

# Méthodes et Applications en Aéronautique

*Eric MANOHA*

ONERA

*Département Simulation Numérique  
des Ecoulements et Aéroacoustique*

Les mathématiciens et les industriels se parlent

Simulation  
numérique  
en  
aéroacoustique

16 NOVEMBRE 2006

Office National d'Études  
et de Recherches Aérospatiales  
[www.onera.fr](http://www.onera.fr)

## Plan

- Contexte (limité à la finalité « avion de transport civil »)
- Stratégies de réduction du bruit des avions
- Méthodes numériques développées à l'ONERA
- Plate-forme ONERA CFD /CAA « *sAbrinA* »
- Deux exemples de mise en œuvre de méthodes numériques pour la simulation
  - ❑ *du bruit aérodynamique*
  - ❑ *des effets d'installation*

# CONTEXTE : Prévision et réduction du bruit des avions civils au voisinage des aéroports

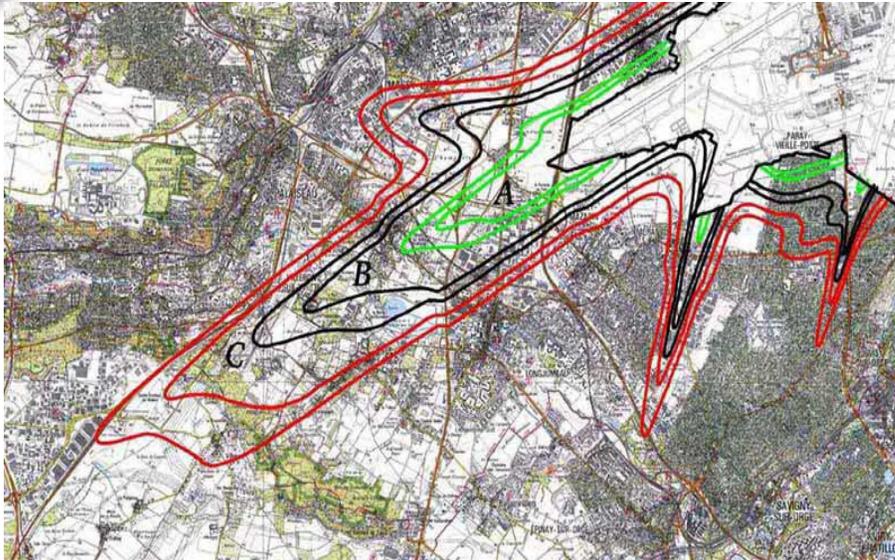


St Martin

Tokyo



# Nuisances sonores des avions civils au voisinage des aéroports



← 5 km →

**Plan d'exposition au bruit de l'aéroport d'Orly (coté ouest)**

**Zone A:**  $p > 96$  dB

**Zone B:**  $96$  dB  $> p > 84$  dB

**Zone C:**  $84$  dB  $> p > 72$  dB

**Un mouvement d'avion toutes les 90 secondes sur chaque piste**

Page 4

Forte pression des associations de riverains

Normes internationales (et locales) de bruit de plus en plus contraignantes

Enjeux économiques importants pour les constructeurs (concurrence Airbus/Boeing) et les compagnies aériennes

Les problèmes aréoaoustiques augmentent avec la taille de l'avion



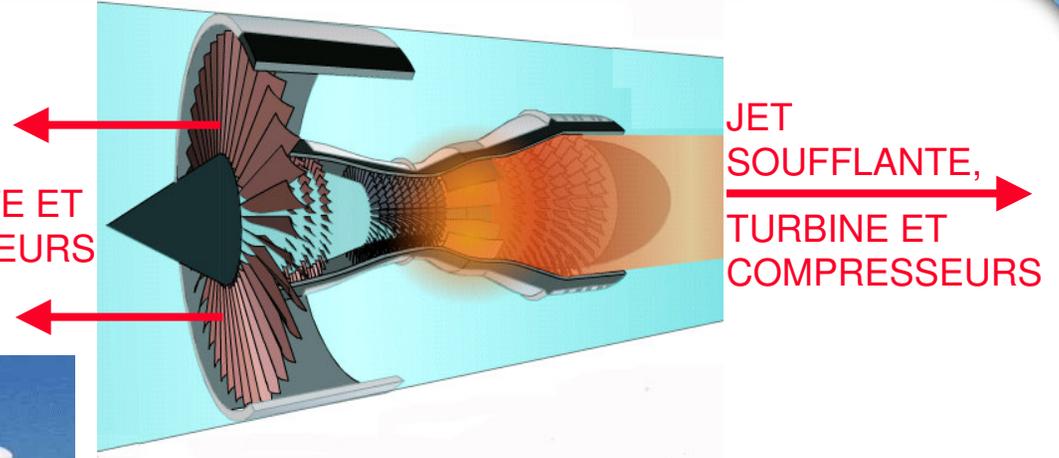
# Sources de bruit d'un avion civil

Bruit externe = **Bruit de propulsion** + **Bruit aérodynamique**

## Bruit de propulsion

Turbofan  
Double flux  
Haut taux de dilution

SOUFFLANTE ET  
COMPRESSEURS



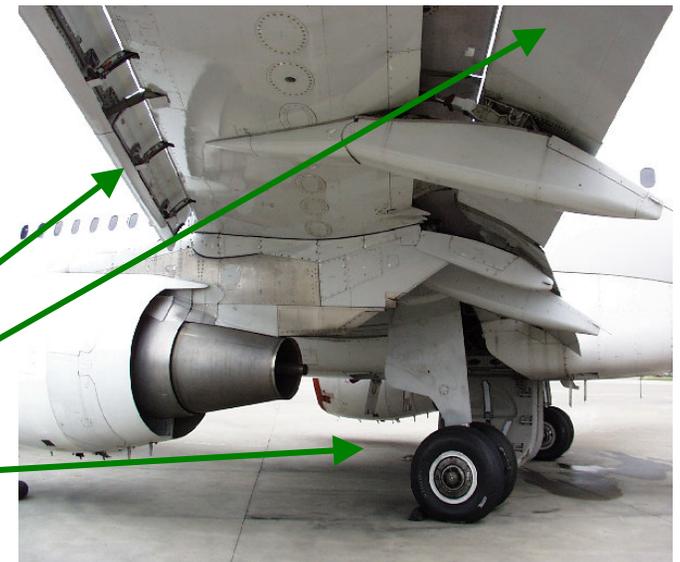
## Bruit aérodynamique

Système hypersustentateurs :

- Becs de bord d'attaque
- Volets de bord de fuite

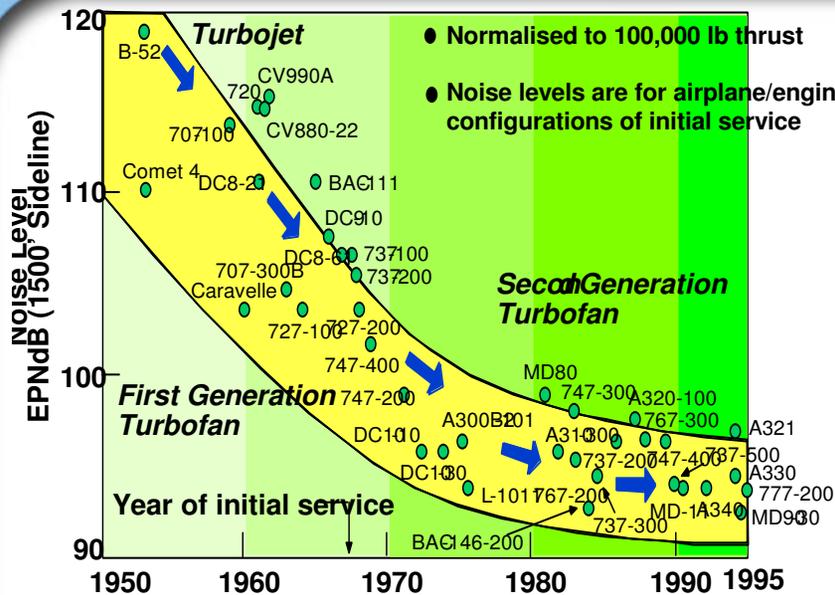
Trains d'atterrissage

Fentes, Cavités, etc



# Evolution du bruit total

## Contribution respective de chaque source



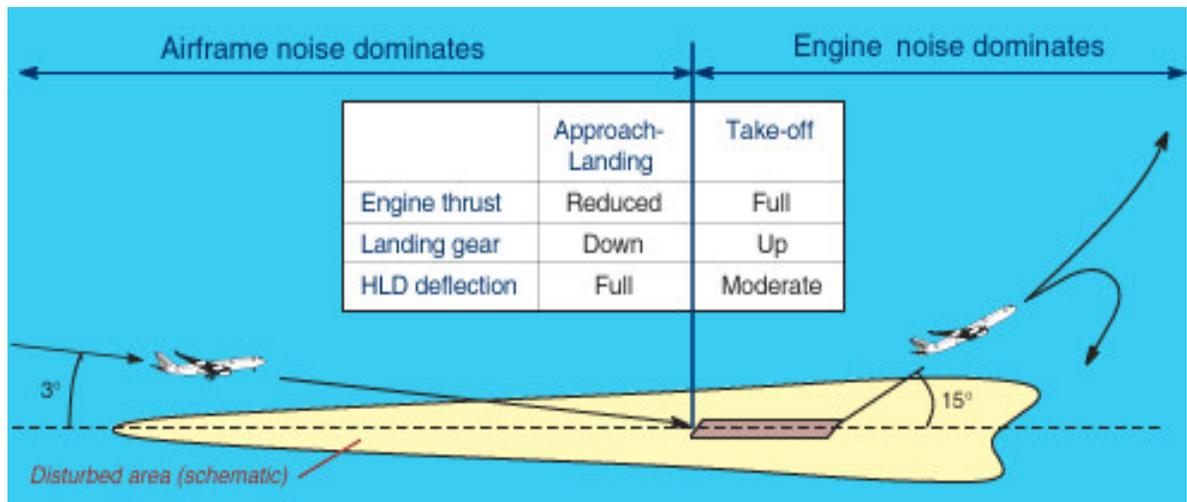
### Évolution du bruit des avions depuis 1950 :

- Années 50 : apparition des turboréacteurs simple flux sur les avions civils : très bruyants ⇒ début des recherches en aéroacoustique des jets
- Générations successives de moteurs : turbofan double flux ⇒ forte diminution du bruit

### Tendance actuelle :

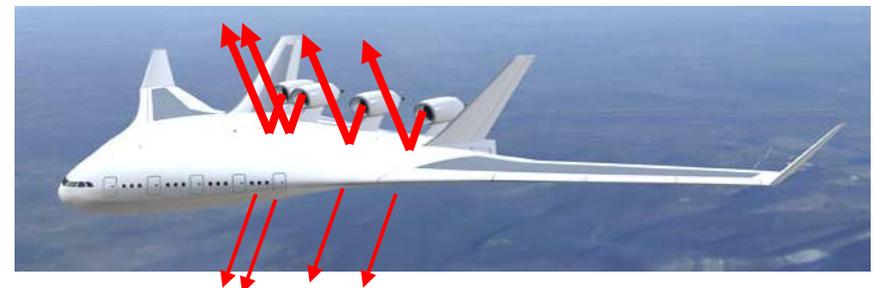
**Décollage : le bruit de moteur reste dominant**

**Approche/atterrissage : le bruit de moteur et le bruit aérodynamique sont de niveau analogue**



# Stratégies de réductions du bruit

- **Réduction du bruit de moteur**
  - ❖ Jet : augmentation des taux de dilution, chevrons
  - ❖ Soufflante : amélioration des nacelles (matériaux absorbants)
- **Réduction du bruit aérodynamique**
  - ❖ Caractérisation/localisation des sources
  - ❖ Etude de dispositifs réducteurs de bruit aérodynamique
- **Effets d'installation**
  - ❖ Utilisation de la structure de l'avion pour masquer le bruit de moteur
- **Procédures de vol à moindre bruit**



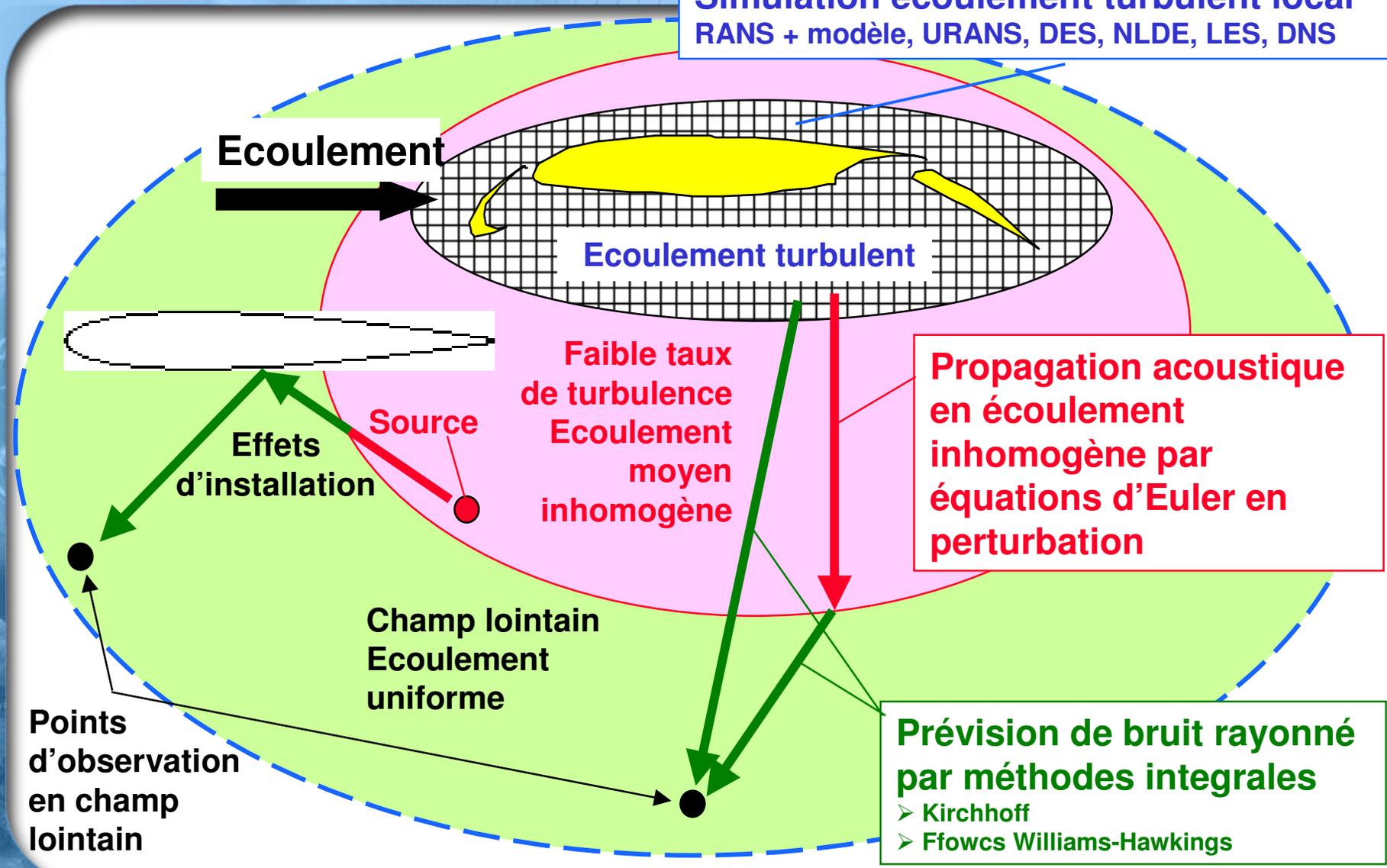
**Double approche :**

- Expérimentale
- **Numérique**

# Simulation Numérique du Bruit Aérodynamique et des Effets d'Installation

## Méthodes hybrides CAA : CFD + acoustique

Simulation écoulement turbulent local  
RANS + modèle, URANS, DES, NLDE, LES, DNS



