

# SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

CONTRIBUTION DES FLUCTUATIONS D'UN ECOULEMENT LIBRE  
AU RAYONNEMENT ACOUSTIQUE EN CHAMPS PROCHE ET LOINTAIN

Auteurs : G. Elias<sup>\*\*</sup>, J. Maulard<sup>\*\*</sup>, M. Pérulli<sup>\*\*\*</sup>

OFFICE NATIONAL D'ETUDES ET DE RECHERCHES AEROSPATIALES  
29, Avenue de la Division Leclerc - 92320 CHATILLON

## RESUME

L'une des difficultés rencontrées lors d'études de rayonnement acoustique de jets libres est la recherche d'une relation forte entre les fluctuations spatio-temporelles du volume source de bruit et le bruit perçu.

En effet, seule une fraction faible (de l'ordre de quelques  $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ) de l'énergie fluctuante du volume source rayonne acoustiquement en champ lointain.

Pour établir cette relation forte, une méthode particulière de traitement du signal, basée sur l'utilisation de l'échantillonnage conditionnel, a été mise en oeuvre. Sur des exemples concrets les possibilités de cette méthode sont commentées.

## SUMMARY

It is a difficult task to establish a strong connection between the spatio-temporal distribution inside the jet and the far field noise. This is mainly due to the weak ratio ( $10^{-2}$ ,  $10^{-3}$ ) between the acoustic energy and the energy of the fluctuations inside the jet.

In order to establish this connection a data treatment based on conditional sampling has been implemented. Typical examples showing the possibilities of this method are presented.

## 1. INTRODUCTION

L'un des objectifs des études aéro-acoustiques menées par la Division Acoustique de l'ONERA est la caractérisation des sources de bruit, en vue de sa réduction. Atteindre cet objectif équivaut à pouvoir discriminer, au niveau des surfaces et/ou des volumes contenant les sources de bruit, entre des grandeurs rayonnantes en champ lointain et celles qui ne rayonnent pas et qui constituent en quelque sorte ce que l'on nomme le champ proche (figure 1). Suivant les cas, les sources de bruit peuvent être la conséquence de grandeurs moyennes mises en déplacements, ou bien la conséquence de certaines fluctuations. Dans ce travail, nous nous limitons à présenter une méthode particulière de traitement du signal dont l'objectif est de chiffrer en champ acoustique lointain la contribution de paquets d'ondes évoluant dans le volume source. Nous présentons cette méthode suivant un point de vue purement expérimental et intuitif en étant conscients de la faiblesse de l'argumentation théorique qui permettrait de la justifier, et en nous limitant au cas de jets libres issus de maquettes simulant un turboréacteur. Il est possible de trouver des compléments d'information dans les références [1] à [3].

\* ONERA

\*\*\* ONERA et Université de Technologie de Compiègne

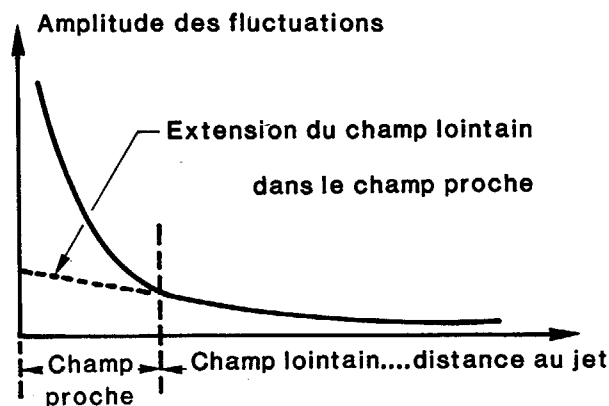


Fig. 1 - Evolution du champ fluctuant

## II. PRINCIPES DE BASE

Pour atteindre cet objectif (contribution acoustique de paquets d'ondes), il s'agit donc de connaître les fluctuations du volume-source qui se présentent sous forme d'ondes propagatives et de les isoler de l'ensemble des fluctuations dont la



