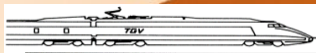


CFA 2018 – Le Havre

# Dimensionnement d'un dispositif d'excitation acoustique pour veine d'essais aéroacoustiques



J.C. LE ROUX (CTTM)  
J. GOLLIARD (CTTM)  
Ph. HERZOG (LMA)



SYNDICAT MIXTE D'AMÉNAGEMENT  
ET DE PROMOTION DE LA TECHNOPOLE DU MANS



UNION EUROPÉENNE

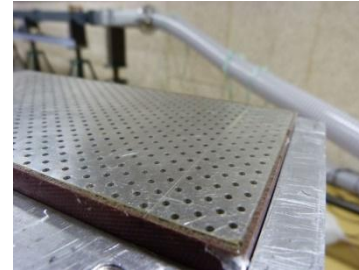
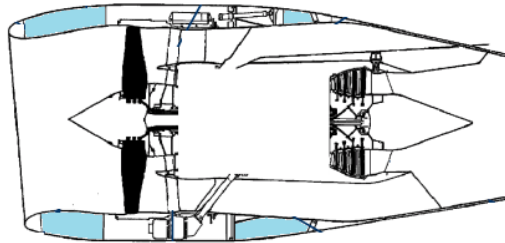


CE PROJET EST COFINANCÉ PAR  
LE FONDS EUROPÉEN DE DÉVELOPPEMENT RÉGIONAL

[www.cttm-lemans.com](http://www.cttm-lemans.com)

# Contexte

- Conception d'un moyen d'essais pour l'étude et la qualification des « liners »

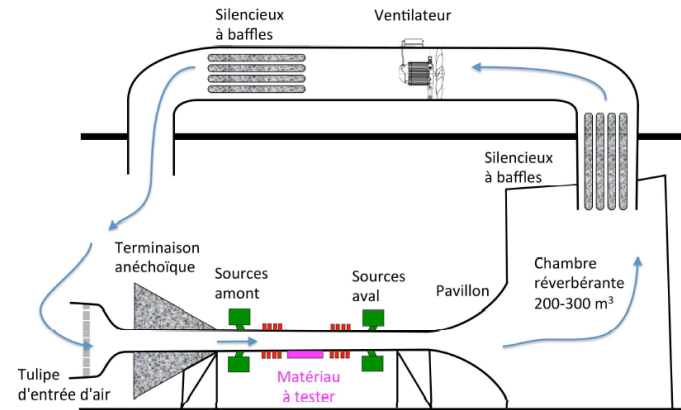


- Objectif : pouvoir réaliser la qualification des liners dans des conditions proches des conditions d'utilisation réelles :
  - Niveau acoustique élevé
  - Ecoulement rasant
  - Ondes acoustiques d'incidences variables
- Moyen d'essais en cours de fabrication pour le compte de Le Mans Université

# Problématique

- Extraits du cahier des charges
  - Deux dispositifs d'excitation acoustique (amont et aval de l'échantillon)
  - Section de la veine : 150 x 280 mm<sup>2</sup>
  - Pilotage : mode par mode (ou combinaisons modales indépendantes)
  - Gamme de fréquences : 300Hz – 5kHz
  - Niveau acoustique sur le matériau à tester  $L_{spec} > 145\text{dB}$  (excitation sinus pas à pas)
  - (Niveau acoustique de l'ordre de 150dB en excitation large bande)

Comment dimensionner le dispositif d'excitation électroacoustique ????



# Démarche

La démarche de conception est faite en deux étapes

- 1) Dimensionnement électroacoustique des sources
  - Etablissement de spécifications « unitaires »
  - Essais sur prototypes
  - Conception des sources unitaires
  - Estimation du nombre de sources nécessaires
  
- 2) Optimisation du nombre et des positions de sources
  - Proposition de positions jugées favorables à partir de critères simples prenant en compte le couplage des sources avec la veine
  - Analyse du conditionnement de la matrice des transferts modaux pour valider et optimiser les solutions retenues
  - Processus itératif