Propagation acoustique en écoulement inhomogène par équations d'Euler en perturbation

Prévision de bruit rayonné par méthodes intégrales  
➤ Kirchhoff  
➤ Ffowcs Williams-Hawkings

Ecoulement

Ecoulement turbulent

Faible taux de turbulence Ecoulement moyen inhomogène

Champ lointain Ecoulement uniforme



Effets d'installation

Source

Points d'observation en champ lointain

# Plate-forme CFD/CAA sAbrinA

**PEGASE** : CFD  
instationnaire  
(LES/DNS) maillage  
Cartésien

**FLU3M** : solveur CFD  
NS/Euler (volumes  
finis, multi-bloc,  
structuré, curviligne)

**E3P** : propagation  
acoustique (Euler en  
perturbation, différences  
finies d'ordre élevé,  
structuré curviligne mono-  
domaine)

**sAbrinA**



*Simulation **A**éroacoustique du **BR**uit d'**IN**teraction **A**érodynamique  
Solver for **A**eroacoustic **BR**oadband **IN**teractions with **A**erodynamics*

- CAA : propagation acoustique
- CFD instationnaire: LES/NLDE
- Couplage CFD /CAA

# Plate-forme CFD/CAA sAbrinA

## Principales fonctionnalités

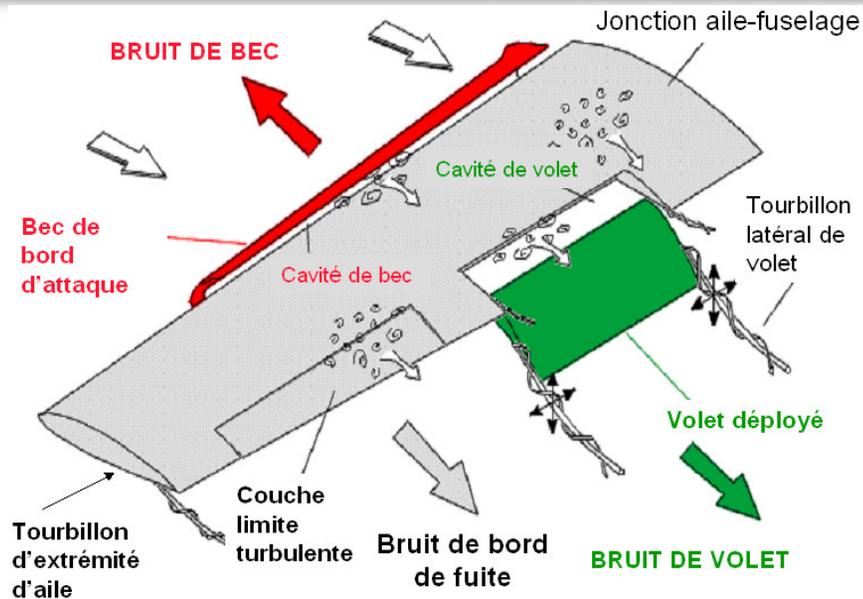
- Equations Euler / Navier-Stokes
- Schémas Volume Finis (VF) / Differences Finis (DF)
- Variables complètes ou séparation écoulement moyen / perturbation
- Schémas VF : AUSM+P avec/sans détecteur de wiggle, Roe, Van Leer
- Schémas DF(ordre 2-6) curviligne / filtres DF (ordre 2-14)
- Schémas en temps explicites / implicites (seulement VF)
- Conditions limites spécifiques pour NLDE et propagation acoustique
- Couplage instantané (ou différé) CFD (VF/implicit) / CAA (DF/explicit)
  - interface non-conforme curviligne
  - recouvrement de maillages curviligne / Cartésiens
  - terme source volumique

# *Simulation numérique du bruit de bec de bord d'attaque*

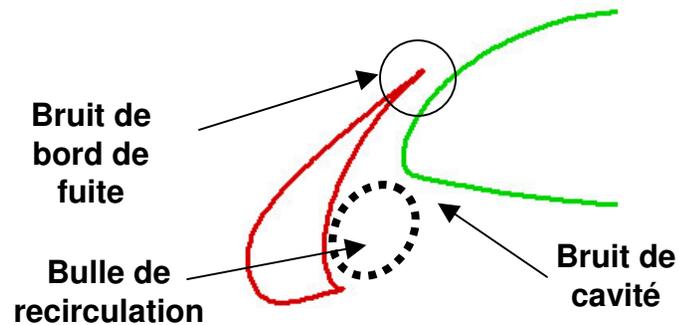
- Mécanisme aéroacoustique
- Calcul des sources aéroacoustiques
  - ❑ LES
  - ❑ NLDE
  - ❑ DES
- Calcul du bruit rayonné
  - ❑ Exemple de couplage faible CFD / CAA par interface surfacique (profil simple)
  - ❑ Vers un couplage faible CFD / CAA par terme source volumique : rayonnement acoustique de sources ponctuelles en écoulement non uniforme

# Simulation numérique du bruit de bec de bord d'attaque

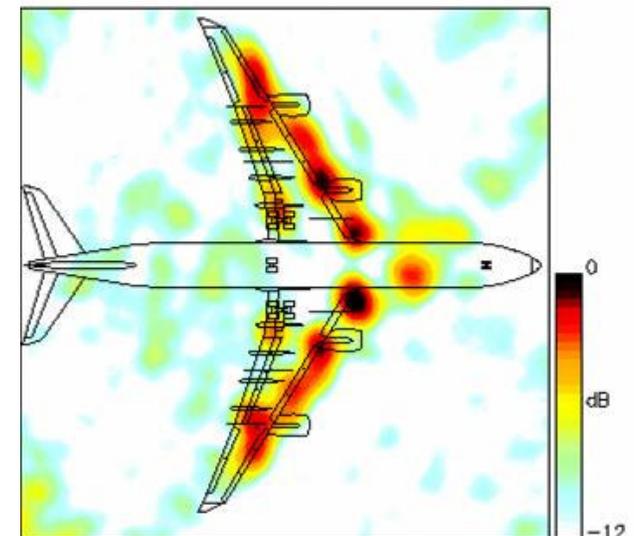
## Mécanisme aéroacoustique



**Sources de bruit aérodynamique sur aile hypersustentée**



## Localisation de sources sur avion en survol



# LES – Profil d'aile hypersustentée

## Maillage 2D – Calcul RANS 2D

S. Ben Khelil, C. François

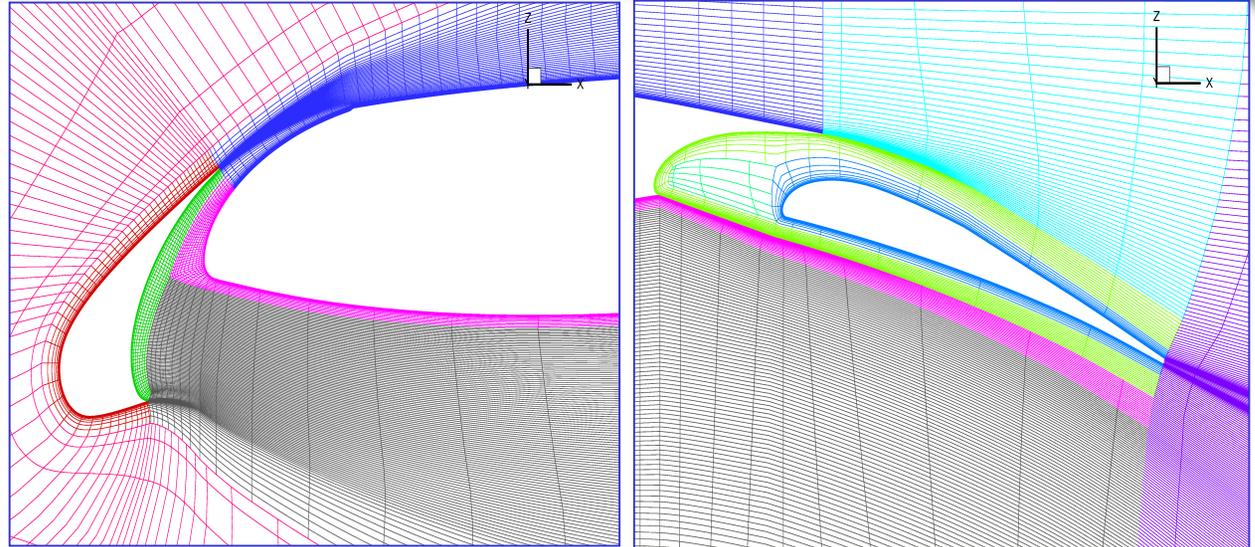
### Maillage 2D

Forte résolution dans la région du bec  
18 blocs structurés  
413,890 points

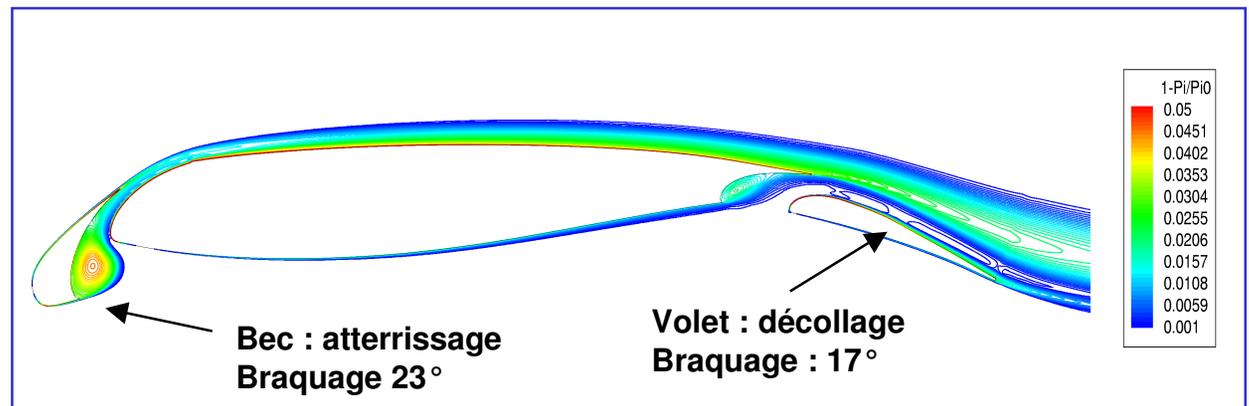
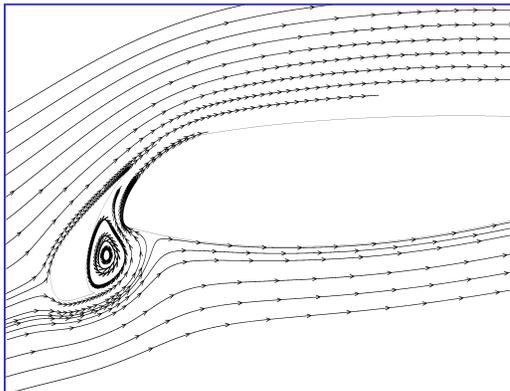
### Configuration Hybride

Bec : atterrissage

Volet : décollage (pas de décollement)