CONTRIBUTION DES FLUCTUATIONS D'UN ECOULEMENT LIBRE  
AU RAYONNEMENT ACOUSTIQUE EN CHAMPS PROCHE ET LOINTAIN

connaissance exhaustive rentre plutôt dans le cadre d'études aérodynamiques. En d'autres termes, le but recherché est grossièrement de prolonger vers le jet la composante champ lointain des fluctuations pour la caractériser dès la source (figure 1, courbe en tirets). Une telle approche peut sembler illusoire si les fluctuations se présentent comme un tout qui ne saurait être décomposé autrement qu'arbitrairement. Cependant, plusieurs arguments militent dans le sens d'une décomposition de caractère physique de ce type. En particulier, Chu et Kovaszny [4] ont montré que dans le repère d'un écoulement moyen homogène, il est possible de décomposer les fluctuations suivant 3 modes : de vorticités, d'entropie et acoustique. Cette décomposition est fondée sur celle du champ de vitesses en parties rotationnelle et irrotationnelle. Les sources de bruit résultent alors du couplage entre ces différents modes. Sur le plan expérimental, suivant une telle démarche, nous avons supposé que certaines des fluctuations dans le volume source se présentent sous forme de paquets d'ondes se déformant et se propageant au cours du temps. Si l'on peut définir les fronts d'ondes correspondants on peut en suivre l'évolution spatiale et isoler, dans le champ lointain, la partie qui leur est associée tant en fréquence qu'en amplitude et en diagramme de directivité. Sur le plan du traitement du signal il s'agit alors de suivre sur un ensemble de signaux prélevés depuis le volume-source jusqu'au champ lointain, l'évolution de paquets d'ondes sélectionnés. Pour cela, on peut se référer à une situation idéale où les paquets d'ondes rayonnants et non rayonnants auraient des formes caractéristiques et connues. Dans ce cas, il serait aisé de définir un critère de sélection certain (critère de pente par exemple), afin de synchroniser sur l'une de ces formes et de décider par comparaison avec les signaux de microphone de leur caractère rayonnant. Dans les situations réelles, on ne connaît pas a priori toutes les caractéristiques des différents types de paquet d'onde qui sont aléatoires tant en amplitude qu'en durée et en instant d'arrivée. Il faut donc à la fois choisir un critère de détection qui soit efficace dans la séparation et un traitement de signal adapté. Les illustrations suivantes montrent comment il est possible d'avancer dans cette voie avec un minimum d'information au départ. Elles prennent pour base un aspect particulier du bruit de jet. En effet, on sait que dans les jets froids de faible vitesse, une partie des fluctuations est associée au passage de gros tourbillons annulaires qui sont convectés dans la zone de mélange du jet et dont l'origine est liée à l'instabilité aérodynamique des profils de vitesse moyenne. Ces tourbillons peuvent être visualisés par striescopia à grand champ et leurs caractéristiques spatiales et temporelles mesurées par des sondages dans le jet. En jet chaud par contre, les méthodes striescopiaques ne les mettent pas en évidence. Il se pose donc le problème de leur détection et de leur efficacité acoustique en champ lointain.

### III. SEPARATION D'UN TYPE DE PAQUETS D'ONDES

Supposant que ces gros tourbillons, ou structures à grande échelle, existent également en jet chaud, on peut tenter de les discriminer par un critère d'amplitude. Nous avons donc complété le montage de striescopia classique à grand champ par un dispositif commandant le déclenchement d'éclairs de faible durée (figure 2). Dans un premier temps, ce dispositif est alimenté par le signal d'un radiomètre visant la zone de mélange du jet et sensible à ses fluctuations thermiques. Le passage d'un gros tourbillon passant devant le radiomètre fournit un signal qui, s'il est supérieur à un seuil fixé, provoque le déclenchement d'un éclair. L'image unique obtenue alors est insuffisante à

faire ressortir le tourbillon. Par contre, si l'on enregistre sur la même pellicule beaucoup d'éclairs obtenus de cette façon (typiquement de l'ordre de 200), le développement de l'image résultante montre