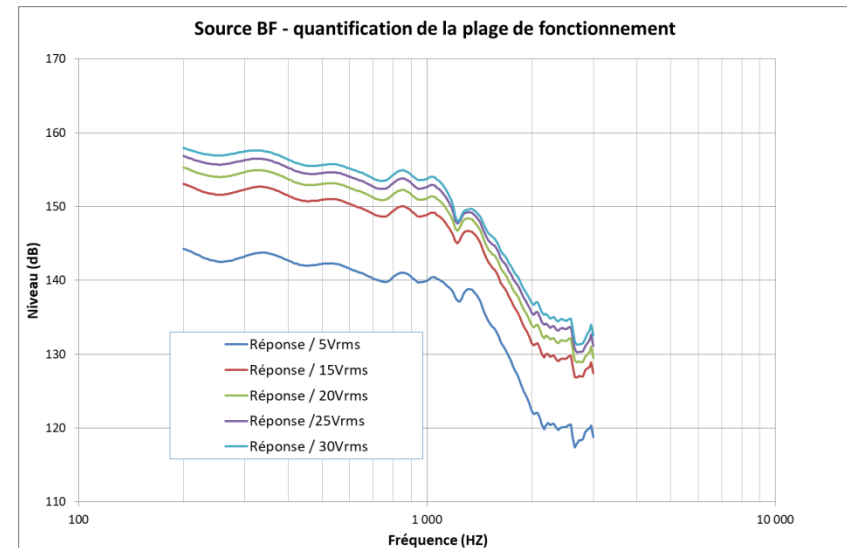
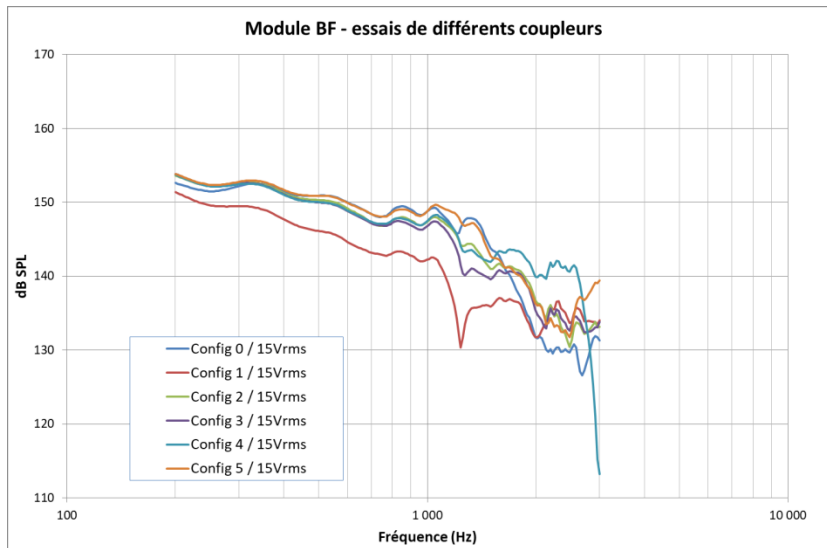
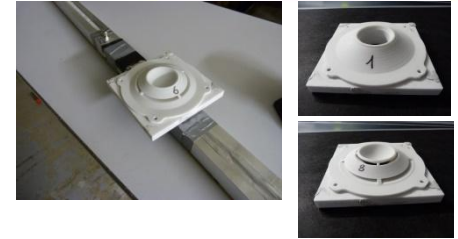
# Spécifications unitaires

- Mise au point des sources unitaires : effectuée en laboratoire sur une veine de petite section :
  - Propagation en mode plan + terminaisons anéchoïques : réponse → 5kHz
  - Montage source en paroi : couplage « réaliste » avec la veine  
⇒ guider le dimensionnement des sources et estimer leur nombre
- Définition d'une spécification « laboratoire »
  - Rapport des sections des veines :  $Lp_{ULabo} = Lp_{Uveine} + 26.3dB$
  - Hypothèse sommation parfaite des débits :  $Lp_{Uveine} = Lp_{Spec} - 20 \times \log(N)$
  - Marge de sécurité « contrôle » :  $3dB$  (premiers modes) et  $6dB$  (modes supérieurs)
  - Marge de sécurité « matériel » :  $3dB$
- Spécification de niveau dans la veine laboratoire :
  - 300Hz – 1.1kHz :  $Lp_{ULabo} \geq 177.3dB - 20 \times \log(N)$  (modes [0,0], [1,0], [0,1])
  - 1.1kHz – 5kHz :  $Lp_{ULabo} \geq 180.3dB - 20 \times \log(N)$  (modes supérieurs)