### RANS-2D



$\alpha = 4^\circ$

Modèle de Spalart-Allmaras

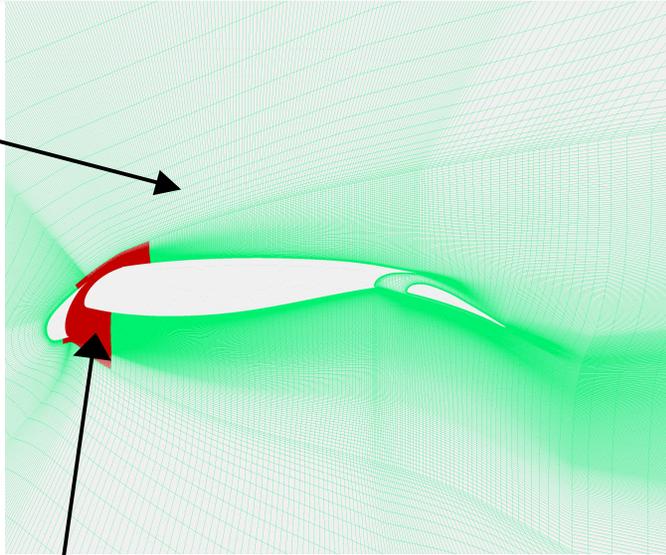
ONERA

# LES – Profil d'aile hypersustentée

## Maillage 2D/3D LES

S. Ben Khelil, C. François

2D



3D

Braquage bec:  $23^\circ$   
Braquage volet:  $17^\circ$

$$Re_c = 2.5 \cdot 10^6$$

$$M = 0.19$$

$$\alpha = 4^\circ$$

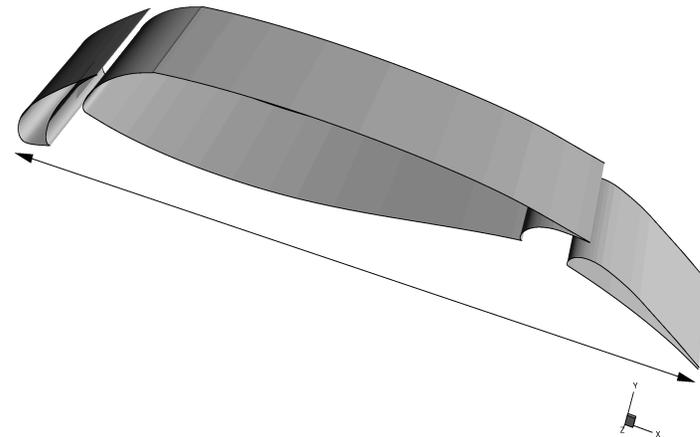
$$P_i = 101,325 \text{ Pa}$$

$$T_i = 298 \text{ K}$$

**2D/3D : 7,345,812 points**

52 plans dans le direction transversale

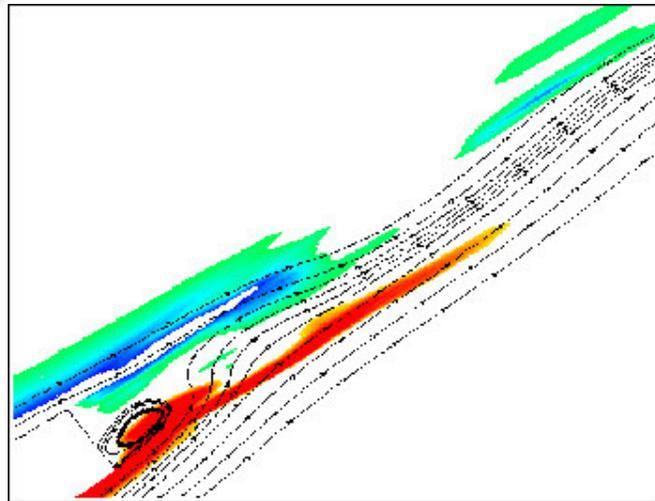
Envergure = 37 % de la corde du bec



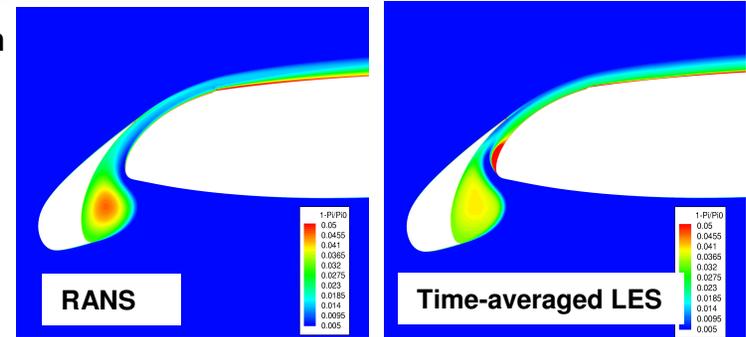
ONERA

# LES – Profil d'aile hypersustentée 2D/3D LES ( $\alpha = 4^\circ$ )

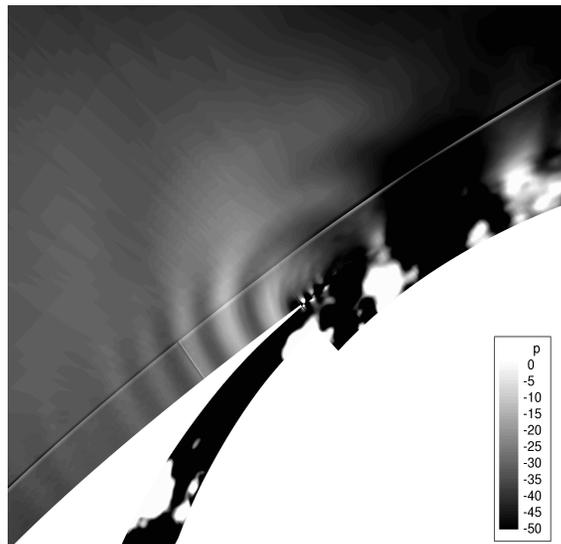
S. Ben Khelil, C. François



Champ de pression

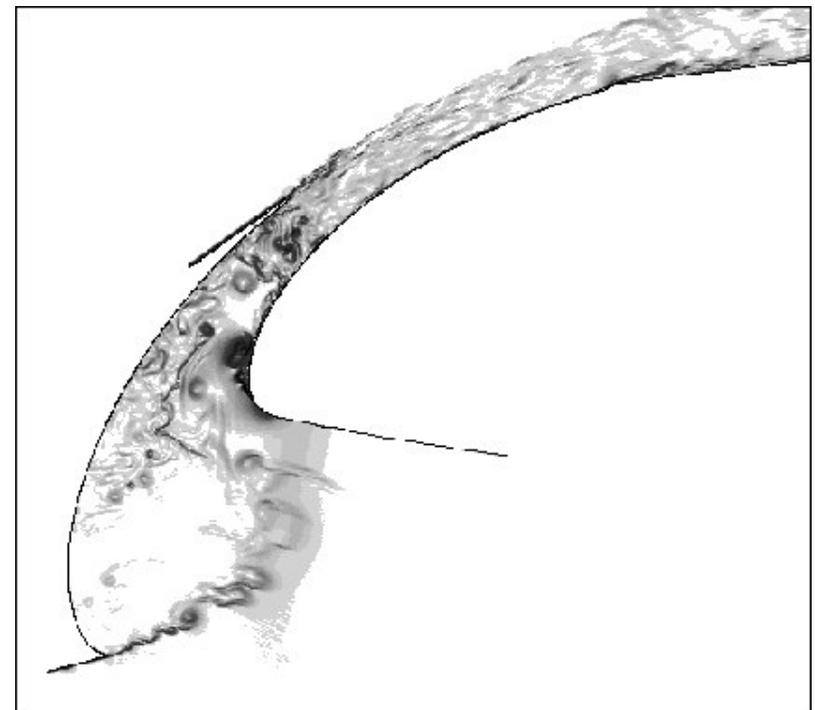


Vorticité instantanée près du bord de fuite



Amplitude du gradient de densité (Schlieren)

Fluctuations de pression Instantanées

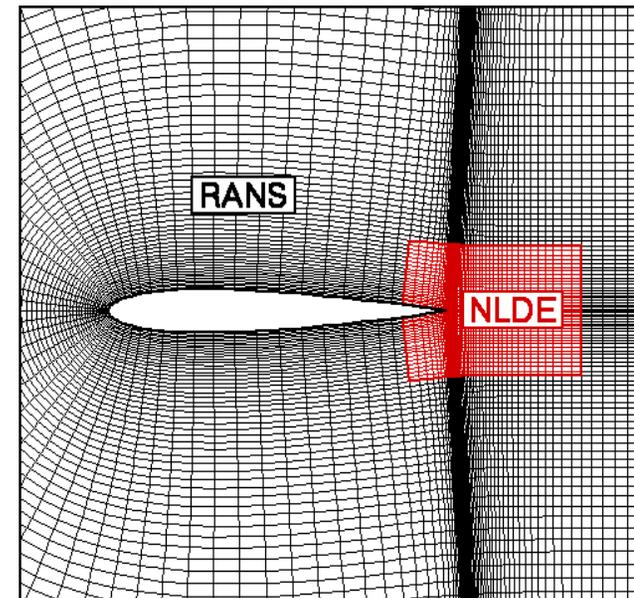


# Non Linear Disturbance Equation

E. Labourasse, M. Terracol

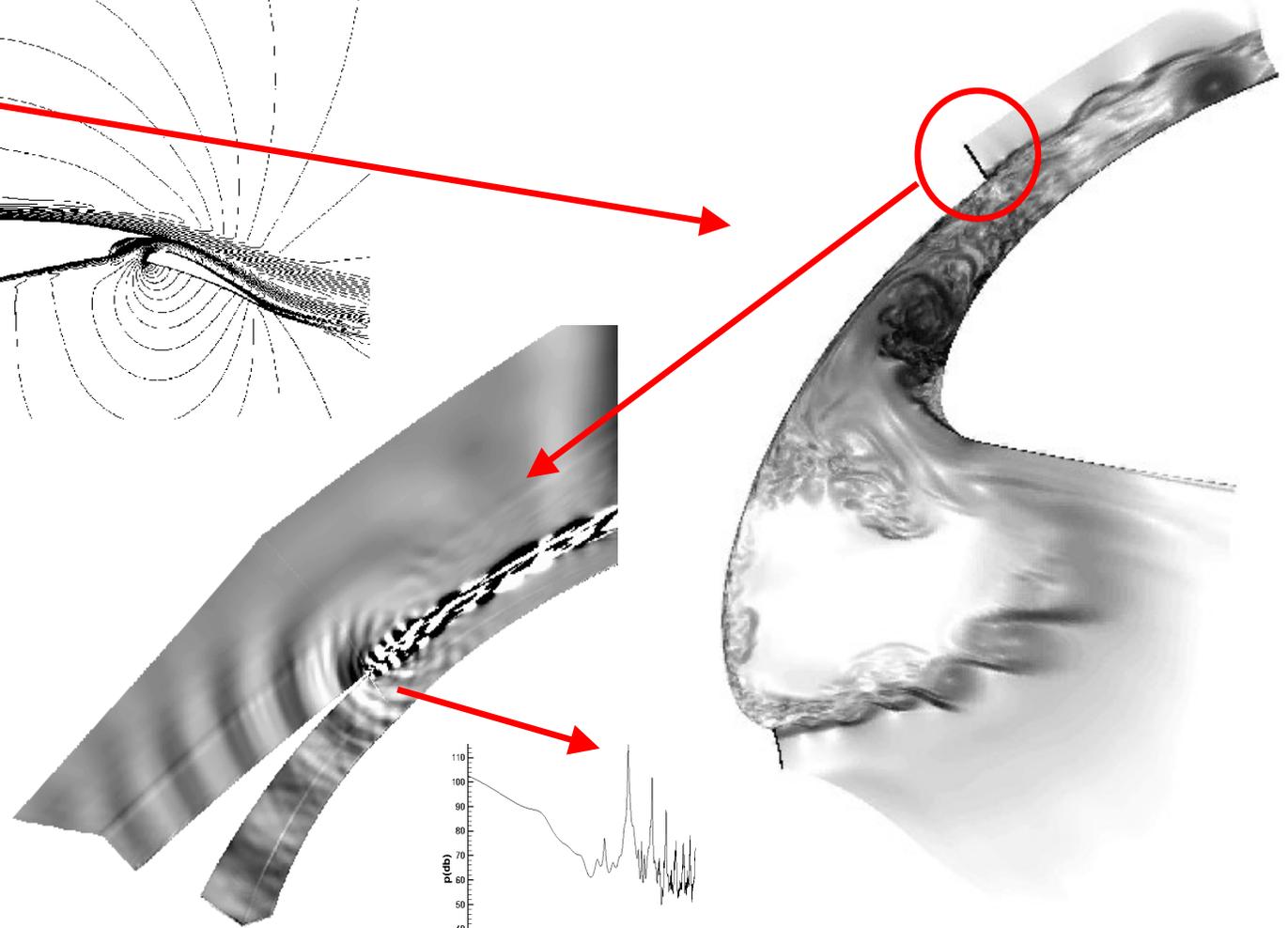
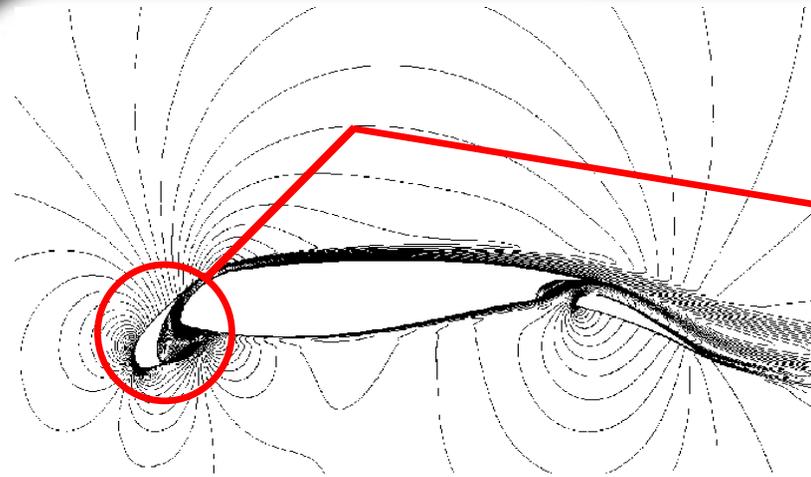
$$\underbrace{\bar{U}}_{LES} = \underbrace{U_0}_{RANS} + U' \longrightarrow NS(U')$$

- **Couplage zonal LES / RANS**  
(Conditions limites spécifiques)
- Réduction du coût par rapport à la LES
- Prédiction des source en configuration réaliste



# Application à la simulation de l'écoulement instationnaire dans une cavité de bec

E. Labourasse, M. Terracol



**3D NLDE**

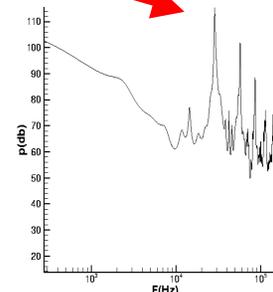
$\approx 5,700,000$  points

$L_z = 0.27 c_s$

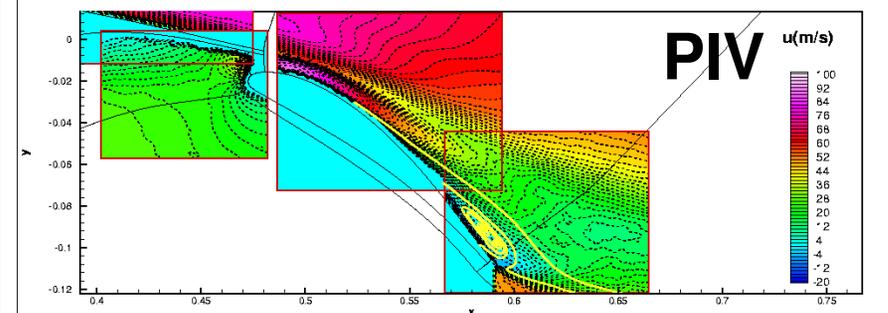
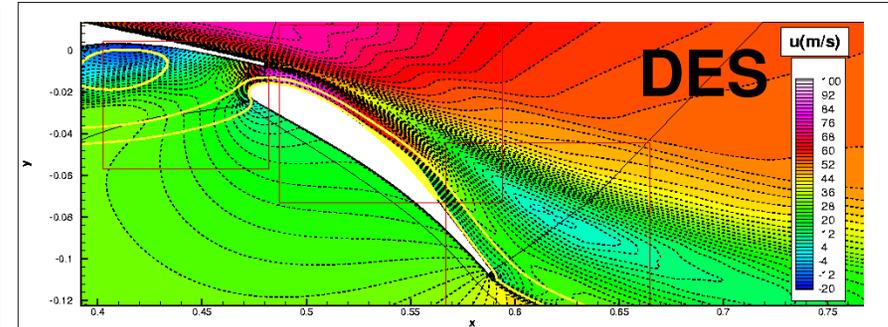
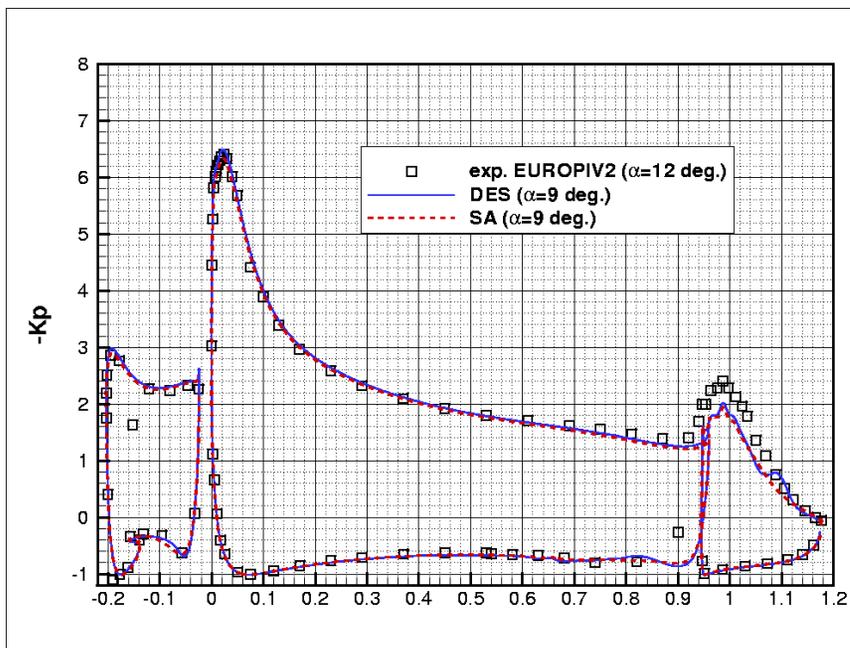
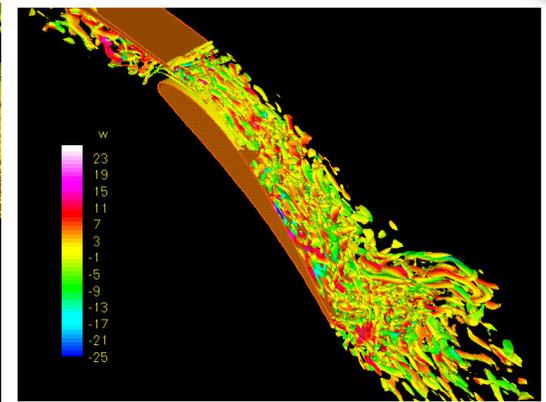
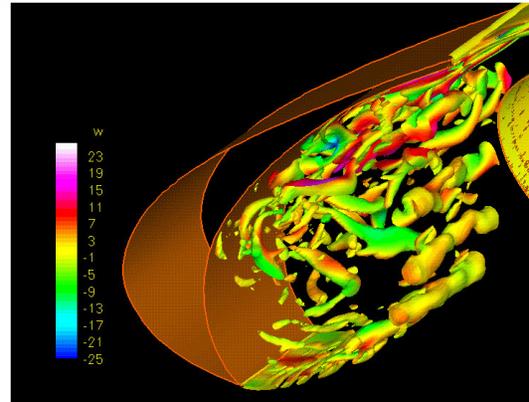
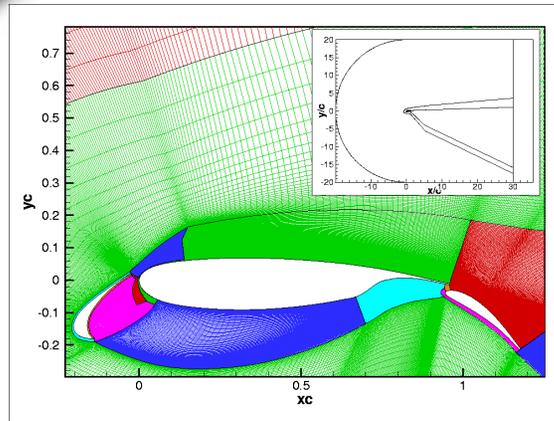
➤  $c = 0.61 \text{ m}$

