

Débruitage de la matrice interspectrale pour l'étude des sources aéroacoustiques

A. Dinsenmeyer^{1,2}, Q. Leclère¹, J. Antoni¹ et E. Julliard³

¹ Laboratoire Vibrations Acoustique

² Laboratoire de Mécanique des Fluides et d'Acoustique

Lyon, France

³ Airbus, Toulouse

Journée CeLyA – Mars 2019

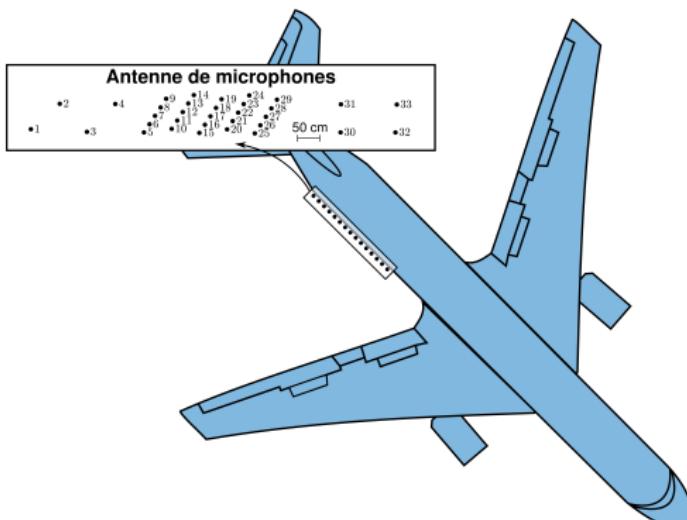


Contexte

- ▶ **Mesures bruitées** : Extérieur venté, soufflerie, milieu sous-marin, etc.

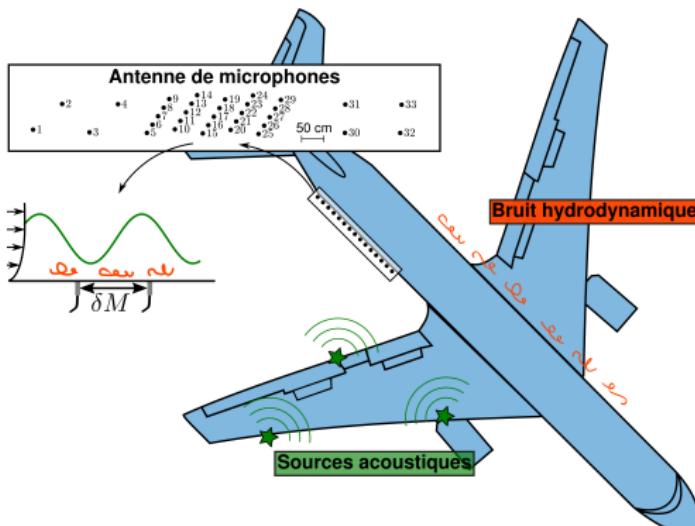
Contexte

- ▶ **Mesures bruitées** : Extérieur venté, soufflerie, milieu sous-marin, etc.
- ▶ **Contexte industriel** : design moteur et profil



Contexte

- ▶ **Mesures bruitées** : Extérieur venté, soufflerie, milieu sous-marin, etc.
 - ▶ **Contexte industriel** : design moteur et profil
 - ▶ 2 types de fluctuations de pression :
 - les sources acoustiques (**signal**)
 - la turbulence de l'écoulement (**bruit**)
- } SNR très faible voire négatif



Contexte

Comment séparer la contribution des sources acoustiques et le bruit de couche limite turbulente ?

Les méthodes existantes

- ▶ méthodes expérimentales : mousse, kevlar, microphones déportés,...
- ▶ soustraction du bruit de fond
- ▶ filtrage en nombres d'onde
- ▶ si les mesures sont suffisamment longues : post-traitement (ex : problème inverse)

Contexte

Comment séparer la contribution des sources acoustiques et le bruit de couche limite turbulente ?