# Source « basses fréquences »

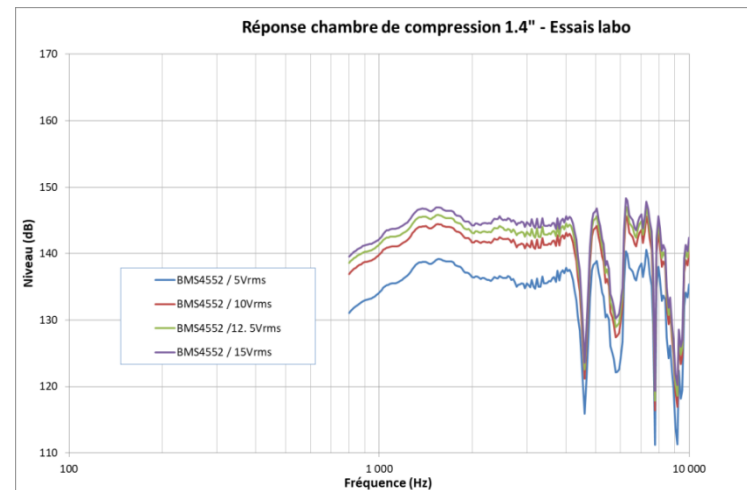
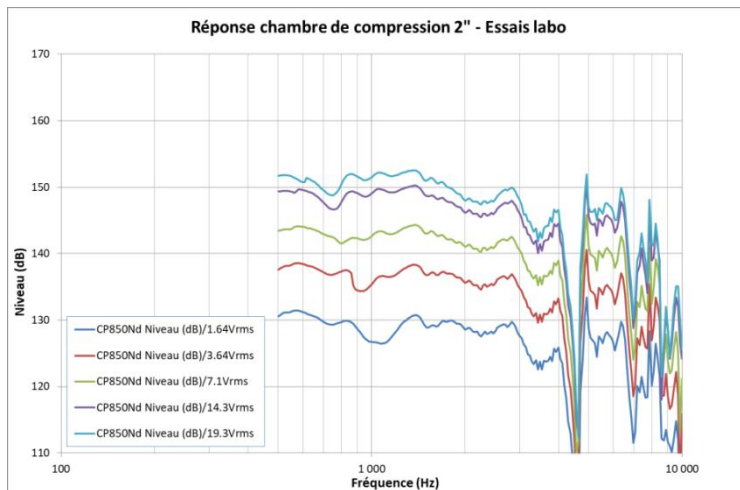
- Haut-parleur « Pro » de 17cm
- Prototypage de différents coupleurs acoustiques
- Quantification de la plage de fonctionnement linéaire



- Utilisation raisonnable jusqu'à  $\cong 20Vrms$
- Plage de fréquence utile : 300Hz – 1.1kHz
- Niveau  $Lp_{ULabo} \geq 152 \text{ dB} \Rightarrow N \text{ sources} \geq 19$

# Source « hautes fréquences »

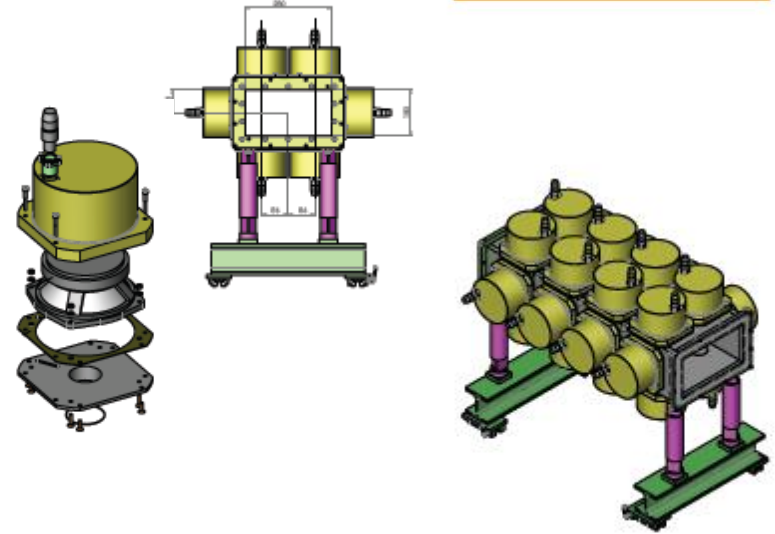
- Plusieurs moteurs de chambre de compression 1.4" et 2" testés
- Prototypage de différents coupleurs acoustiques
- Quantification de la plage de fonctionnement linéaire