➤  $U_{inf} = 65.5 \text{ m/s}$

➤  $Re_c = 2.5 \times 10^6$

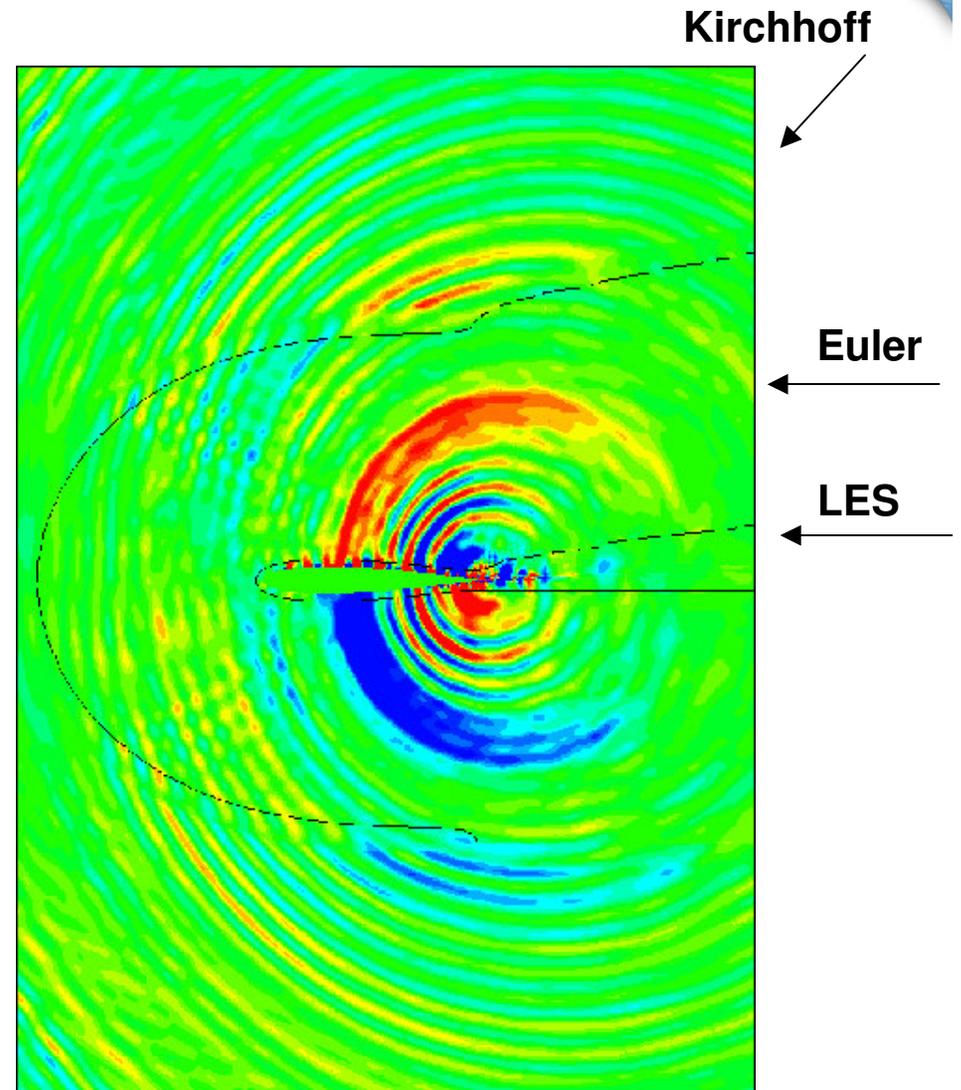
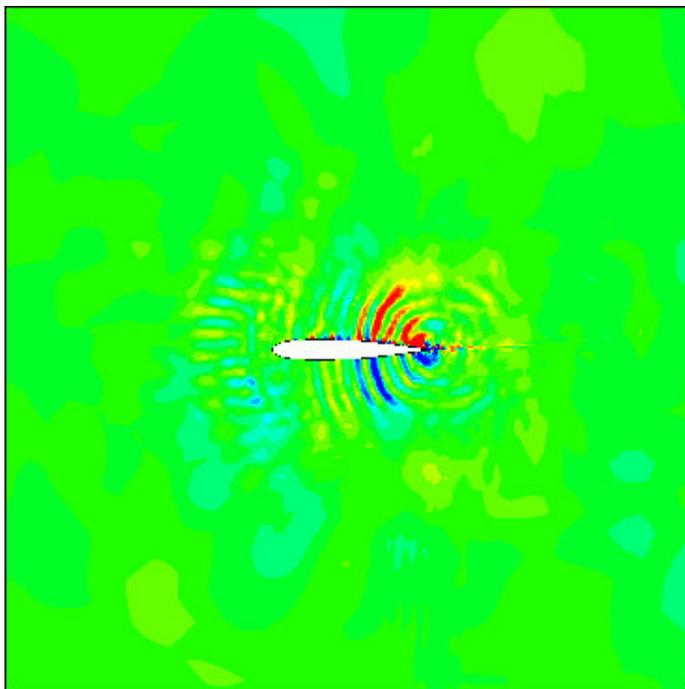
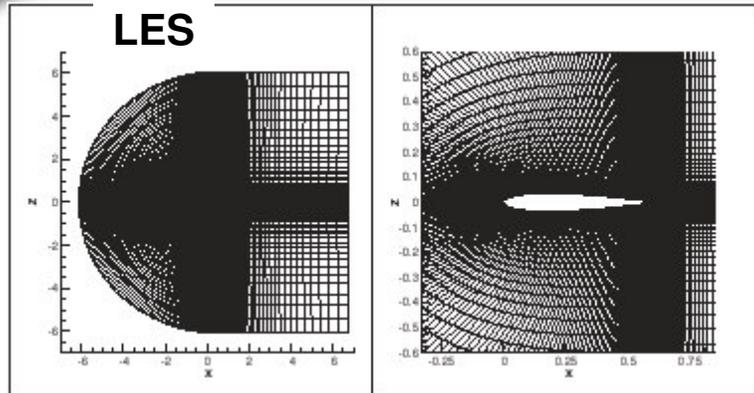


# Detached Eddy Simulation : configuration EUROPIV2 (Projet DESIDER – S. Deck – ONERA/DAAP)

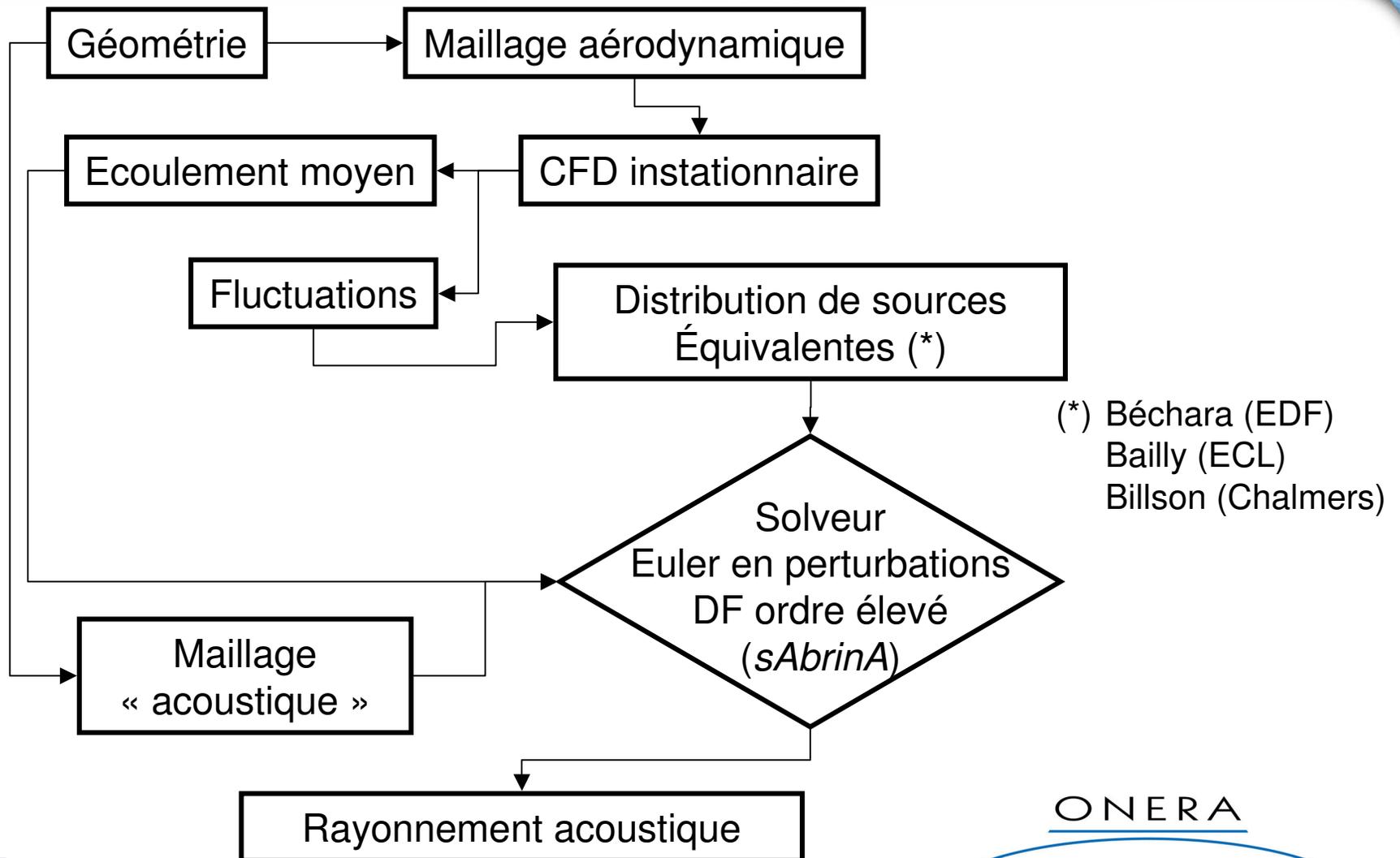


**Exemple de couplage (faible) CFD / CAA par interface surfacique**  
**Bruit de bord de fuite d'un profil NACA0012 à bord de fuite tronqué**  
**Champ de fluctuation de pression instantanée**