la forme moyenne des paquets d'ondes sélectionnés passant devant le radiomètre, qui est précisément la forme attendue pour les tourbillons recherchés (figure 3). Pour valider la méthode, cette image est à comparer avec une autre, obtenue en déclenchant les éclairs de façon quelconque, et qui est uniformément grise (figure 4). Ayant ainsi montré l'existence de structures à grande échelle dans un jet chaud, on peut répondre en partie au problème de leur efficacité acoustique par le même procédé. Il suffit de remplacer le signal du radiomètre par celui d'un microphone situé hors du jet. Il apparaît que l'on obtient rigoureusement la même image, et que pour que le tourbillon soit visualisé au même endroit qu'avec le radiomètre, il suffit de disposer le microphone sur le front d'ondes possédant la phase correspondante. Le microphone permet ainsi de visualiser dans le jet des paquets d'ondes rayonnants. D'autres images équivalentes sont également obtenues au moyen d'un signal de commande mixte résultant par exemple du produit du signal du radiomètre par celui du microphone.

De plus, en insérant un retard fixe entre le signal de commande et le déclenchement de l'éclair, l'image du tourbillon se trouve décalée d'une distance fonction de sa vitesse de convection. En montant à la suite une série d'images avec un retard légèrement différent d'une image à l'autre, on obtient un film simulant le déplacement des tourbillons.

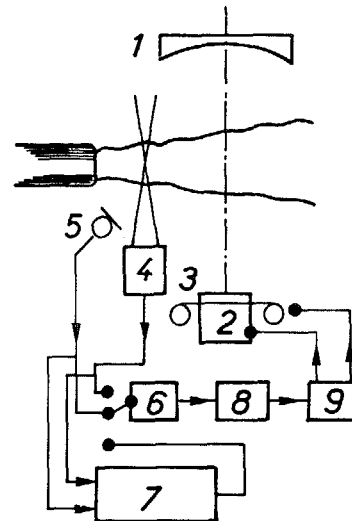


Fig. 2 - Dispositif de striescopia conditionnelle.  
1. Miroir sphérique - 2. Couteaux striescopiaques - Générateur d'éclairs - 3. Film - 4. Radiomètre infrarouge - 5. Microphone - 6. Détecteur de seuil et synchronisation - 7. Multiplieur - 8. Ligne à retard - 9. Commande des éclairs et d'avancement du film.

En conclusion, élaborant un critère de sélection entre différents types de paquets d'ondes, il est possible de l'insérer dans une démarche expérimentale visant à juger de son efficacité. Il est remarquable qu'un critère aussi simple que le passage par un seuil, certainement éloigné d'un optimum dont l'intuition laisse à penser qu'il devrait plus être fondé sur l'utilisation des relations de phase nécessaires à la création d'un paquet d'ondes, soit déjà suffisant pour, au moins dans l'exemple présenté, permettre de tirer des conclusions au niveau de la physique des jets turbulents et de leur émission acoustique.



CONTRIBUTION DES FLUCTUATIONS D'UN ÉCOULEMENT LIBRE  
AU RAYONNEMENT ACOUSTIQUE EN CHAMPS PROCHE ET LOINTAIN

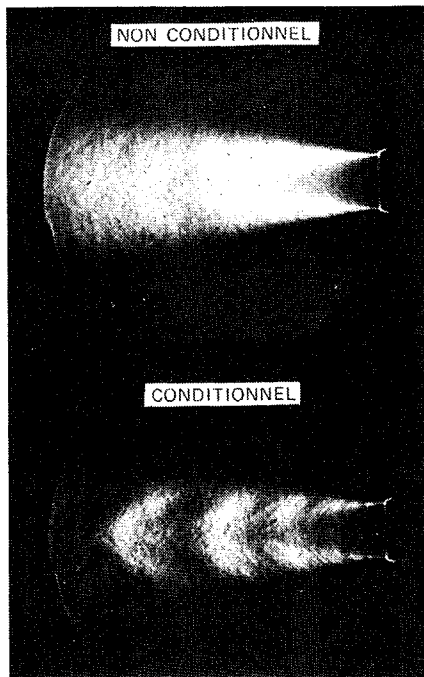


Fig. 3 - Visualisation par strioscopie conditionnelle.