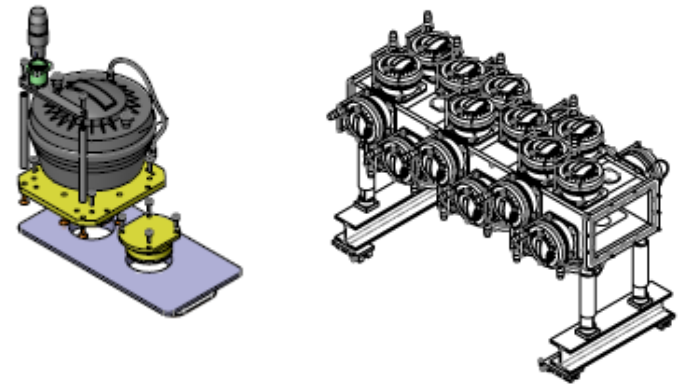
- Chambre 2" sélectionnée. Plage de fréquence utile :  $f > 500\text{Hz}$
- Utilisation raisonnable à  $\cong 20\text{Vrms}$  / ponctuelle à  $25\text{Vrms}$  (HF)
- Niveau  $Lp_{ULabo} \geq 145\text{ dB}$  sur  $[500\text{Hz} - 5\text{kHz}] \Rightarrow N\text{ sources} \geq 59$
- qq dB de marge supplémentaire en dessous de 3kHz

# Premier dimensionnement

- 24 modules de source BF
  - Gamme de fréquence 300Hz – 1.1kHz
  - Mode plan uniquement
  - Réparties par groupe de 6
  - Montage en 4 plans  $\Rightarrow$  4 canaux de pilotage



- 60 modules de source HF
  - Gamme de fréquence 600Hz – 5kHz
  - Mode plan au-delà de 1kHz
  - Pilotage des modes supérieurs  $f > 600\text{Hz}$
  - 60 canaux de pilotage indépendants (chaque mode à un  $Kz$  différent)
  - **Positions optimales à définir**



# Optimisation des positions de sources HF vs couplage veine

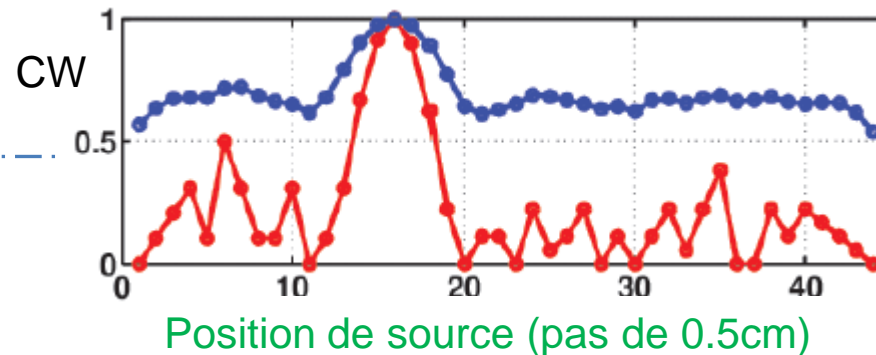
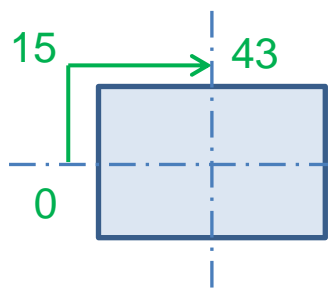
- Veine :
  - guide d'onde rectangulaire (x,y)
  - air en mouvement avec vitesse axiale (z) supposée uniforme
- La description du problème peut être linéarisée :

$$p(x, y, z) = \sum_N [C_N^+ e^{-jk_N z} + C_N^- e^{+jk_N z}] \Phi_N(x, y)$$

- Orthogonalité des termes : l'efficacité d'une source est proportionnelle au produit de deux coefficients de couplage :
  - CW : lié à la position transversale (x,y)
  - Cz : dépendant de la position axiale « z » le long de la veine.
- Une première optimisation des positions de sources est faite par une analyse séparée de ces deux coefficients.