S. Ben Khelil / C. Herrero

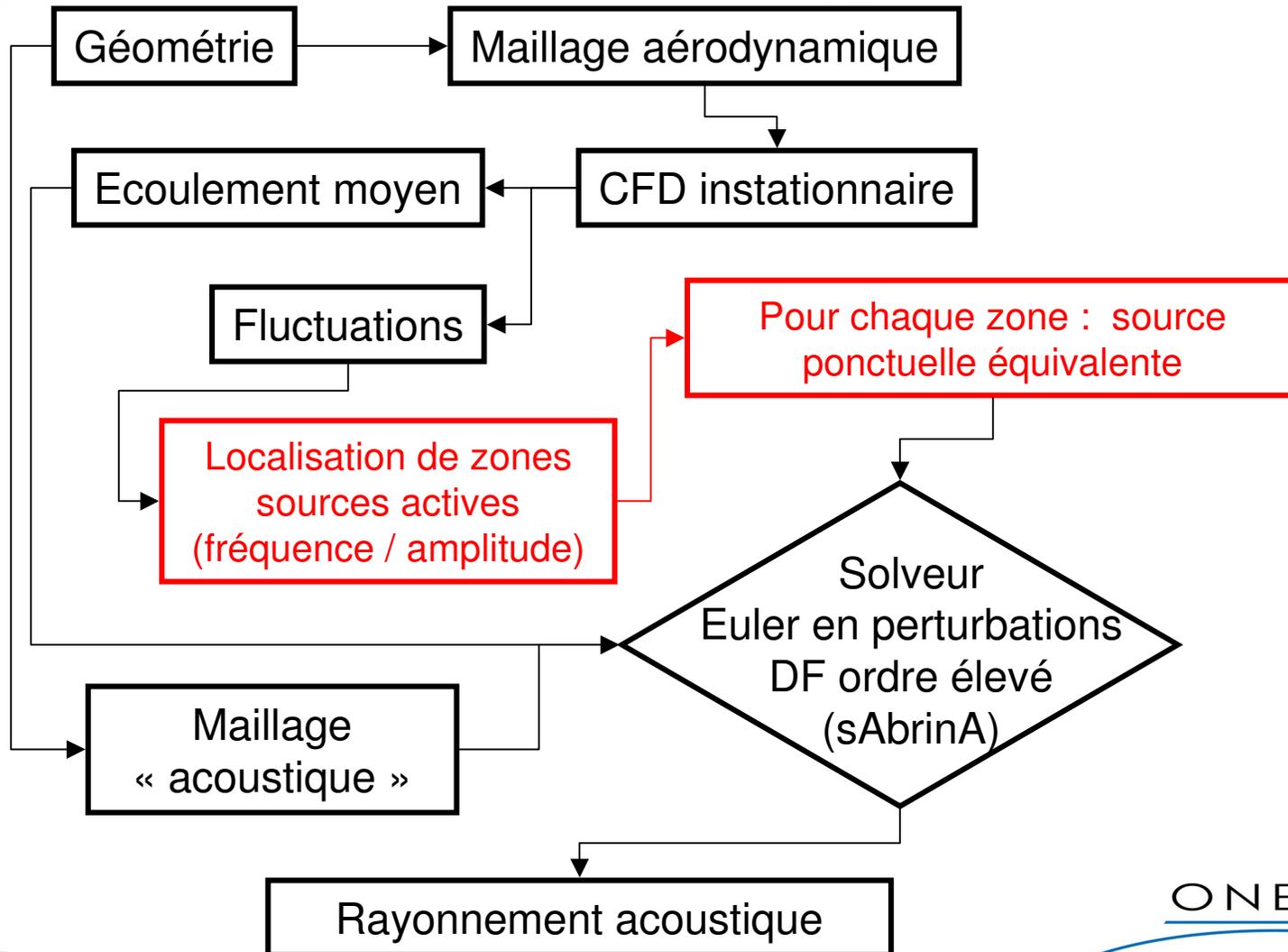


# Vers un couplage (faible) CFD/CAA par terme source volumique Méthodologie générale



# Vers un couplage (faible) CFD/CAA par terme source volumique

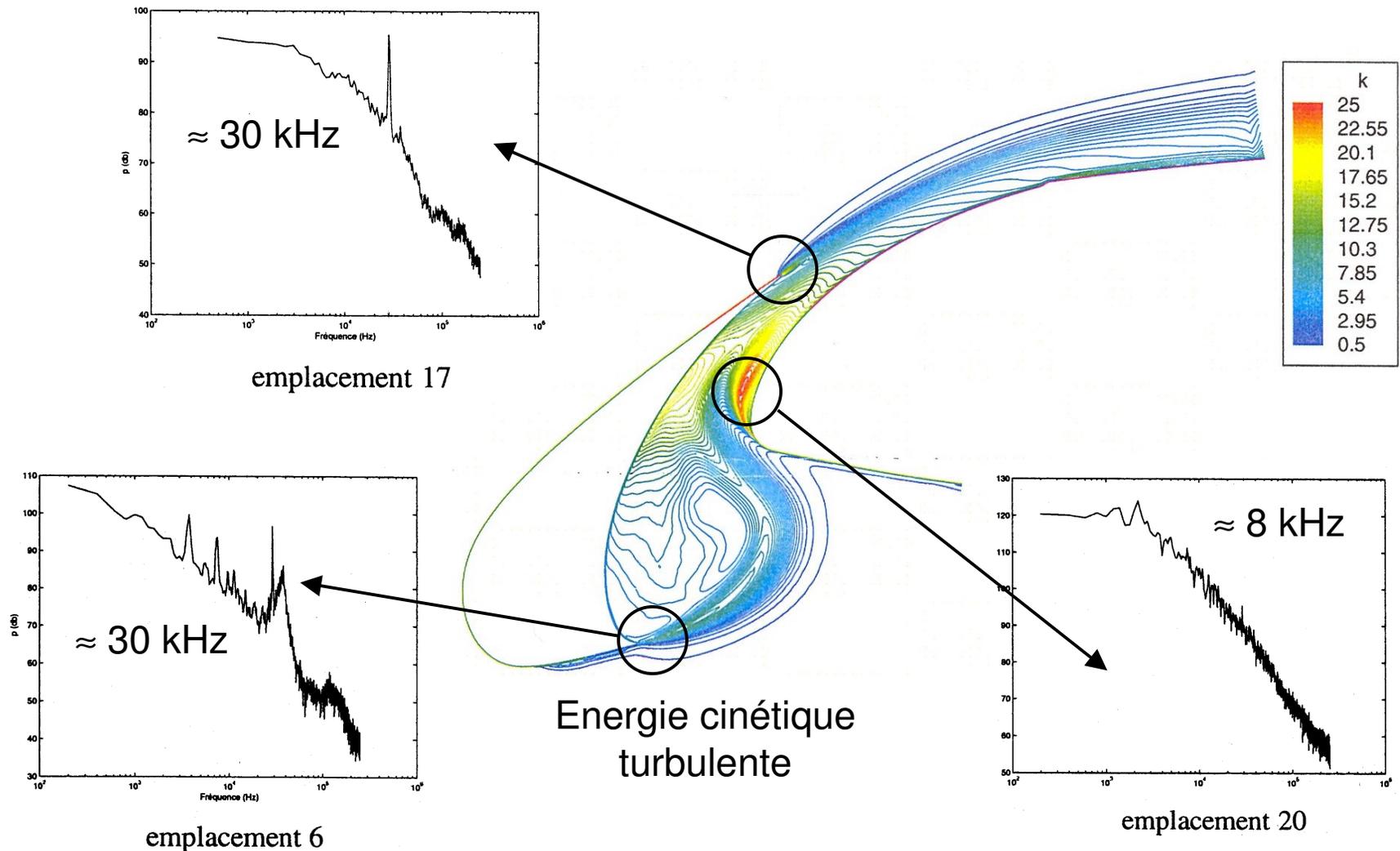
## Etape intermédiaire : rayonnement de sources ponctuelles



# Vers un couplage (faible) CFD/CAA par terme source volumique

## Localisation de zones sources actives

S. Ben Khelil / D. Mincu

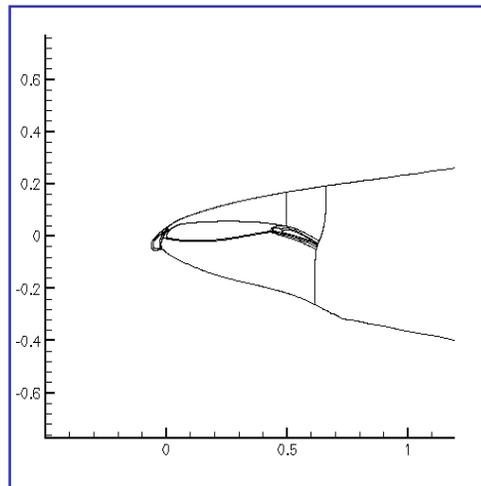


# Vers un couplage (faible) CFD/CAA par terme source volumique

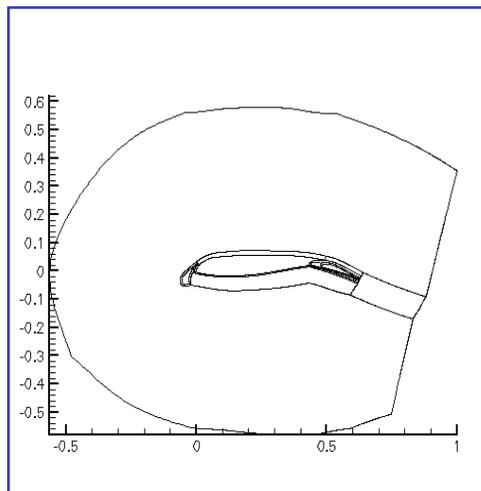
## Elaboration d'un maillage acoustique à partir d'un maillage CFD

R. Guenanff

### Structure multi-bloc

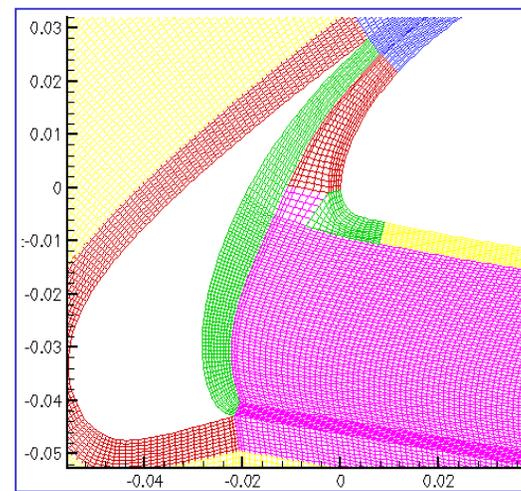
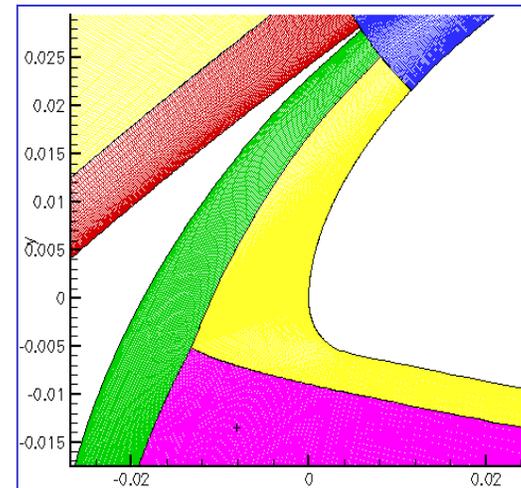


Maillage  
CFD



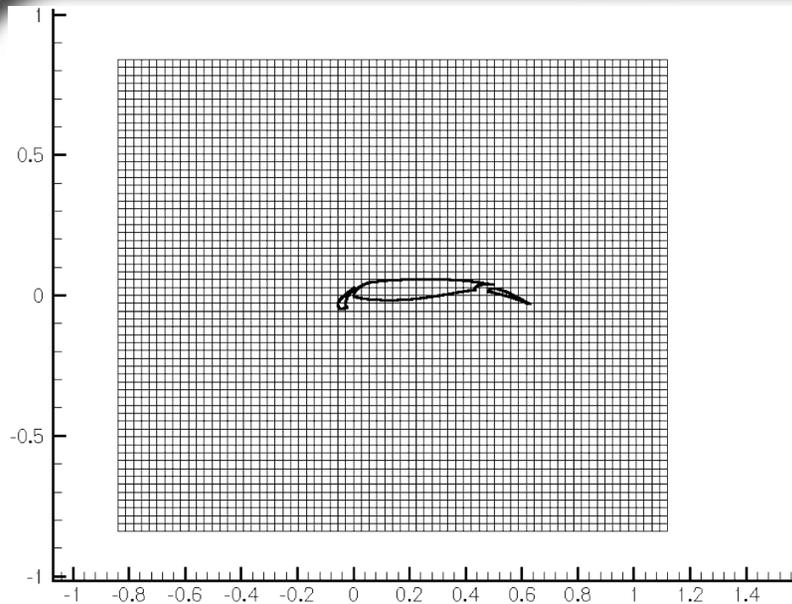
Maillage  
acoustique

### Région du bec

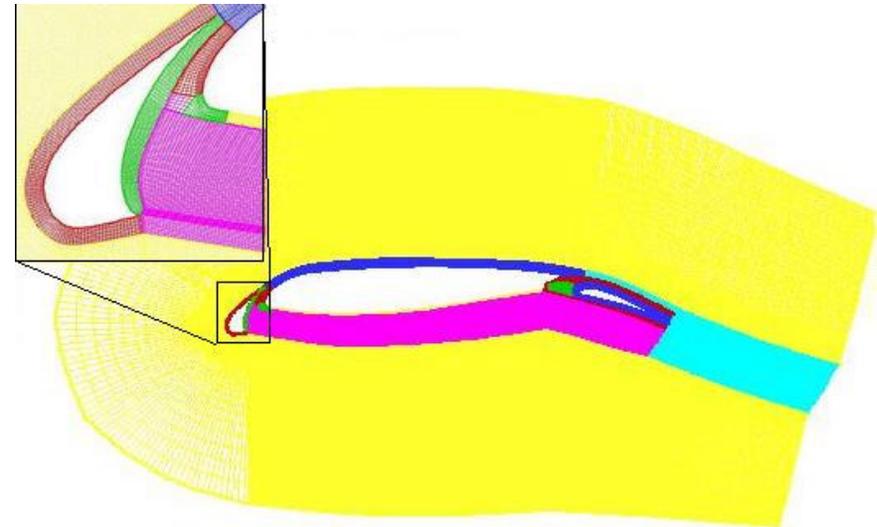


**Vers un Couplage (faible) CFD/CAA par terme source volumique**  
**Rayonnement acoustique d'une source ponctuelle dans une cavité de bec**  
**Interpolation maillage curviligne « body-fitted » / maillage cartésien**  
**Méthode type Chimère**

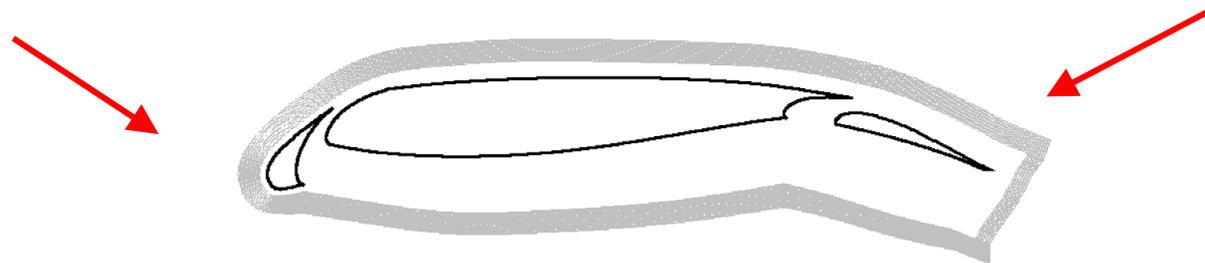
G. Desquesnes



**Maillage Cartésien 1,6 Mpoints**



**Maillage curviligne "Body-fitted"**



**Zone de recouvrement**  
**Interpolation par polynômes**  
**de Lagrange (ordre 6)**

ONERA

# Couplage (faible) CFD/CAA par terme source volumique

Rayonnement acoustique d'une source ponctuelle dans une cavité de bec

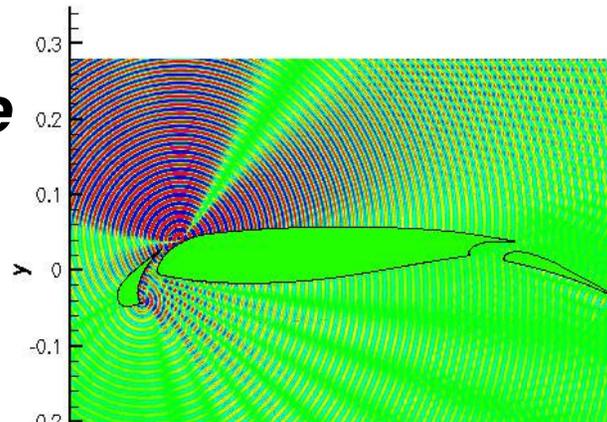
Source au bord de fuite supérieur du bec