Les méthodes existantes

- ▶ méthodes expérimentales : mousse, kevlar, microphones déportés,...
- ▶ soustraction du bruit de fond
- ▶ filtrage en nombres d'onde
- ▶ si les mesures sont suffisamment longues : post-traitement (ex : problème inverse)

Méthodes proposées

- ▶ Résolution d'un problème inverse : retrouver la contribution des sources
- ▶ Utilisation de signaux de référence non-bruités

Plan de la présentation

1 La matrice interspectrale

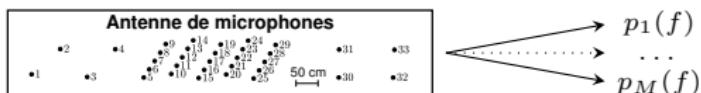
2 Analyse Factorielle Probabiliste

3 Débruitage référencé

4 Application en cas réel

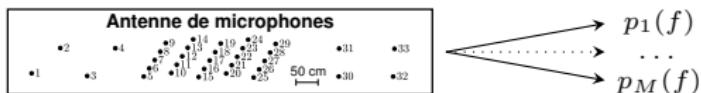
La matrice interspectrale

Spectres moyennés (processus stationnaire)



La matrice interspectrale

Spectres moyennés (processus stationnaire)

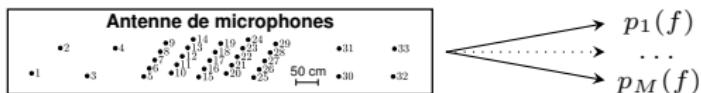


$$\mathbf{S}_{pp}(f)$$

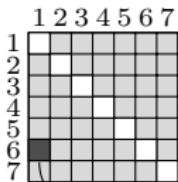
	1	2	3	4	5	6	7
1	■						
2		■					
3			■				
4				■			
5					■		
6						■	
7							■

La matrice interspectrale

Spectres moyennés (processus stationnaire)



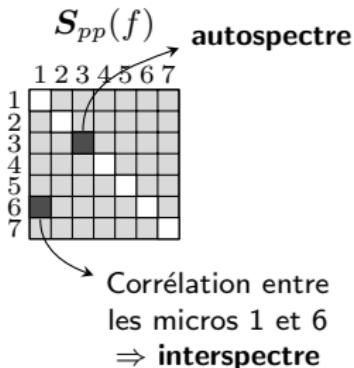
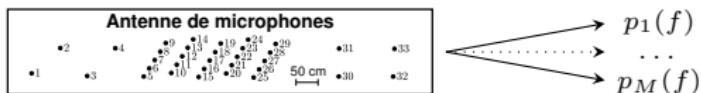
$$\mathbf{S}_{pp}(f)$$



Corrélation entre
les micros 1 et 6
 \Rightarrow **interspectre**

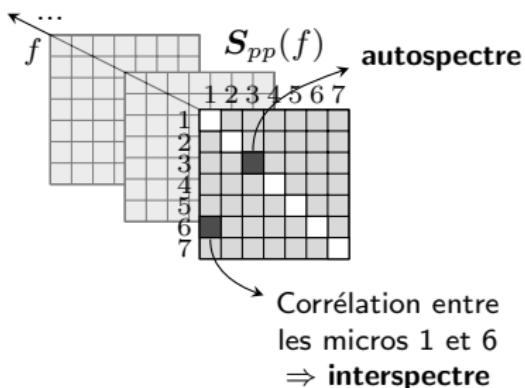
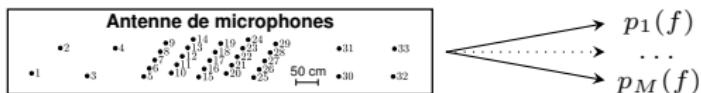
La matrice interspectrale

Spectres moyennés (processus stationnaire)

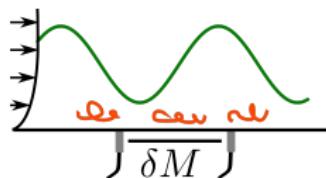


La matrice interspectrale

Spectres moyennés (processus stationnaire)



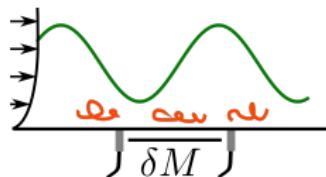
Propriétés de la MI



Pour $i = 1, \dots, I$ moyennes

$$\underbrace{\mathbf{p}_i}_{\text{spectres mesurés}} = \underbrace{\mathbf{a}_i}_{\text{sources acoustiques}} + \underbrace{\mathbf{n}_i}_{\text{bruit à retirer}}$$

