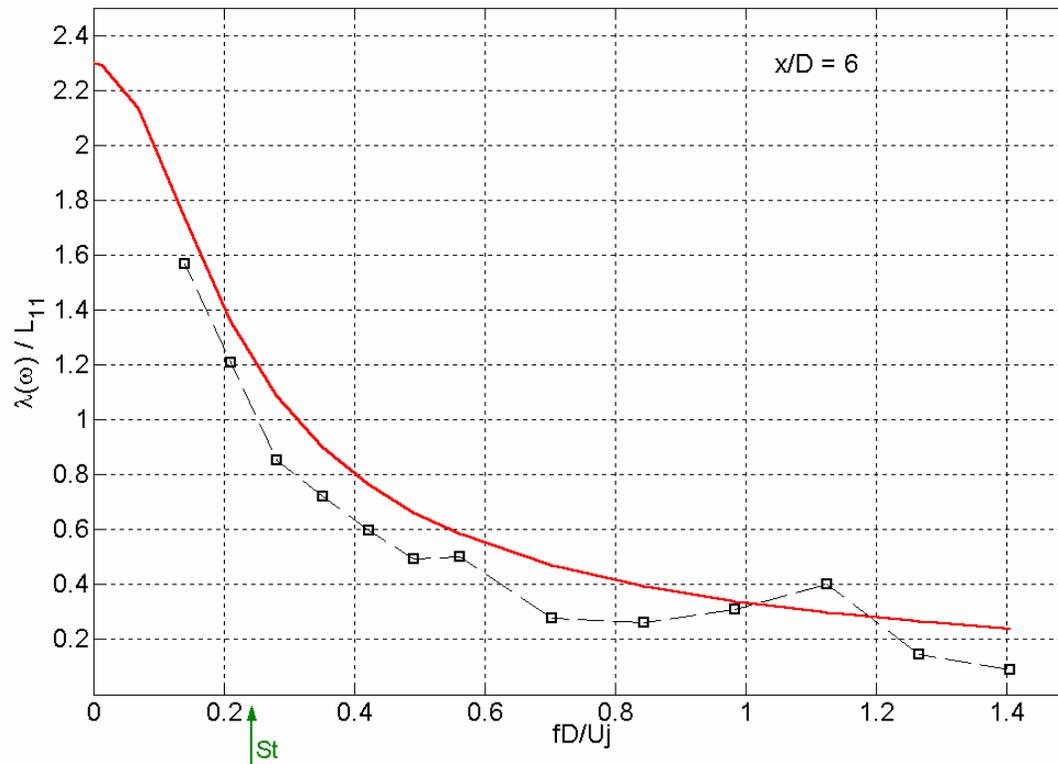
“Echelle de longueur singulière” $\lambda[\omega] = \int_0^{+\infty} r_{11}(y, \eta_1, 0)[\omega] d\eta_1$

Fonction de cohérence spatiale



x : résultats expérimentaux

— : calculs obtenus à partir d'une modélisation générale de la fonction de corrélation (Ribner, 1969)

Dépendance fréquentielle de l'échelle de longueur singulière λ 

Modélisation proposée

$$\lambda[\omega] \simeq \frac{\ell \sqrt{1 + \beta^2}}{2} \exp\left[-\frac{\beta^2 \tau_\xi^2 \omega^2}{4(1 + \beta^2)}\right]$$

symboles : mesures
 : modélisation proposée

➔ Relation à l'échelle intégrale de longueur

Plan de la présentation

- Introduction
- Bases théoriques
Analogie aéroacoustique de Lighthill et Application au bruit de jet
- Dispositifs expérimentaux et outils d'analyse
- Grandeurs aérodynamiques et Dynamique spectrale
- Caractérisation statistique des composantes aéroacoustiques
- Propositions de modélisation
- **Application à la prédiction du bruit de jet**
Simulations numériques
- Conclusions et Perspectives

Application à la prédiction du bruit de jet supersonique chaud

Intensité acoustique rayonnée en champ lointain

$$\begin{aligned}
 I(x, \tau) = & \frac{x_i x_j x_k x_l}{16\pi^2 c_o^5 \rho_o |x|^6} \left[\frac{\partial^4}{\partial \tau^4} \iint \frac{1}{C_D^5} \widetilde{A}_{ij} \widetilde{A}_{kl} \widetilde{r}_{ijkl}^a(y, \xi, \tau/C_D) dy' d\xi \right. \\
 & + \frac{\partial^2}{\partial \tau^2} \iint \frac{1}{C_D^5} \widetilde{S}_{ij} \widetilde{S}_{kl} \widetilde{r}_{ijkl}^s(y, \xi, \tau/C_D) dy' d\xi \\
 & \left. + 2 \frac{\partial^3}{\partial \tau^3} \iint \frac{1}{C_D^5} \widetilde{A}_{ij} \widetilde{S}_{kl} \widetilde{r}_{ijkl}^m(y, \xi, \tau/C_D) dy' d\xi \right]
 \end{aligned}$$

modélisation des termes sources
 (Fortuné & Gervais, 1999)
 +
 calculs aérodynamiques EADS-LV

modélisation du tenseur de corrélations
 (données expérimentales)