Résultats – 1

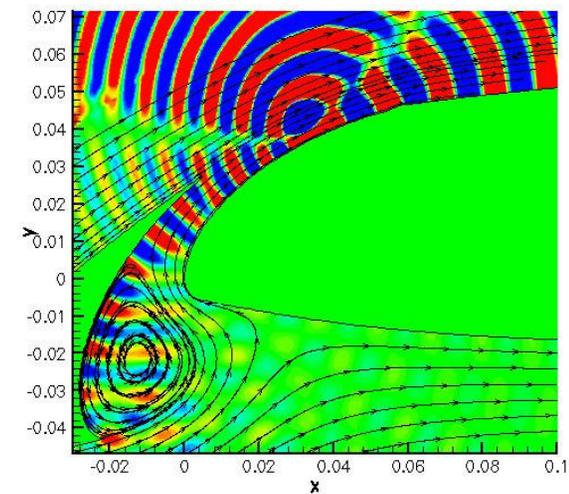
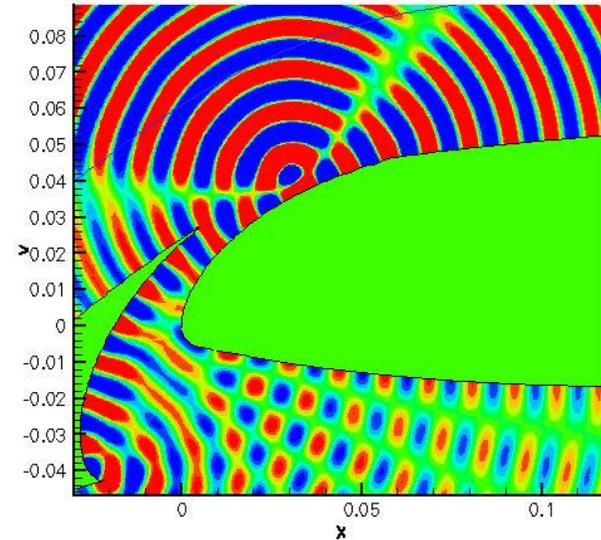
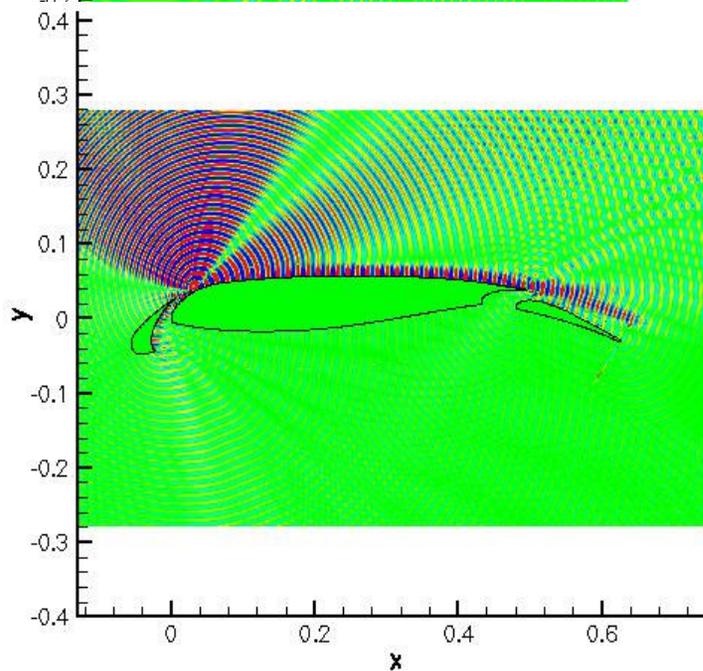
D. Mincu

**Pression  
instantanée**

**Sans  
écoulement**



**Avec  
écoulement**



# Couplage (faible) CFD/CAA par terme source volumique

Rayonnement acoustique d'une source ponctuelle dans une cavité de bec

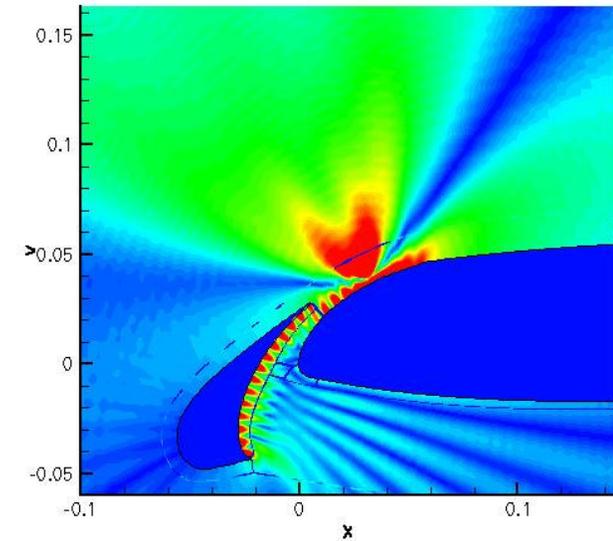
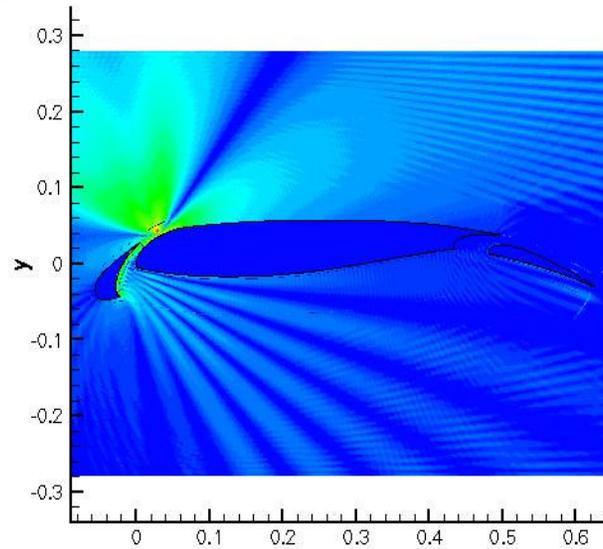
Source au bord de fuite supérieur du bec

Résultats - 2

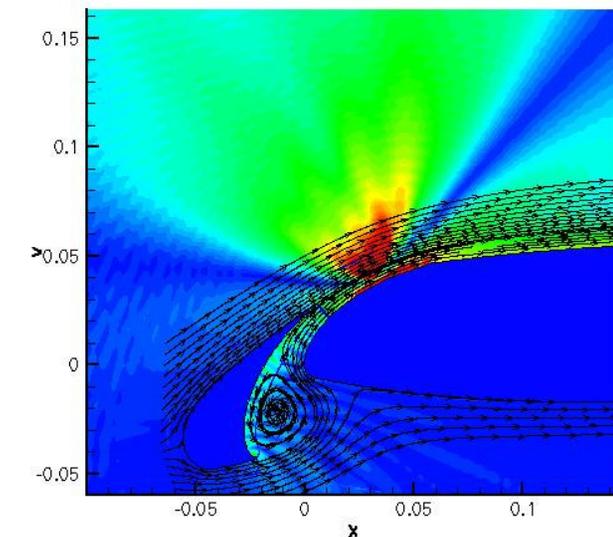
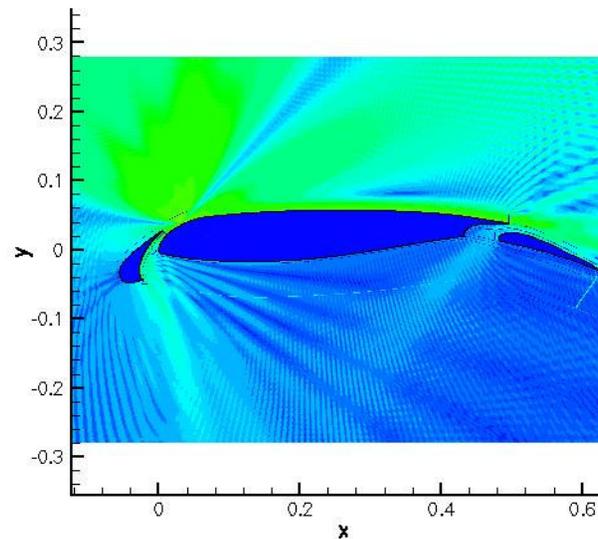
D. Mincu

**Pression  
RMS**

**Sans  
écoulement**



**Avec  
écoulement**



# Couplage (faible) CFD/CAA par terme source volumique

## Rayonnement acoustique d'une source ponctuelle dans une cavité de bec

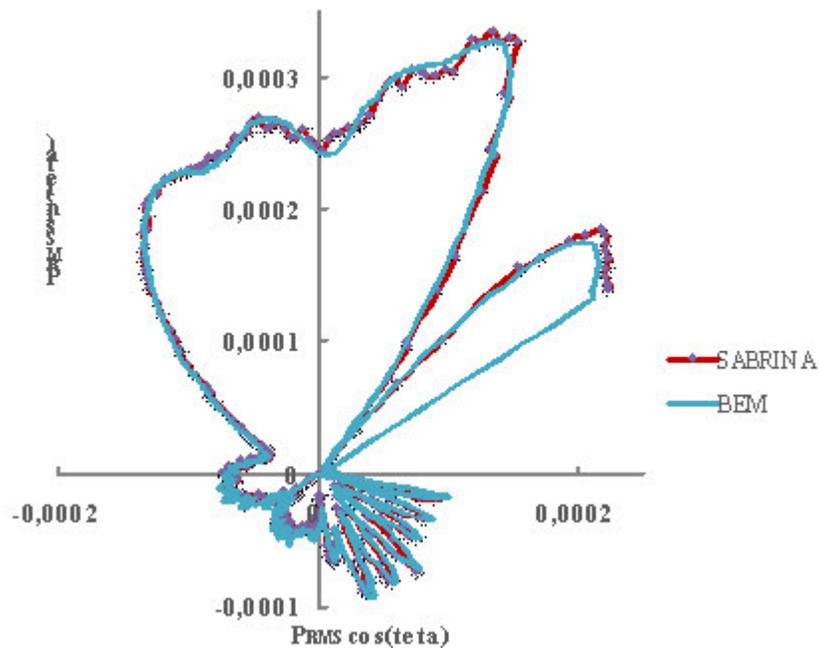
### Source au bord de fuite supérieur du bec

### Résultats - 3

D. Mincu

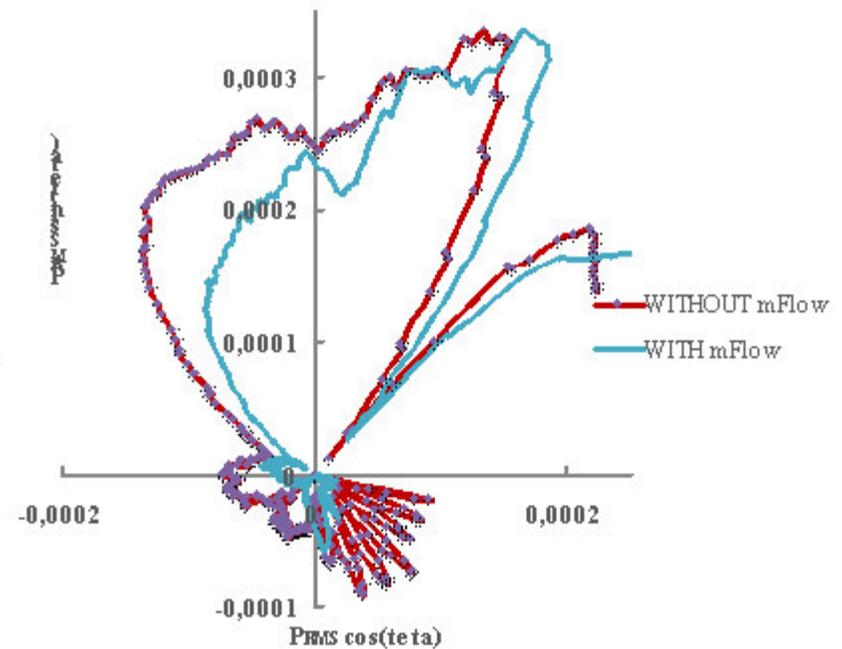
## Pression RMS – Diagramme de directivité

Directivity diagram source 17



**Sans écoulement :**  
**comparaison Euler / BEM**

Directivity diagram source 17



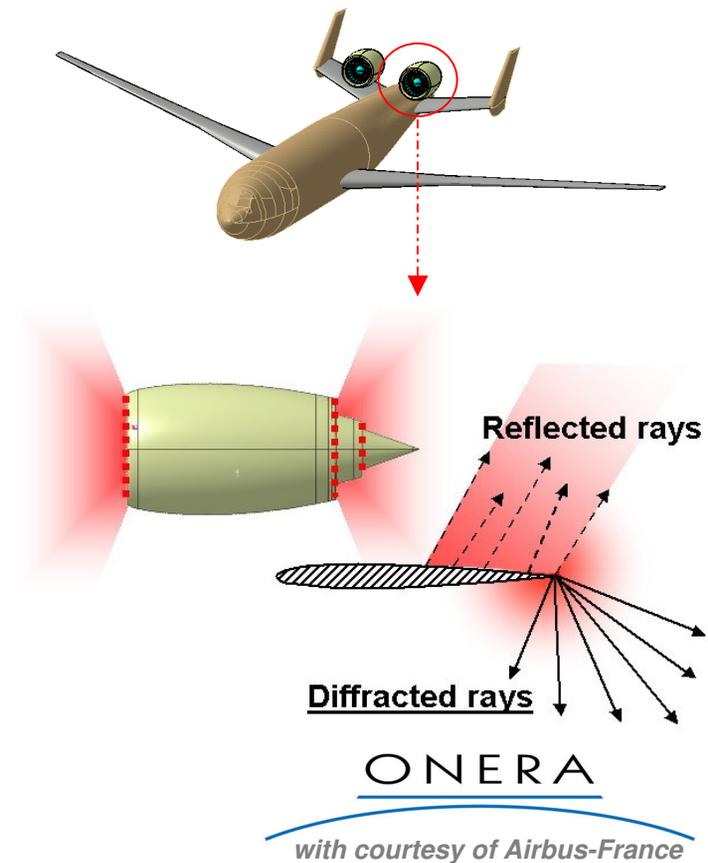
**Euler : Comparaison**  
**avec / sans écoulement**

# ***Simulation numérique des effets d'installation***

- Contexte : nouveaux concepts Airbus
- Objectif : masquage du bruit de fan aval par fuselage / empennage
- Méthode hybride Euler / BEM en 3D
- Méthode Euler en 2D avec maillages de type Chimère

# Contexte : nouveaux concepts Airbus

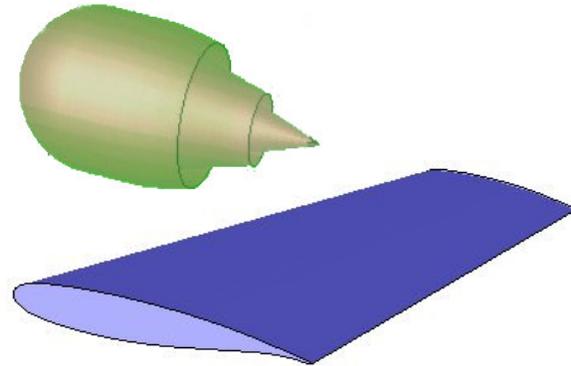
- Concept Rear Fuselage Nacelle (RFN)
- Bruit de fan rayonné vers l'aval
- Masquage acoustique par le fuselage et l'empennage