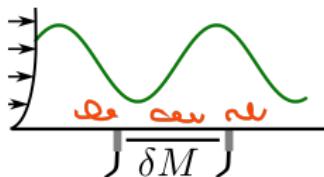
Propriétés de la MI



MI moyennées :

$$\underbrace{S_{pp}}_{\text{MI mesurée}} = \underbrace{S_{aa}}_{\text{sources acoustiques}} + \underbrace{S_{nn}}_{\text{bruit à retirer}} + \underbrace{S_{an} + S_{na}}_{\text{termes croisés}}$$

Propriétés de la MI



MI moyennées :

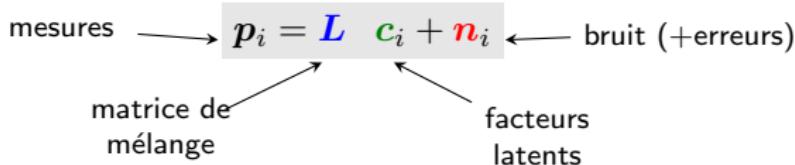
$$\underbrace{S_{pp}}_{\text{MI mesurée}} = \underbrace{S_{aa}}_{\text{sources acoustiques}} + \underbrace{\cancel{S_{nn}}}_{\text{bruit à retirer} \approx \text{diagonale}} + \underbrace{\cancel{S_{an}} + \cancel{S_{na}}}_{\text{termes croisés}} \rightarrow 0$$



- ▶ Signal **acoustique corrélé** : **MI à rang réduit**
peu des monopoles équivalents
- ▶ **Bruit** faiblement corrélé : **MI diagonale**

Analyse Factorielle Probabiliste

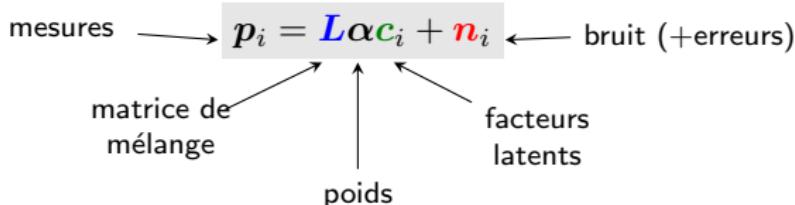
► Modèle statistique



- Représente les principales corrélations avec quelques paramètres (proche de l'ACP)
→ MI à rang réduit
 - Modèle de bruit anisotrope

Analyse Factorielle Probabiliste

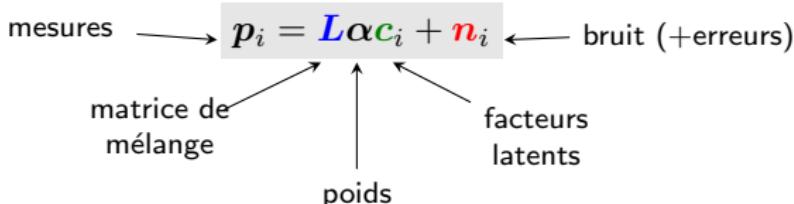
► Modèle statistique



- Représente les principales corrélations avec quelques paramètres (proche de l'ACP)
 - ↪ MI à rang réduit
- Modèle de bruit anisotrope
- Renforce la parcimonie pour réduire le nombre de facteurs
 - ↪ Compression de donnée

Analyse Factorielle Probabiliste

► Modèle statistique



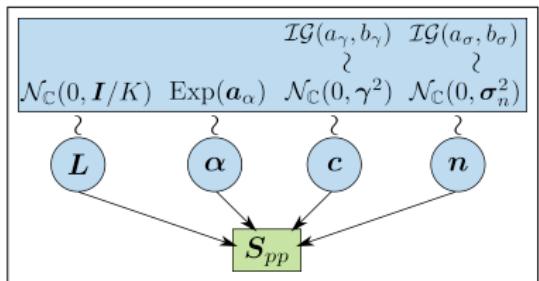
- Représente les principales corrélations avec quelques paramètres (proche de l'ACP)
 - ↪ MI à rang réduit
- Modèle de bruit anisotrope
- Renforce la parcimonie pour réduire le nombre de facteurs
 - ↪ Compression de donnée

► Approche bayésienne : une densité de probabilité par paramètre

$\mathbf{L} \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \lceil \frac{1}{K} \rceil)$	$\mathbf{c}_i \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \lceil \gamma^2 \rceil)$	$\mathbf{n}_i \sim \mathcal{N}_{\mathbb{C}}(0, \lceil \sigma_n^2 \rceil)$	$\boldsymbol{\alpha} \sim \mathcal{E}(a_{\alpha})$
--	---	---	--