# Positions transverses (i)

- Coefficient de couplage  $CW=|\Phi_N(x, y)|$ 
  - ⇒ CW est purement géométrique
  - ⇒ peut être calculé pour toutes les positions sur la périphérie d'une section transversale



Moyenne sur tous les modes  
Valeur minimale sur tous les modes

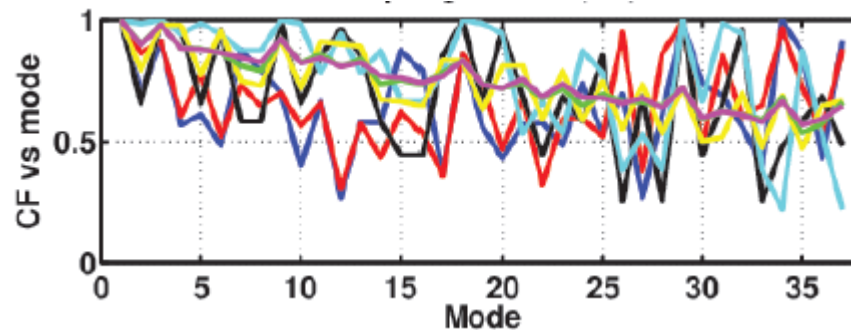
Les coefficient CW :

- Sont maximaux lorsque la source est positionnée exactement dans un coin
- Décroissent ensuite rapidement dès que la position s'éloigne de la position optimale
- Sont plus critiques pour les modes d'ordre élevé

⇒ **Il est impératif de positionner les sources aussi près que possible des coins**

# Positions transverses (ii)

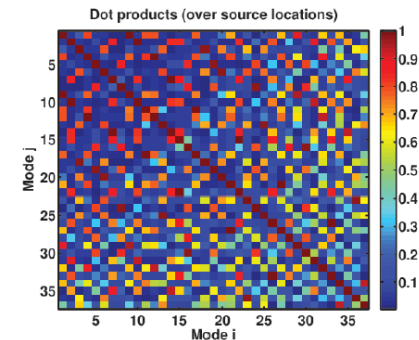
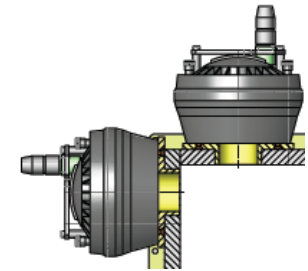
- Impératif : minimiser la longueur totale du tronçon de sources  
⇒ **minimum 4 sources par section**
- Solution optimale :
  - 5 sources par section : 4 aux coins + 1 position variable sur grand coté
  - Optimisation de la position variable sur plusieurs sections : permet de faire varier les entraxes
  - Valeur de CW « moyen »  $> 0.57$  pour tous les modes



**CW moyen par section**

# Limites de l'approche

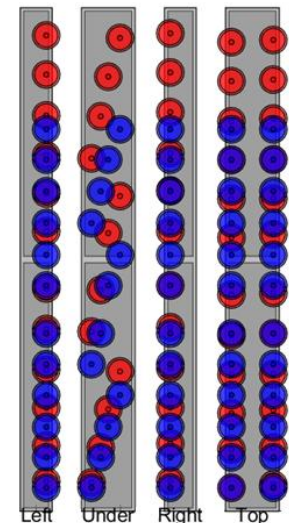
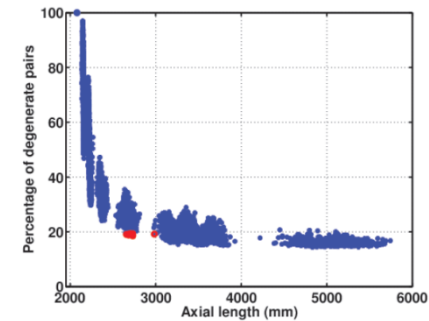
- Simulations avec des sources ponctuelles
  - Diamètre de sortie du coupleur de qq cm  $\Rightarrow$  le débit de chaque source aura tendance à se répartir sur l'orifice de sortie selon le principe de « moindre action »
  - Effet dû au décalage de la source par rapport au coin : valeur minimale de CW plus faible que prévue  $\Rightarrow$  **il est impératif de prévoir une marge de niveau lors du dimensionnement du réseau de sources**
- Compromis avec la sélectivité modale
  - Avec la solution choisie, une consigne visant à générer un mode va systématiquement en exciter d'autres  $\Rightarrow$  difficile d'obtenir une émergence de 6dB mode par mode
  - Compromis avec la maximisation du critère CW : améliorer la sélectivité réduit la valeur des CW  $\Rightarrow$  plus de sources nécessaires !!!
  - Améliorer en jouant sur les positions axiales