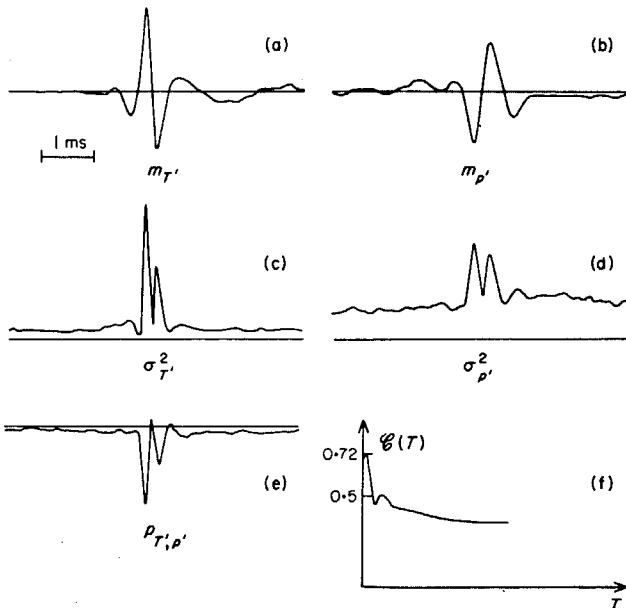


Fig. 4 - Résultats radiomètre-microphone à  $\theta = 30^\circ$ , (a), (b) : valeurs moyennes conditionnelles des signaux de radiomètre et de microphone ; (c), (d) : valeurs quadratiques moyennes conditionnelles ; (e) : produit moyen conditionnel ; (f) : coefficient de cohérence conditionnel.

IV. MESURE DE L'EFFICACITÉ ACOUSTIQUE D'UN PAQUET D'ONDES.

Pour dépasser le stade de la discrimination des sources et attacher à chacune d'elles une efficacité acoustique, il faut disposer d'une méthode prenant en compte des propriétés énergétiques des signaux. Par analogie avec les fonctions de corrélation ou de cohérence classique, nous avons défini un coefficient de cohérence conditionnel C construit de la manière suivante : partant d'un signal de synchro-

nisation, on lui applique le critère de sélection (qui peut être fondé sur l'amplitude, la pente, la phase temporelle ou spatiale, etc... d'un signal ou d'un ensemble de signaux) destiné à isoler certains types de paquets d'ondes. Deux signaux  $s_1(t)$  et  $s_2(t)$  portant a priori l'empreinte de ces paquets sont alors pris en compte sur des échantillons d'une durée T autour des instants définis par le signal de synchronisation (qui peut d'ailleurs être un des signaux  $s_1$  ou  $s_2$ ), moyennant l'introduction de retards  $\tau_1$  et  $\tau_2$  destinés à compenser les retards de propagation éventuels. Sur ces échantillons, on procède alors aux moyennes d'ensemble suivantes =

$$m_1(t) = \langle s_1(t - \tau_1) \rangle \quad \sigma_1^2(t) = \langle s_1^2(t - \tau_1) \rangle$$

$$m_2(t) = \langle s_2(t - \tau_2) \rangle \quad \sigma_2^2(t) = \langle s_2^2(t - \tau_2) \rangle$$

$$p_{1,2}(t) = \langle s_1(t - \tau_1) s_2(t - \tau_2) \rangle$$

Il s'agit donc de valeurs moyennes, valeurs quadratiques moyennes et produits moyens de signaux échantillonnés qui sont fonction de l'instant t où ils sont calculés par rapport à l'instant d'ouverture de la porte T. On définit C par le rapport :

$$C(D, \tau_1, \tau_2, T) = \frac{\int_0^T p_{1,2}(t) dt}{\left[ \int_0^T \sigma_1^2(t) dt \int_0^T \sigma_2^2(t) dt \right]^{1/2}}$$

qui dépend du critère de détection D, des différents retards et de la durée T.