+ hyper-paramètres : $\gamma^2, \sigma^2 \sim \mathcal{IG}(a_{\gamma, \sigma}, b_{\gamma, \sigma})$

Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation



Modèle paramétrique: $M(\theta)$
avec $\theta = \{L, \alpha, c, n, a_{\gamma, \alpha, \sigma}, b_{\gamma, \alpha, \sigma}\}$

Étape d'optimisation :

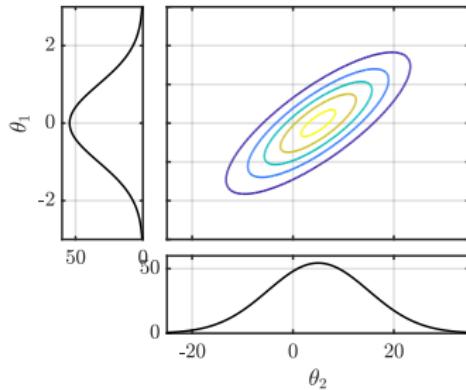
$$\theta = \underset{\theta}{\operatorname{argmax}} \underbrace{p(\theta | S_{yy})}_{\text{fonction objectif}}$$

La fonction objectif est la probabilité postérieure \rightarrow pas de forme explicite
 \hookrightarrow approximation avec des méthodes numériques

Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

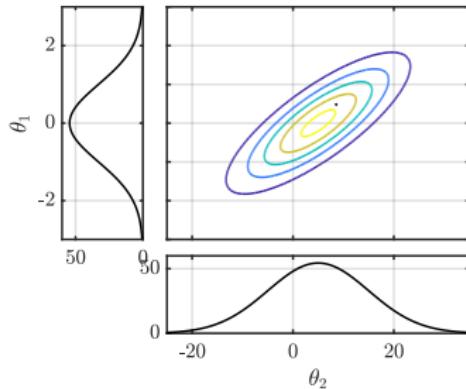
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

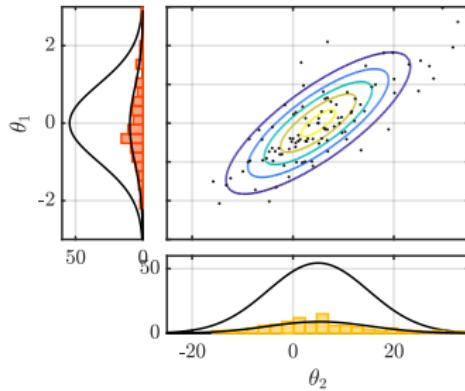
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

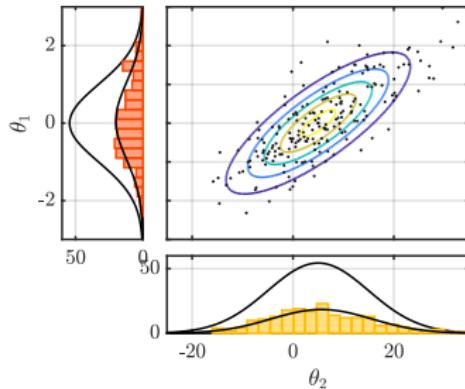
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

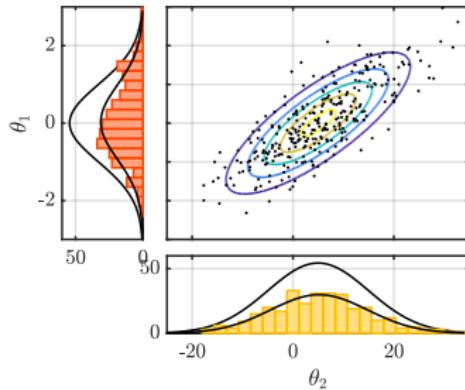
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

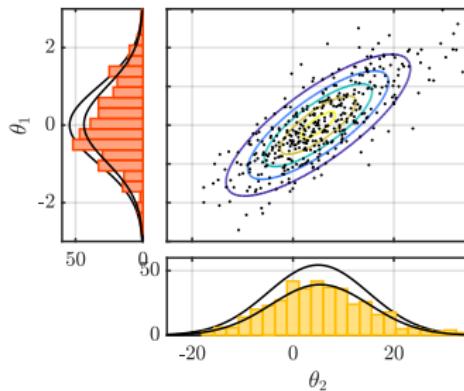
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