# Positions axiales

- Résonances longitudinales inconnues (conditions aux limites variables)
- Démarche proposée :
  - Choix des positions en évitant un multiple de  $\lambda/2$  entre chaque paire de section de sources
  - Respect strict du critère impossible  $\Rightarrow$  minimisation du nombre de configurations ne le respectant pas
  - Un canal de pilotage par source : 60 positions axiales indépendantes

« *position  $N = \text{position } N-1 + \text{écart mini} + \text{variable aléatoire}$  »*
- Solutions obtenues :
  - Longueur optimale de l'ordre de 3m
  - 12 sections de 5 sources
  - Coordonnées axiales légèrement différentes au sein de chaque section
  - Plusieurs configurations retenues



# Optimisation des positions de sources HF vs transferts modaux

- Objectifs de cette dernière étape :
  - Vérifier la capacité du pré-dimensionnement à pouvoir piloter les modes un par un, ou à générer des combinaisons indépendantes
  - Proposer des ajustements au dimensionnement

- Formalisme utilisé

$$\mathbf{p}(\omega) = \mathbf{M}(\omega) \mathbf{p}^{\pm}(\omega) \quad \mathbf{M} = \begin{bmatrix} \Psi_{1,1} T_{1,1}^+ & \cdots & \Psi_{1,N} T_{1,N}^+ & \Psi_{1,1} T_{1,1}^- & \cdots & \Psi_{1,N} T_{1,N}^- \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \Psi_{M,1} T_{M,1}^+ & \cdots & \Psi_{M,N} T_{M,N}^+ & \Psi_{M,1} T_{M,1}^- & \cdots & \Psi_{M,N} T_{M,N}^- \end{bmatrix}$$

- $p(\omega)$  : signaux de pression aux M positions de sources
- $p^{\pm}(\omega)$  : amplitudes des 2 x N ondes acoustiques propagatives
- $\Psi_{ij}$  facteurs de forme des modes,  $T_{j,i}^{\pm}$  décrivent la propagation axiale des modes