Résolution numérique

(code **EBENI** - Fortuné & Gervais 1999, Moriniere 2002)

$$r_{ij}(y, \xi, \tau) = R_{ij}(y, \xi) g_{ij}(\tau)$$

forme hyperbolique

$$l_1 = 0.04x + 0.1D$$

$$l_2 = l_1/5 \text{ (Davis, 1975)}$$

gaussienne

$$\tau_\xi = \frac{1}{C_\omega} \frac{\epsilon}{k} \text{ et } C_\omega = 0.1$$

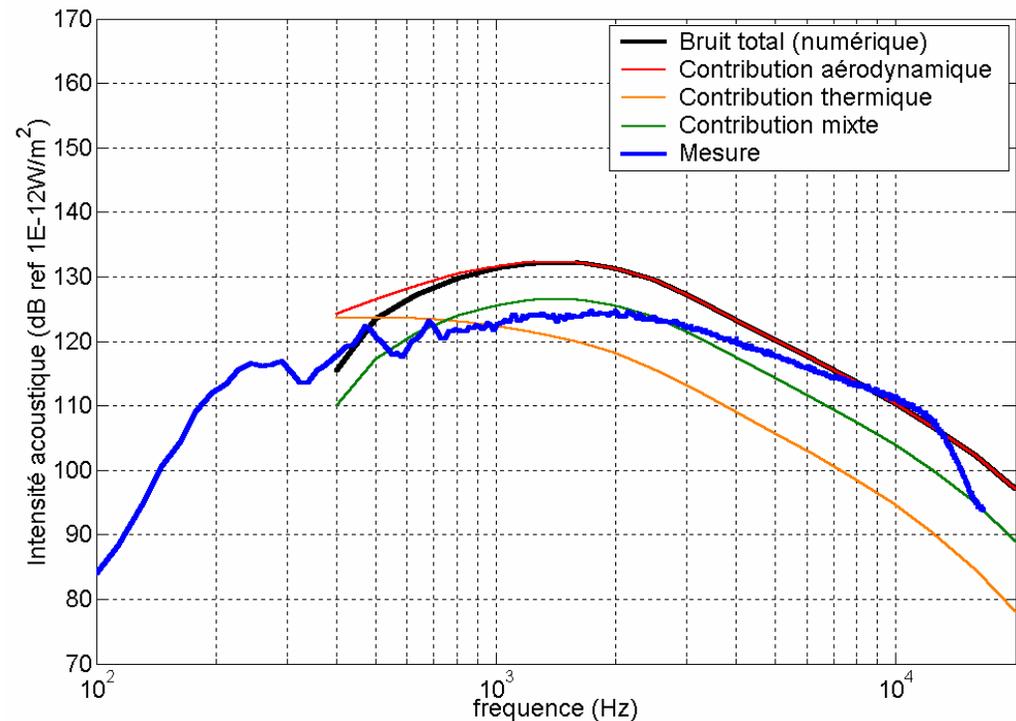
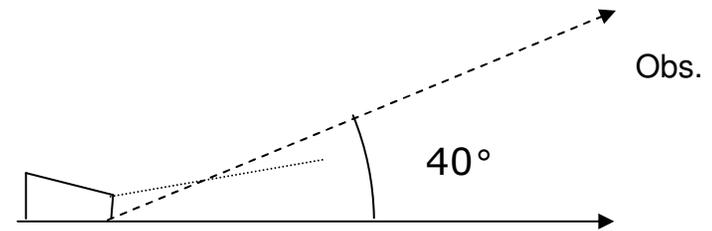
(Fortuné et Gervais, 1999)

➔ **Contribution des différentes sources:**

Basses fréquences:
aérodynamiques et thermiques

Hautes fréquences:
aérodynamique

➔ **Directivité calculée imposée par la singularité du facteur Doppler même modifié**
(artefact de calcul)



Prédiction du bruit de jet par approche statistique des sources aéroacoustiques

- **Analogie aéroacoustique**
 - Distribution spatiale de **l'énergie des termes sources**
 - Modélisation du **tenseur de corrélations**
-

Mesures expérimentales par VLD 1 point

- **Structure aérodynamique** de jets supersoniques froid et chaud
 - **Composition spectrale** des composantes de ‘bruit propre’ et de ‘bruit de cisaillement’ dans un jet supersonique froid
- ⇒ **validation de codes de calculs aérodynamiques**

Mesures expérimentales par VLD 2 points

- **Caractérisation statistique** de sources aéroacoustiques
 - Détermination des **échelles intégrales** relatives aux mécanismes sources
- ⇒ **modélisation statistique de la distribution des sources dans l'écoulement**

Travaux en cours et Perspectives

Modélisation du tenseur de corrélation

- Nature anisotrope du champ turbulent
Couplage PIV+LDV \Rightarrow tenseur de corrélations spatio-temporelles 2D Chatellier (2004)
- Nature inhomogène
Couplage avec calculs numériques LES Jordan (2004)
- Nature multi-échelle du champ turbulent
Dépendance fréquentielle des échelles intégrales

Sources d'origine thermique

- Nature des interactions
Mesures des fluctuations instantanées de la température
Corrélation vitesse-température

Contribution individuelle des sources au champ total rayonné

- Techniques d'identifications (LDV/Microphones) Fitzpatrick (2005)

Simulations numériques

Contributions et Confrontations aux approches expérimentales (DNS, ...)