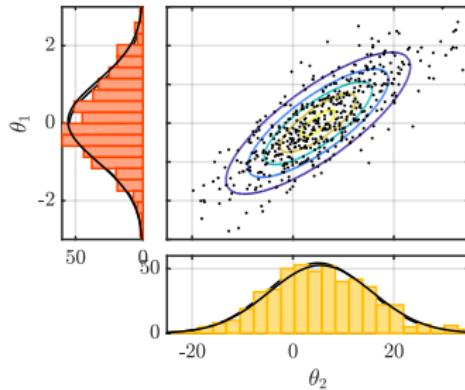
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

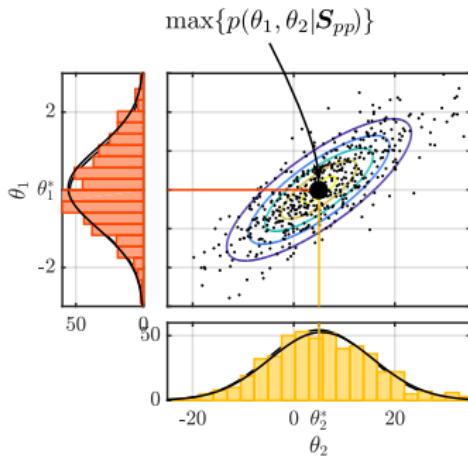
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

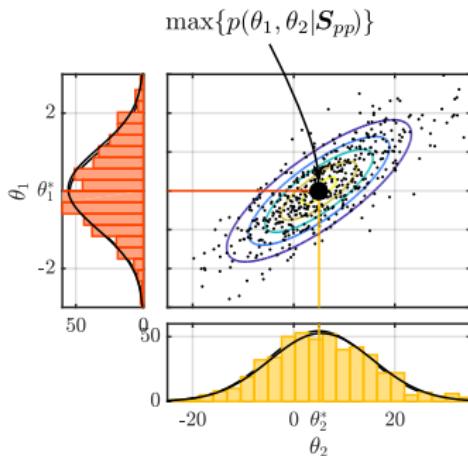
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



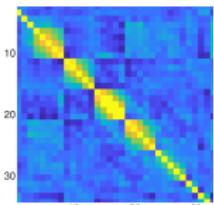
Analyse Factorielle Probabiliste – Optimisation

Maximisation de la distribution a posteriori

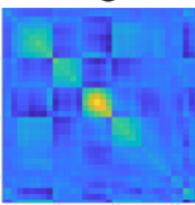
- ↪ Trouver les paramètres optimaux qui expliquent au mieux les données
- ↪ Méthode : l'échantillonneur de Gibbs



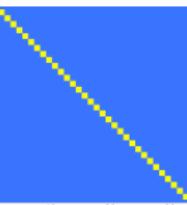
MI mesurée



MI signal



MI bruit



Exemple de
mesures en vol

Analyse Factorielle Probabiliste



- Échantillonneur de Gibbs :
 - intègre les connaissances a priori
 - fournit un intervalle de crédibilité
 - optimisation globale
- AFP :
 - la MI conserve un sens physique
 - compresse les données
 - aucun paramètre à régler
 - modèle flexible
 - possibilité de prendre en compte plusieurs configurations

Analyse Factorielle Probabiliste



- Échantillonneur de Gibbs :
 - intègre les connaissances a priori
 - fournit un intervalle de crédibilité
 - optimisation globale
- AFP :
 - la MI conserve un sens physique
 - compresse les données
 - aucun paramètre à régler
 - modèle flexible
 - possibilité de prendre en compte plusieurs configurations

- Sensibilité au choix des a priori not. quand le problème est mal conditionné
- Coûts de calcul élevés

Débruitage référencé

Hypothèse : pas de bruit extérieur (couche limite) sur les micros de référence

- y : signaux à débruiter
 r : signaux de référence non-bruités (ex : intérieur de cabine)
 a : signaux débruités
- $\left. \begin{array}{l} \text{signaux à débruiter} \\ \text{signaux de référence non-bruités} \\ (\text{ex : intérieur de cabine}) \end{array} \right\} \text{acquis simultanément}$

$$\boxed{\mathbf{S}_{aa} = \mathbf{S}_{yr} \mathbf{S}_{rr}^{-1} \mathbf{S}_{ry}} \rightarrow \text{Généralisation des spectres cohérents}$$

