

# Étude bibliographique : Méthodes de localisation de sources aéroacoustiques

Alice DINSENMEYER

Intro : localisation de sources dans le sous-sol, dans des tissus humains, dans des pièces industrielles, dans les fluides (avec ou sans écoulement, dans un espace clos ou non). La nature des sources varie. But : caractériser quantitativement/qualitativement les sources à partir de mesures obtenue en quelques points discrets de l'espace.

Contexte : Réduction du bruit des avions par la compréhension des bruits (40 fois plus d'énergie dans 1 kg de kérosène que dans 1 kg des meilleures batterie, après calcul de rendement, il reste un rapport 15 entre les 2).

historique : Dès 1976, pour répondre à des problématiques de compréhension des bruits de turboréacteur, [Billingsley and Kinns \(1976\)](#) réalisent des mesures simultanées à l'aide d'une antenne linéaire constituées de 14 microphones. Depuis, le nombre de capteur par antenne a augmenté, ainsi la gamme fréquentielle.

Pour chaque méthode :

- hypothèses et connaissances a priori
- avantages et inconvénient
- contexte de développement
- algorithme de résolution

4 sources de problème dans la qualité de la reconstruction :

- bruit de mesure
- modèle de propagation approché
- modèle de source approché
- pb inverse mal posé : le nombre de source est souvent bien supérieur au nombre de microphones

## I. PROPAGATION ET SPÉCIFICITÉS DES SOURCES AÉROACOUSTIQUES

Sources aéroacoustiques = sources générées par la présence d'un écoulement.

Le bruit peut être généralement décomposé en 4 composantes :

- une partie tonale générée par les composantes tournantes de la machine
- une partie cyclostationnaire induite par les composantes tournantes de la machine
- le bruit machine aléatoire
- le bruit de fond (indépendant de la machine) (aérodynamique?)

Séparer ces composantes dans le champ total mesuré permet de mieux comprendre la contribution de chaque source ou de chaque élément du réacteur, par exemple.

### 1.1. Exemples de sources aéroacoustiques sur un avion

Un bref récap des sources est fait en intro de la thèse de Greboul

Smith (1989) décrit un très grand nombre de sources aéroacoustiques sur un avion. Elles peuvent être classées en 2 catégories : le bruit de moteur et le bruit aérodynamique. Le bruit aérodynamique est principalement généré par le train d'atterrissage et par les ailes. La principale source de bruit des ailes est liée aux volets à l'avant (becs de bord d'attaque) et à l'arrière. Ces volets sont des hypersustentateurs qui augmentent la portance qui génèrent localement beaucoup de bruit. Mais paradoxalement, leur présence contribue fortement à la réduction du bruit des avions par le fait qu'ils favorisent un décollage rapide et un atterrissage à vitesse réduite.

Comme le montre l'image de Smith (1989) 1, les bruits du moteur sont d'origines diverses. Les moteurs doubles flux ont permis de fortement diminuer le bruit de jet, ce qui rend le bruit aérodynamique égal voire prépondérant sur le bruit de moteur en configuration d'approche (atterrissage).

#### 1.1.1 Fan noise

**Bruits tonaux** BPF (blade passing frequency) et ses harmoniques : bruit tonal

Blade thickness noise (monopole), ou bruit d'épaisseur : bruit tonal généré par le déplacement du fluide autour des pales (présent à haute vitesse de rotation seulement)  
Uniform inlet flow : peut être réduit en augmentant le

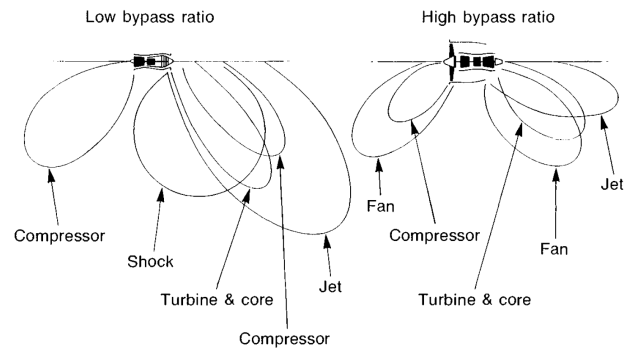


FIGURE 1 – Comparaison des sources de bruits d'un moteur simple flux (à gauche) et d'un moteur double flux (à droite). Image extraite de Smith (1989).

nombre de pales

Interaction rotor stator :

**Bruits large bande** Flux inconstant : fluctuation stochastique de la vitesse du flux entrant génère un bruit large bande  
Turbulent Boundary layer : couche turbulente générée aux bords de fuite. Ce bruit peut être modélisé comme un ensemble de dipôles répartis sur la surface de l'aube.  
Vortex shedding : décollement de la couche limite (laminaire ou turbulente), ce qui change l'écoulement autour des pales  
tip noise : bruit généré dans l'espacement entre les pales et le carter. Ce bruit augmente si l'espacement augmente. A noter que la vitesse à l'extrémité des pales étant grande, ce bruit peut être important.  
Bruit de soufflante :

#### 1.1.2 Bruit d'interaction rotor-stator

Dominant ? les moteurs à double flux ont permis de diminuer l'importance du bruit de jet, mais ont rajouté le bruit de soufflante.

#### 1.1.3 Bruit de jet

page 86 de Smith : Description du bruit de jet

- small-scale Eddies (HF)
- large-scale Eddies (BF)
- mixing region
- shock noise

Sur un moteur à low-bypass-ratio, le centre du jet sort à 500 m/s de la tuyère, et constitue la principale source de bruit du turbo réacteur.