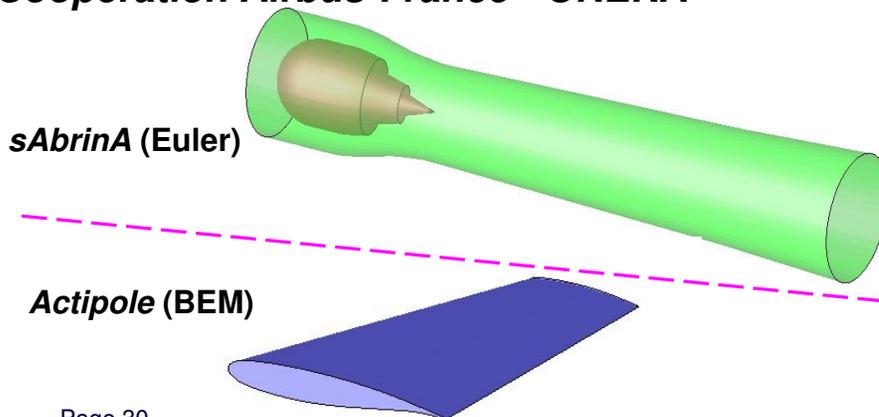
# Méthodologie

⇒ **Objectif à long terme :**  
**Calcul Euler 3D sur la configuration complète installée**

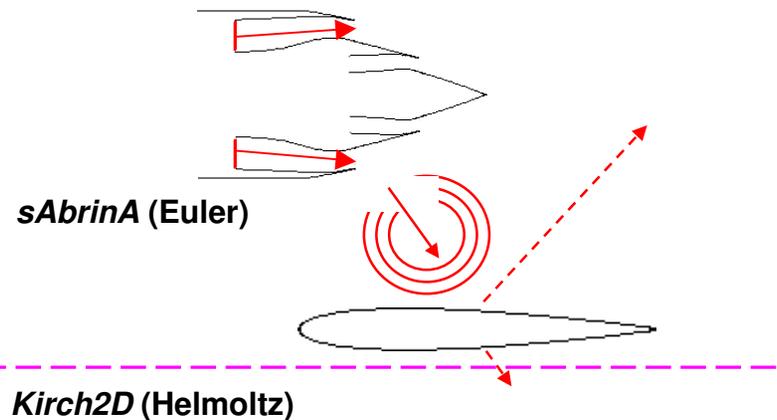
⇒ **Etapes intermédiaires**



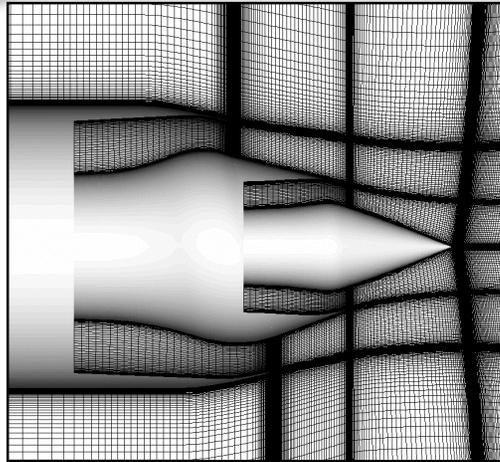
**Approche hybride 3D Euler/BEM**  
**Couplage faible entre éléments isolés**  
**Coopération Airbus-France - ONERA**



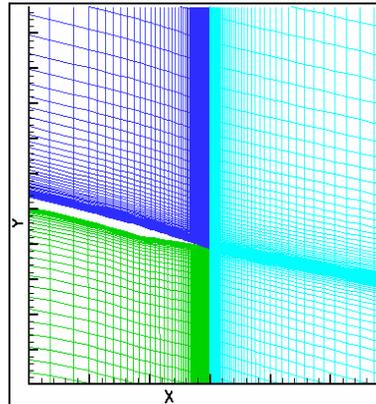
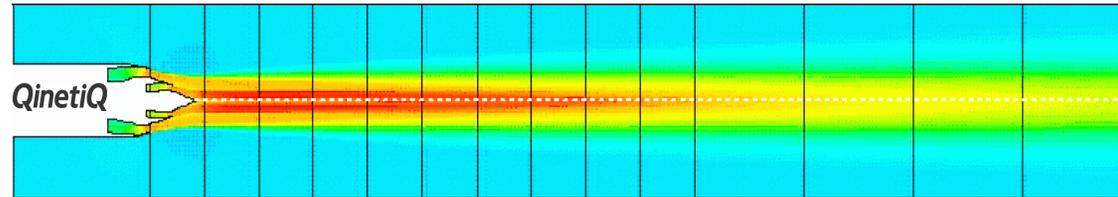
**Approche directe 2D Euler**  
**Calcul Euler 3D sur la configuration complète installée**



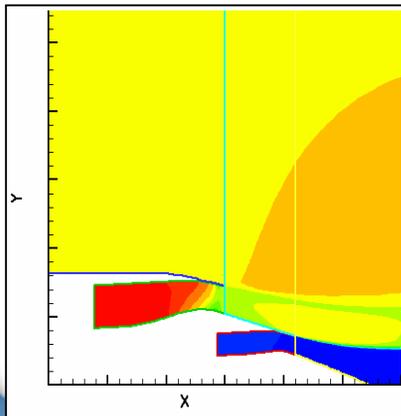
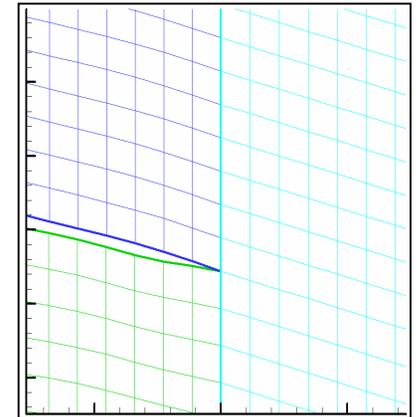
# Construction du maillage "acoustique" axisymétrique



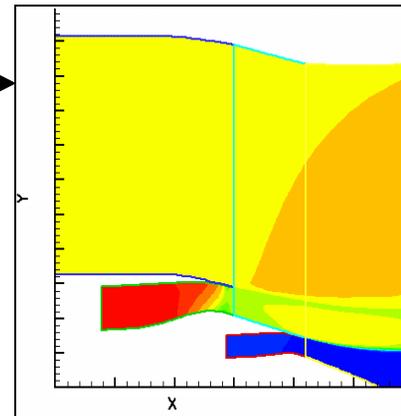
1- Calcul écoulement moyen (RANS)



2- Construction maillage acoustique



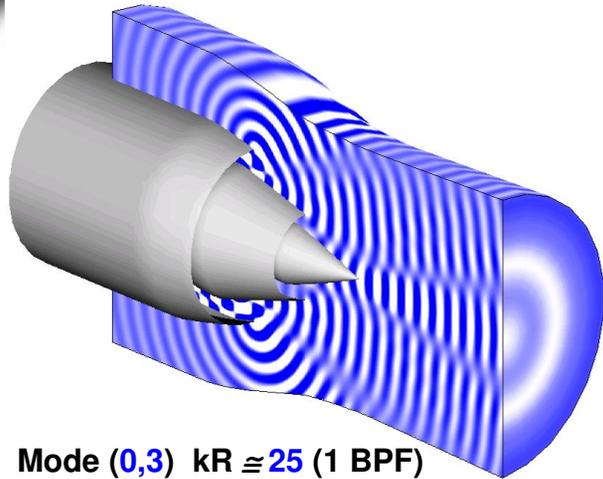
3- Interpolation de l'écoulement moyen par interpolation bilinéaire barycentrique



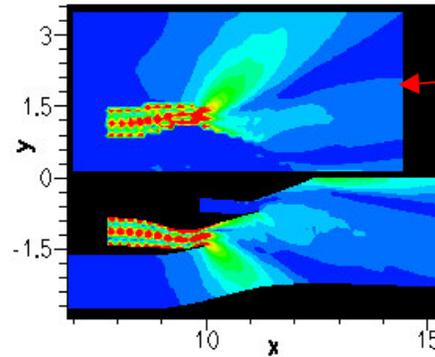
# Approche hybride 3D Euler/BEM

Calcul acoustique 3D tuyère isolée

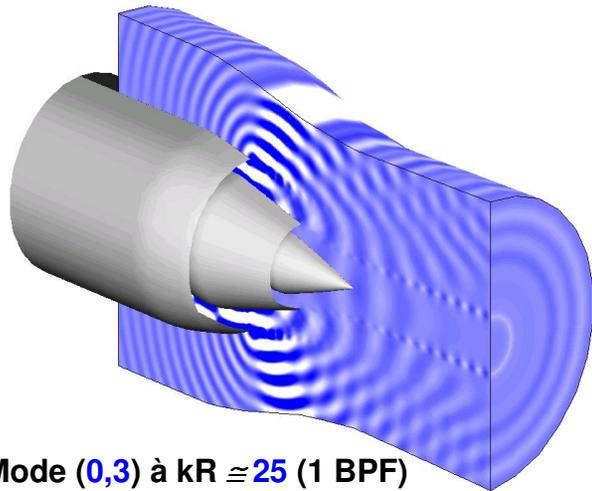
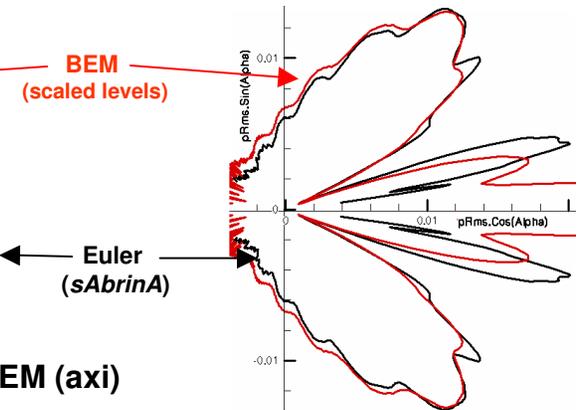
Résultats sans et avec écoulement ( $Mach_{max} = 0.9$ )



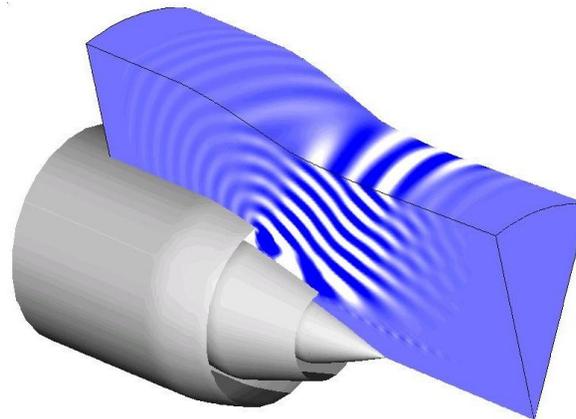
Mode (0,3)  $kR \cong 25$  (1 BPF)  
sans écoulement



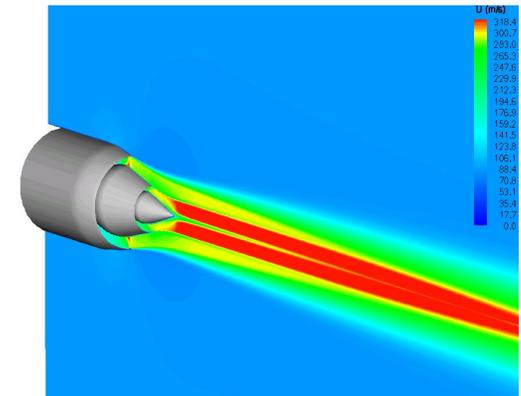
Comparaison avec BEM (axi)  
sans écoulement



Mode (0,3) à  $kR \cong 25$  (1 BPF)  
avec écoulement ( $Mach^{max} = 0.9$ )



Mode (10, 1) at  $kR \cong 25$  (1 BPF)  
avec écoulement



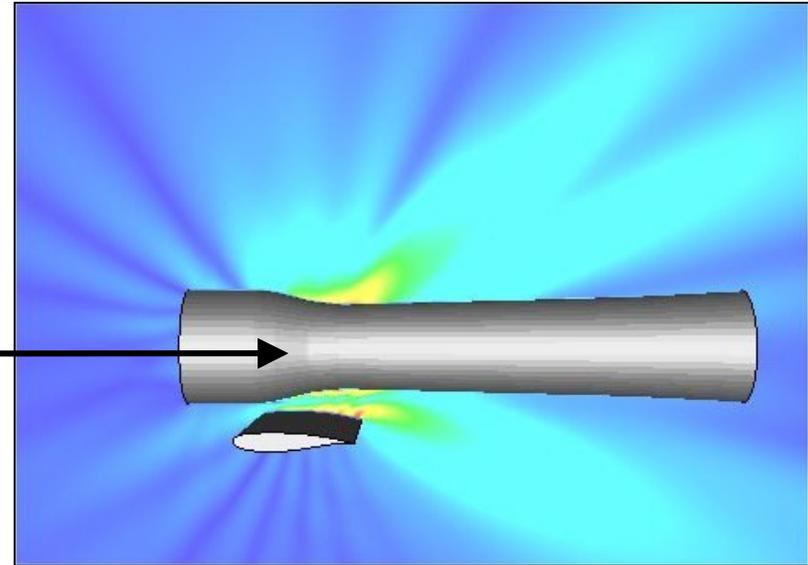
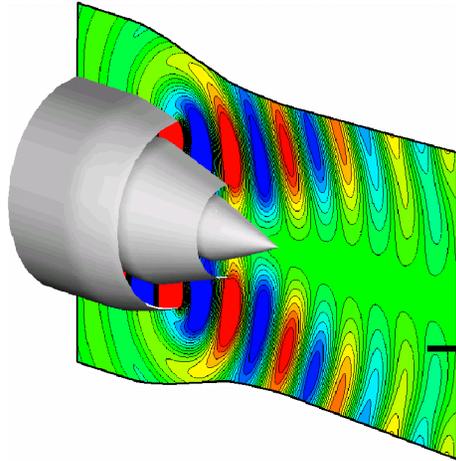
Écoulement moyen  
axisymétrique

# Approche hybride 3D Euler/BEM

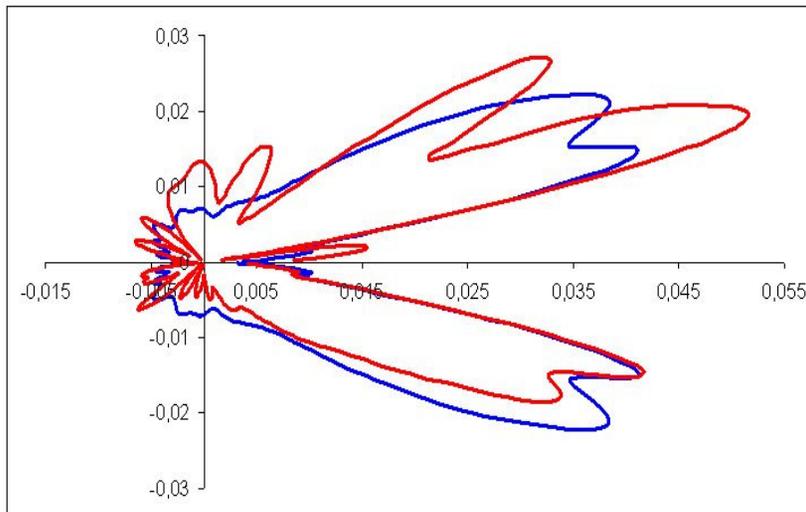
## Calcul acoustique 3D tuyère installée

### Résultat sans écoulement moyen

Donnée d'entrée :  
Propagation sur la  
tuyère **isolée**  
sans écoulement  
moyen (mode (2,1)  
à  $kR \cong 7.15$ )



Diffraction acoustique en présence du profil  
(Pression RMS)