Débruitage référencé

Hypothèse : pas de bruit extérieur (couche limite) sur les micros de référence

- | | |
|---|---|
| y : signaux à débruiter
r : signaux de référence non-bruités (ex : intérieur de cabine)
a : signaux débruités | $\left. \begin{array}{l} \\ \\ \end{array} \right\}$ acquis simultanément |
|---|---|

$$\boxed{\mathbf{S}_{aa} = \mathbf{S}_{yr}\mathbf{S}_{rr}^{-1}\mathbf{S}_{ry}}$$

Généralisation des spectres cohérents



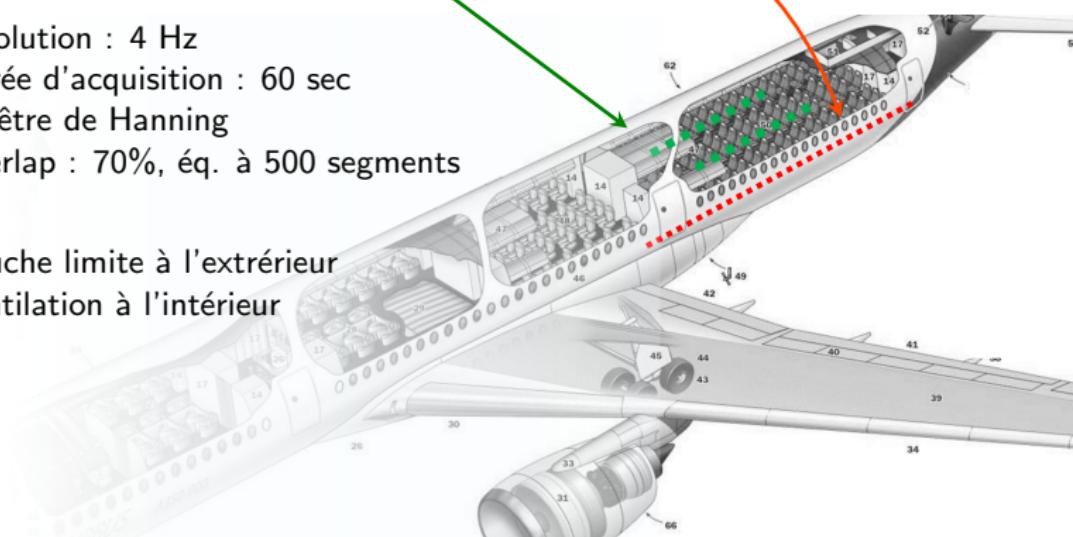
- ▶ Simple à implémenter
- ▶ Faible coût de calcul



- ▶ signaux de référence : non bruités (ou bruit décorrélé)
- ▶ nécessite des mesures simultanées supplémentaires
- ▶ les seuils de cohérence dépendent
 - de la longueur des signaux
 - du nombre de références

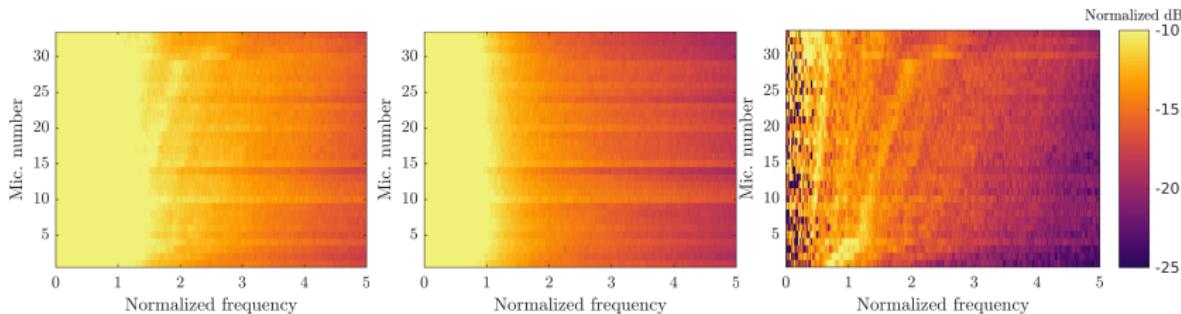
Application en cas réel

- ▶ Essais en vol
- ▶ Conditions réalistes de vol : Mach 0.85
- ▶ 6 régimes moteur dont 1 bruit de fond
- ▶ 35 microphones externes, sur le fuselage
- ▶ 14 microphones dans la cabine
- ▶ MI :
 - résolution : 4 Hz
 - durée d'acquisition : 60 sec
 - fenêtre de Hanning
 - overlap : 70%, éq. à 500 segments
- ▶ Bruits :
 - couche limite à l'extérieur
 - ventilation à l'intérieur