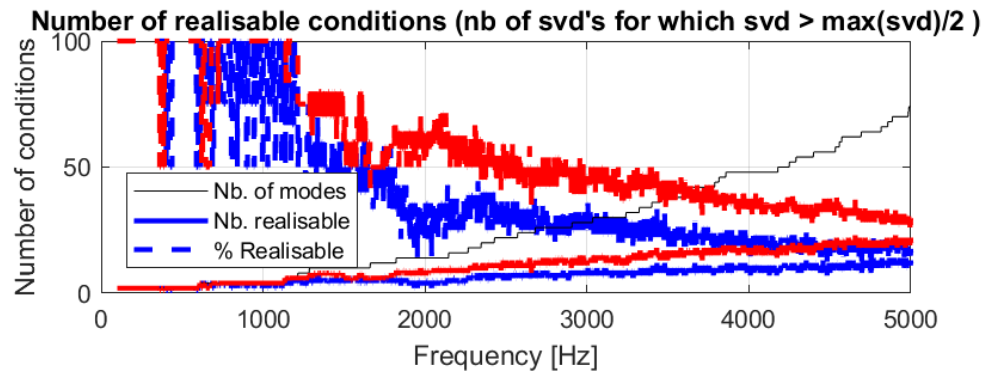
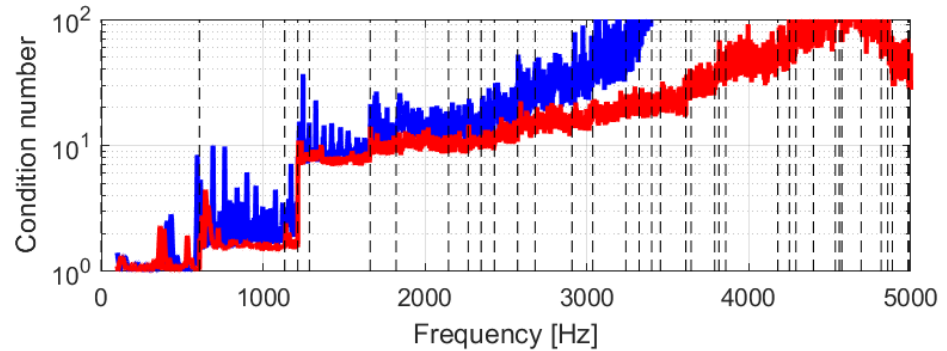
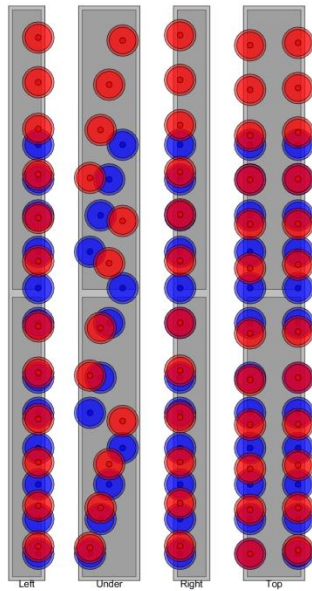
Exciter une combinaison de modes par un jeu de pressions imposées par les sources revient à inverser la matrice de propagation

$$\mathbf{p}^{\pm}(\omega) = \mathbf{M}^{-1}(\omega) \mathbf{p}(\omega),$$

# Etude du conditionnement de la matrice des transferts modaux

- Conditionnement de la matrice de propagation:
  - Chaque Valeur Singulière ( $V_s$ ) correspond à une combinaison de sources indépendante et indique l'efficacité avec laquelle elle peut être pilotée
  - Conditionnement = rapport  $V_{s_{\max}}/V_{s_{\min}}$ . Il indique le facteur d'amplitude perdu pour piloter la combinaison la moins efficace
  - En pratique :
    - ⇒ pas possible de piloter les combinaisons «  $V_s$  trop faibles »
    - ⇒ on regarde le nombre de  $V_s \geq V_{s_{\max}}/2$  (pilotage avec perte de niveau <6dB)
    - ⇒ % réalisable = nombre de  $V_s \geq V_{s_{\max}}/2$
- Etude du conditionnement : première approximation (ne tient pas compte du « comportement réel » des sources)
- Approche pragmatique : pas de modélisation complète de la veine : approche « de bon sens » pour éviter les erreurs flagrantes