— Isolé  
— Installé

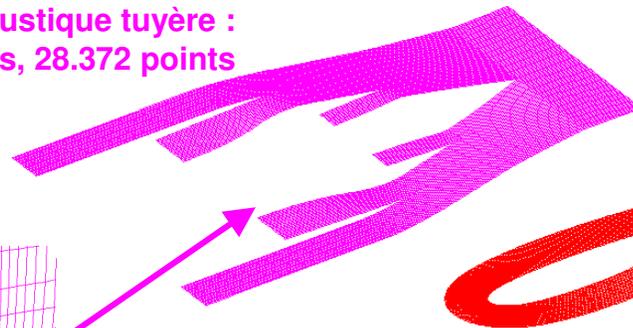
Mise en évidence des effets d'installation  
Diagrammes de directivité en champ lointain

# Approche directe 2D Euler

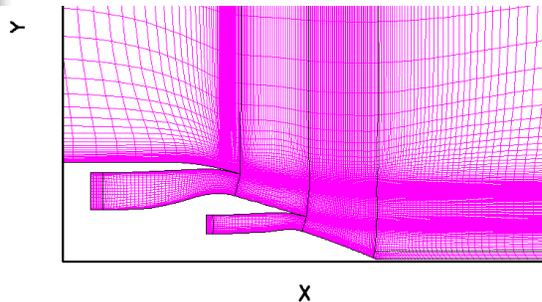
## Technique de maillage de type Chimère

Maillages curvilignes pour la tuyère et le profil isolés  
Maillage cartésien pour le fond  
Interpolation des écoulements moyens

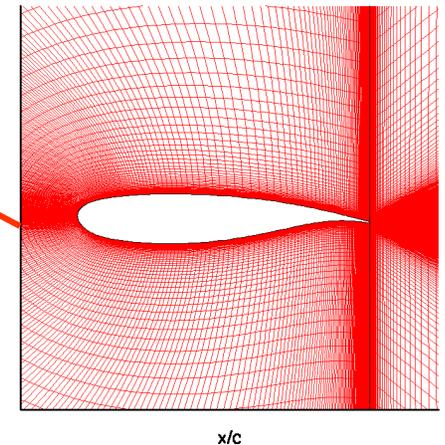
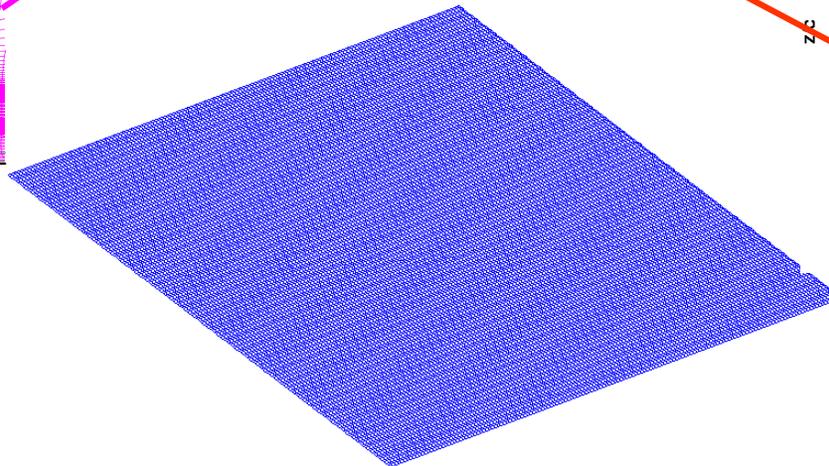
Maillage acoustique tuyère :  
2D structuré, 10 domaines, 28.372 points



Maillage acoustique profil :  
2D structuré, 2 domaines, 12.775 points



Maillage CFD demi-tuyère :  
2D structuré, 9 domaines, 44.159 points

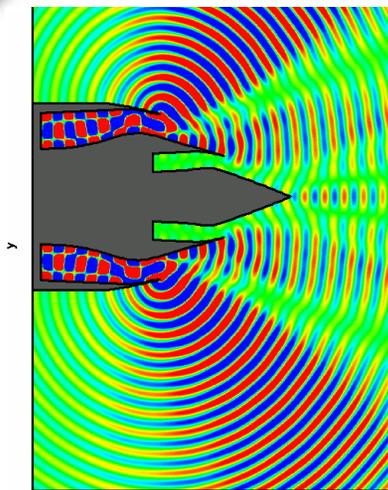


Maillage CFD profil  
2D structuré, 2 domaines, 85.458 points

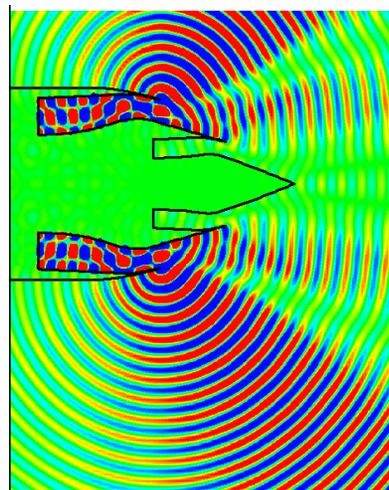
Maillage acoustique fond :  
2D structuré, 1 domaine, 127.466 points

# Approche directe 2D Euler

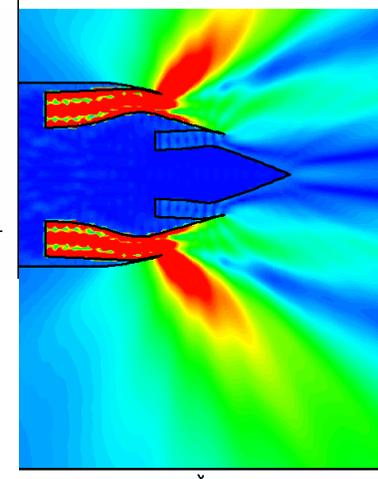
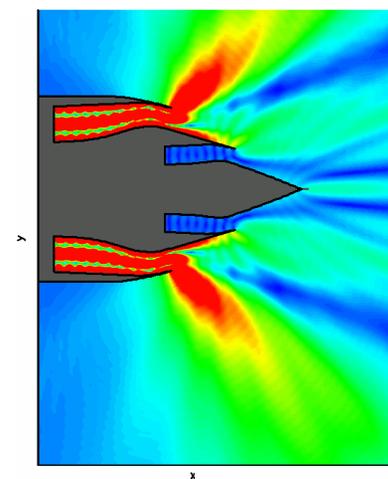
## Calcul acoustique 2D tuyère isolée



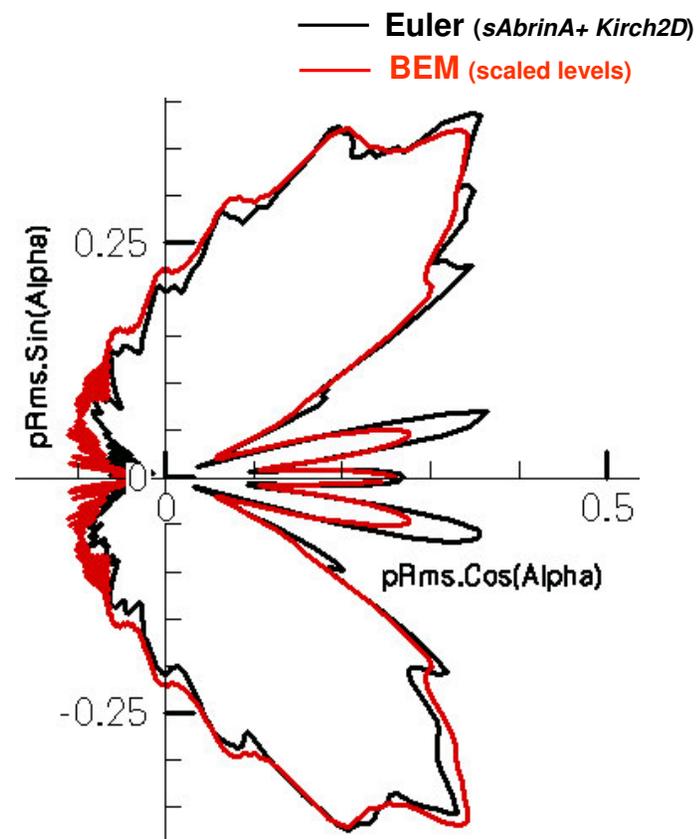
Euler (sAbrinA)



BEM (scaled levels)



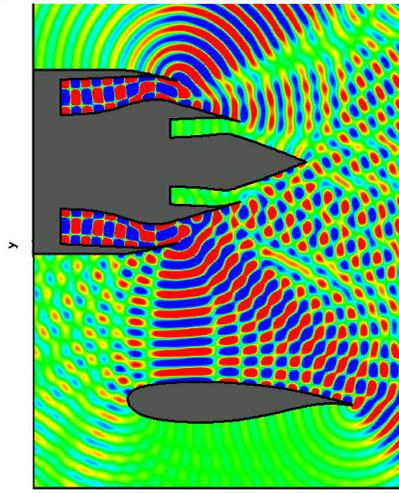
Sans écoulement  
Mode (0,3), à  $kR = 26.51$  ( $\approx 1$  BPF)



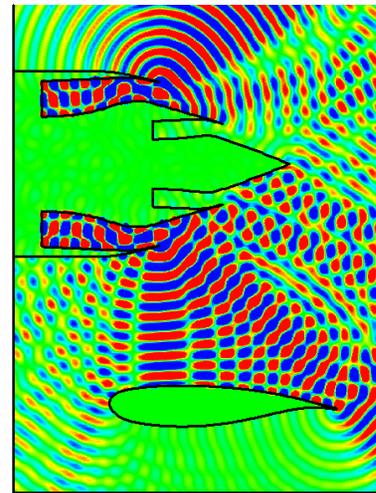
Directivité en champ lointain

# Approche directe 2D Euler

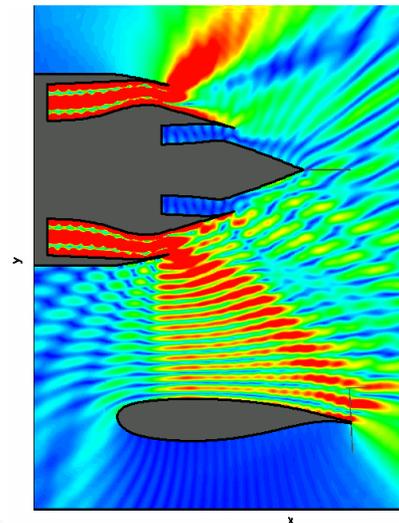
## Calcul acoustique 2D tuyère installée



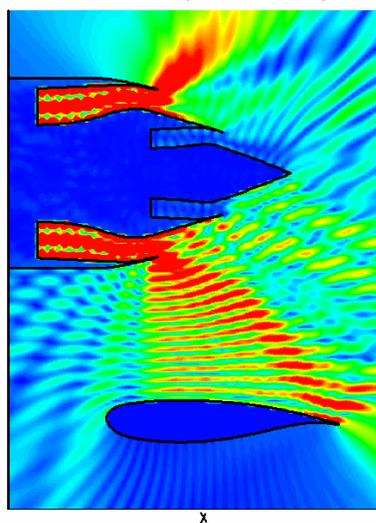
Euler (sAbrinA)



BEM (scaled levels)

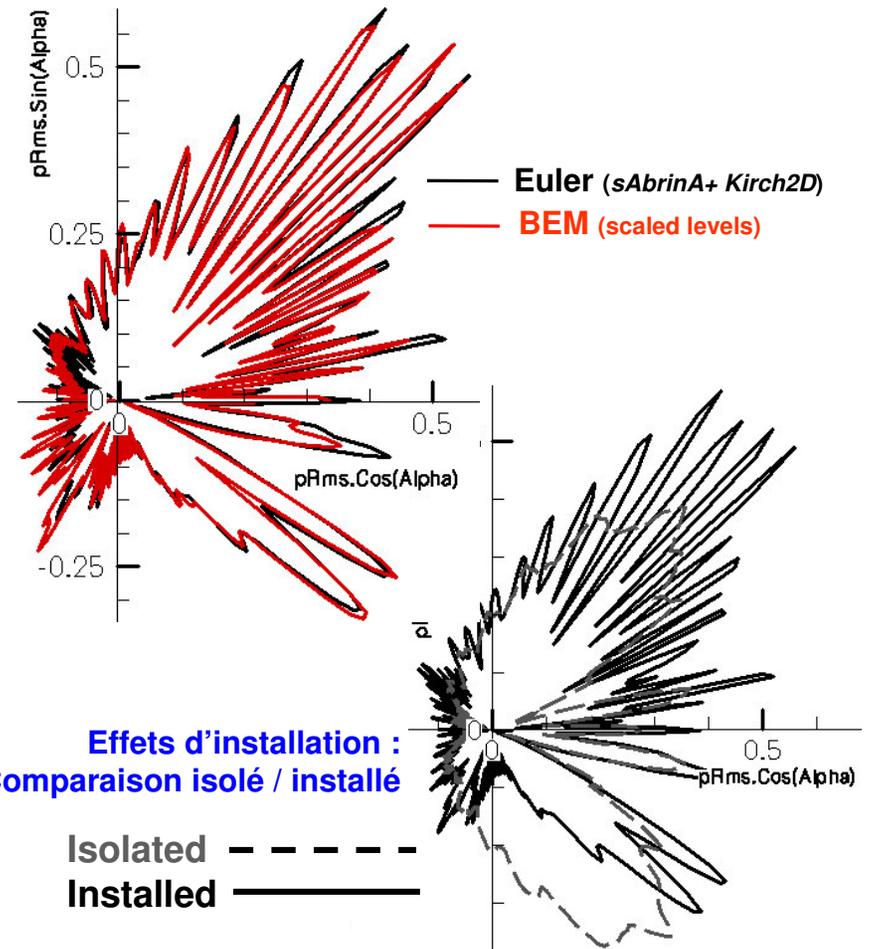


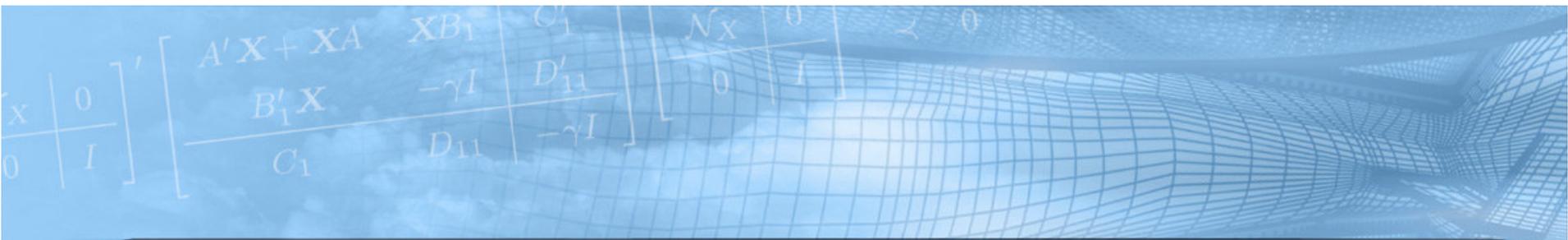
x



x

Sans écoulement  
Mode (0,3), à  $kR = 26.51$  ( $\approx 1$  BPF)





***FIN***