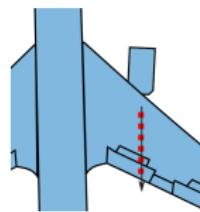


Application en cas réel

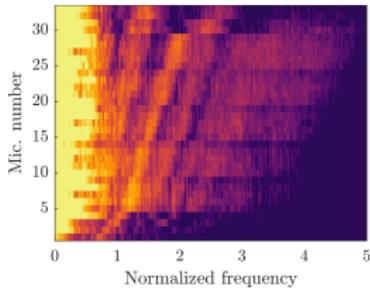
Autospectres zoomés basses-moyennes fréquences



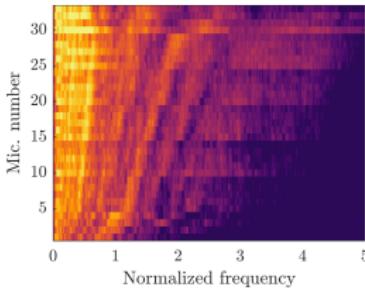
Mesure brute



Bruit de fond



Débruitage : soustraction du bruit de fond

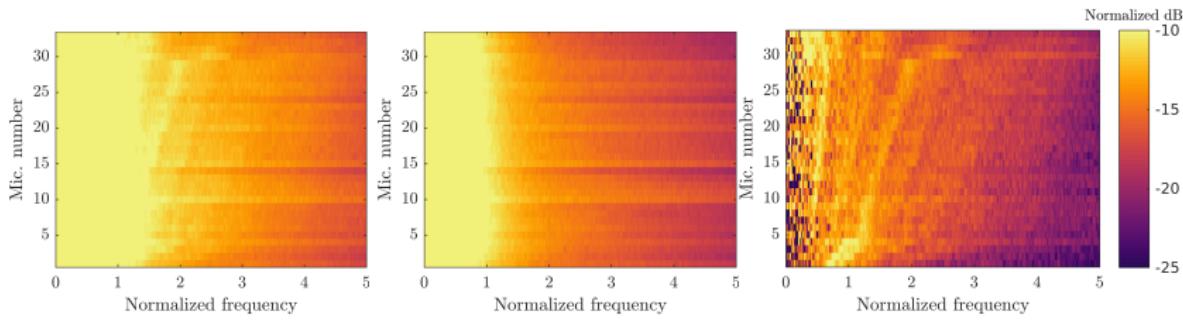


Débruitage : AFP

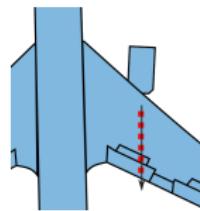
Débruitage référencé

Application en cas réel

Autospectres zoomés basses-moyennes fréquences

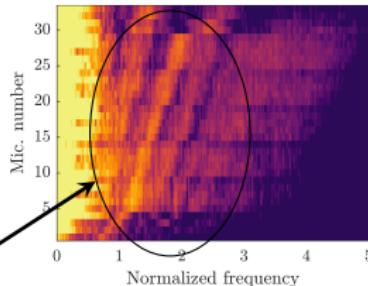


Mesure brute

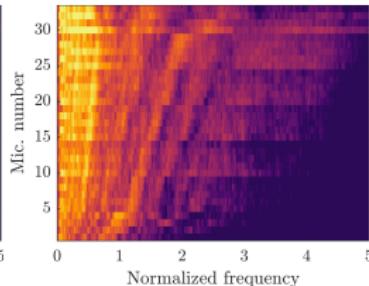


figures d'interférences :
bruit de chocs large bande

Bruit de fond



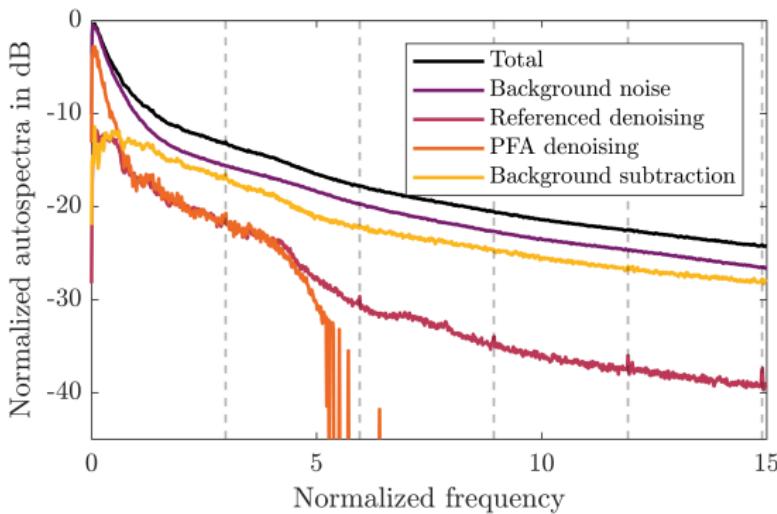
Débruitage : soustraction du bruit de fond



Débruitage : AFP

Débruitage référencé

Application en cas réel

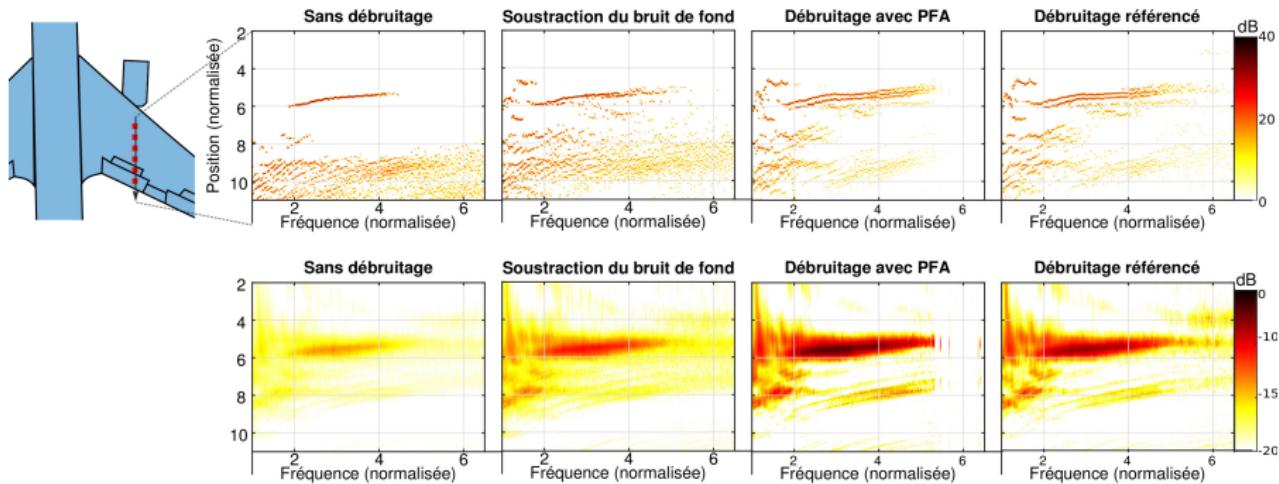


- ▶ Dynamique améliorée de 10-15 dB
- ▶ PFA :
 - Peu de bruit extrait à très basses fréquences → bruit corrélé
 - Pas de signal à moyennes fréquences → modèle/priors à adapter
- ▶ PFA et méthode référencée concordantes en BF

Application en cas réel – Imagerie

Méthode inverse

Iterative Reweighted Least Squares, $p = 0$ + régularisation bayésienne



Formation de voie

Conclusions et perspectives

- ▶ Débruitage avec différentes hypothèses, mais résultats similaires
- ▶ Amélioration des performances d'imagerie
 - dynamique
 - localisation de sources corrélées
- ▶ Corrections pour l'AFP :
 - augmenter la robustesse de l'échantillonneur
 - adapter le modèle statistique (meilleur contrôle de la parcimonie)
 - prendre en compte la corrélation du bruit en BF

This work was performed in the framework of Clean Sky 2 Joint Undertaking, European Union (EU), Horizon 2020, CS2-RIA, ADAPT project, Grant agreement no 754881.

Application en cas réel – Imagerie

$$\text{Erreur} = \frac{\|S_{aa}^{\text{débruitage}} - S_{aa}^{\text{repropagé}}\|_1}{\|S_{aa}^{\text{débruitage}}\|_1 + \|S_{aa}^{\text{repropagé}}\|_1}$$