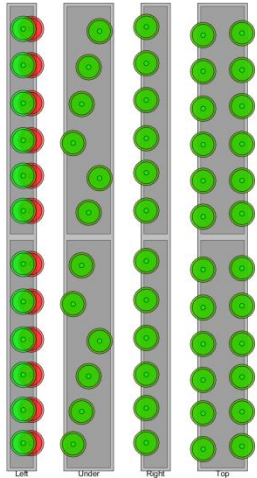
# Ajustement de la longueur



1 → 2

Allongement du  
tronçon

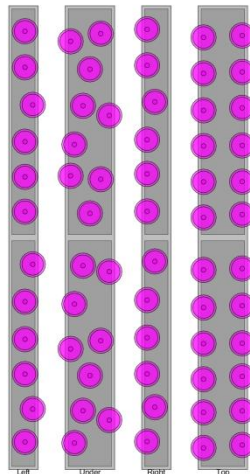
# Ajustement positions et nombre



2 → 3

12 sources décalées  
du coin

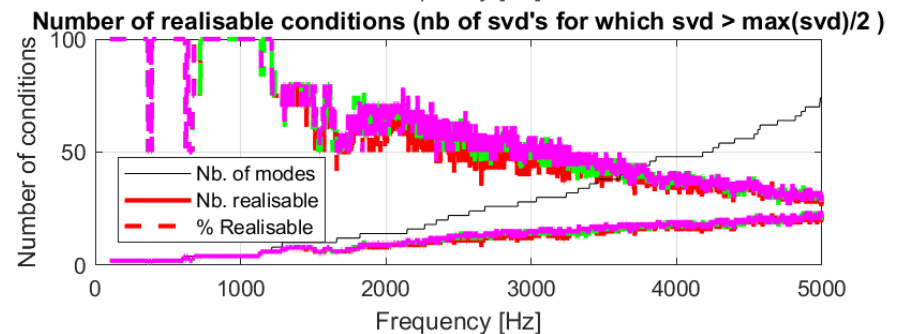
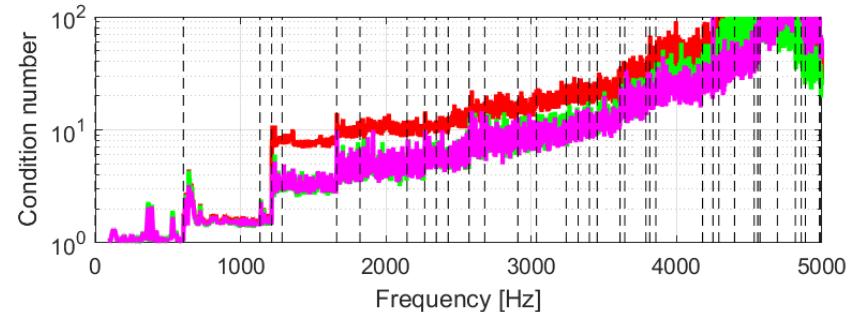
Meilleur pilotage des  
modes supérieurs  
**mais perte de niveau**



3 → 4

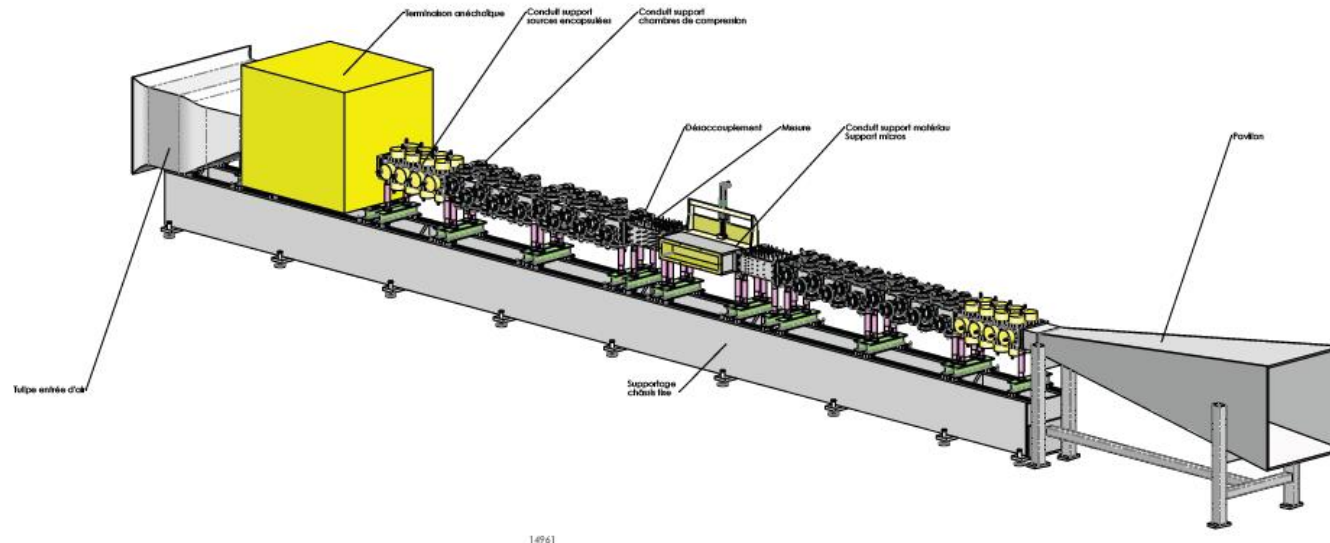
Ajout de 6  
sources

Compensation  
partielle de la  
perte de niveau



# Conclusions

- Dimensionnement final :
  - 24 sources BF par coté
  - 66 sources HF par coté
  - 70 canaux de pilotage indépendants



- Résultats..... 2019!