Depuis les turboréacteurs double-flux, le jet chaud est entouré du jet froid issu de la soufflante.

L'enjeu est donc de séparer ces composantes pour extraire seulement le bruit induit par les sources d'intérêt.

Faire une biblio de ce qui est fait ailleurs pour chaque composante

## 1.2. Extraction des composantes tonales

## 1.3. Extraction des composantes cyclostationnaires

## 1.4. Extraction du bruit aérodynamique

Le bruit aérodynamique a des propriétés qui peuvent permettre de l'extraire des signaux de mesure :

- il est stationnaire et décorrélié des sources,
- sa longueur de corrélation spatiale est courte (à comparer avec l'espacement des micros; voir aussi l'effet de l'écoulement qui fait une translation?)
- il ne génère pas de bruit?
- son contenu spectral est connu (Empirical spectral model of surface pressure fluctuations?): large-bande et énergie équi-répartie sur les fréquences.

Le champ acoustique a, au contraire, une longueur de corrélation spatiale plus importante (les signaux microphoniques sont très corrélés).

Finalement, la matrice d'autocorrélation du signal total peut s'écrire comme étant la somme des matrices d'autocorrélation des composantes acoustique et turbulente du signal.

acoustique : matrice à rang réduit

turbulence : matrice diagonale si on suppose qu'il y a une décorrélation totale entre les micros(ou une physique proche de la diagonale (décroissance exponentielle orthotrope, par exemple))

$$S_{yy} = HH' + B \quad (1)$$

L'identification de ces matrices s'appelle "Structured Covariance Estimation problem".  $B = \text{Diag}(\sigma^2)$

état de l'art

### 4.1 Stochastic modelling

approche statistique

#### 1.4.2 Mesures vibratoires

L'écoulement perturbe la couche limite au niveau de l'antenne de microphones, ce qui génère un fort bruit aérodynamique. La mesure de ce bruit peut être fortement réduite en captant le champ acoustique à l'aide d'une antenne d'accéléromètres fixés à une plaque fine. Seuls les bas nombres d'onde, correspondant à la partie acoustique du champ d'onde sont alors mesurés.

(Acoustic beamforming through a thin plate using vibration measurements + Design and Experimental Validation of an Array of Accelerometers for In-flow Acoustic Beamforming Applications)

Autre possibilité : antennes parcimonieuses d'accéléromètre en complément d'une mesure sur antenne microphonique : ??

## 1.5. Physique de la Propagation acoustique en écoulement

Pour ces méthodes, on considère que la façon dont le son se propage est connue (matrice de transfert acoustique). Prendre en compte l'écoulement, sinon les sources apparaissent décalées vers l'aval (Amiet, par ex). Calibration de la matrice interspectrale avec et sans écoulement : ne nécessite pas de connaître la nature de l'écoulement. (S.Kroeber, K.Ehrenfried, L.Koop et A.Lauterbach, « In-flow calibration approach for improving beamforming accuracy) Mais contrainte expérimentale car coûteux en temps et surveillance des fluctuations de Temperature...

Pour comprendre le problème, il est nécessaire de rappeler l'expression analytique de l'intensité acoustique rayonnée par un écoulement.

### 1.5.1 Équations classiques de la mécanique des fluides

Conservation de la quantité de mouvement : Navier-Stokes

$$\frac{\partial \rho u_i}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i u_j}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \rho g_i + \frac{\partial \tau}{\partial x_i} \quad (2)$$

Nature des sources : cohérent/incohérent, étendues/ponctuelles? Hypothèses sur les sources : ondes planes/sphériques, par ex.

Fonctions de Green en écoulement

Spécificité de l'imagerie en écoulement turbulent

Correction de l'écoulement : modèle d'Amiet ou modèle de Koop Étude de la correction à appliquer pour l'écoulement en beamforming : thèse Haddad.

Source dipolaire/monopolaire : influence sur la méthode?

Nature du bruit de fond?

## 1.6. Prise en compte des réflexions?

Dangereux parce que ça peut empirer les choses.

## II. ASPECTS EXPÉRIMENTAUX

Pour obtenir une représentation spatiale d'un champ stationnaire, les mesures peuvent être réalisées de plusieurs manières. Le ou les capteurs peuvent être déplacés dans l'espace pas à pas ou continûment ([Comesaña et al. \(2013\)](#) pour un exemple de scan manuel, la position du capteur étant enregistrée par une vidéo) . Les mesures peuvent aussi être réalisées simultanément, moyennant l'utilisation d'une antenne fixe et d'une éventuelle carte d'acquisition multivoies. Pour caractériser un champ instationnaire à un instant donné, seules les mesures simultanées peuvent être réalisées.

### 2.1. Antenne

différence entre antenne linéaire et antenne plane et antenne 3D.

acquisition(antenne, micro, accéléro, MEMS)/excitation (nature des sources)

ref sur l'influence de la position des micros

Algo de détection du nombre de sources, notamment pour séparer les sous-espaces bruit/signal ?

- J. Billingsley and R. Kinns. The acoustic telescope. *Journal of Sound and Vibration*, 48(4) :485 – 510, 1976.
- D. F. Comesaña, S. Steltenpool, G. C. Pousa, H.-E. de Bree, and K. R. Holland. Scan and paint : Theory and practice of a sound field visualization method. *ISRN Mechanical Engineering*, 2013(ID 241958), 2013.
- M. J. T. Smith. *Aircraft noise*. Cambridge University Press, 1989.