L'utilisation espérée de ce coefficient est la suivante : si les retards de propagation sont correctement compensés par  $\tau_1$  et  $\tau_2$  et le critère de sélection efficace, l'intégrale  $\int_0^T p_{1,2}(t) dt$  représente l'énergie commune aux deux signaux. C représente alors donc bien leur degré de cohérence relativement aux paquets d'ondes sélectionnés. De plus, C sera maximum lorsque la durée T sera représentative de l'étendue temporelle moyenne des paquets d'ondes. Enfin C permet de juger de l'efficacité du critère de détection : un critère moins efficace qu'un autre pour isoler le même phénomène dégradera les valeurs de C. L'utilisation de ce coefficient est plus justifiée par des considérations intuitives que par une analyse théorique rigoureuse. Appliquant sous cette réserve ces définitions au problème de l'efficacité acoustique des structures à grande échelle, les résultats suivants ont été obtenus. Disposant d'un signal de radiomètre précédent et de signaux de microphone en champ lointain, on utilise le même critère de détection d'amplitude que pour les visualisations, en prenant comme signal de synchronisation le signal du radiomètre. Les résultats typiques du traitement apparaissent à la figure 4 pour un microphone disposé à  $30^\circ$  de l'axe du jet.

Ces courbes, complétées aux angles intermédiaires, permettent de confirmer l'existence d'un champ acoustique lointain lié aux structures à grande échelle et d'en préciser le diagramme de directivité.

Pour juger de l'efficacité du critère de détection, on peut tracer les courbes précédentes pour différentes valeurs du seuil. La figure 5 illustre le résultat d'un tel traitement, avec cette fois un signal de vélocimétrie laser doppler comme signal de synchronisation. On constate la présence d'un maximum maximum pour la valeur de C en fonction du seuil et de la durée de la porte T.



CONTRIBUTION DES FLUCTUATIONS D'UN ECOULEMENT LIBRE  
AU RAYONNEMENT ACOUSTIQUE EN CHAMPS PROCHE ET LOINTAIN

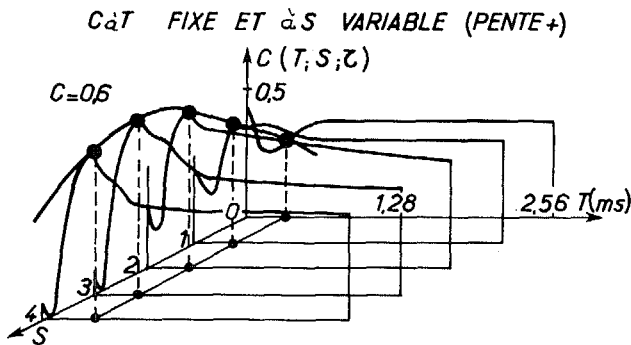
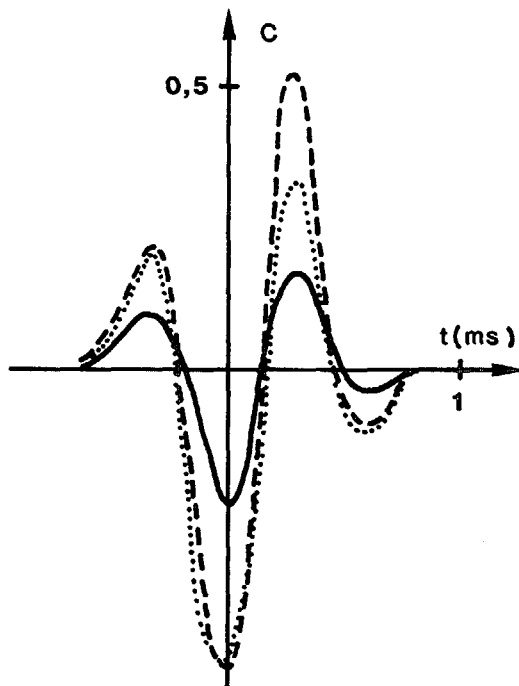


Fig. 5 - Vélomètre laser-microphone : évolution coefficient de cohérence conditionnel en fonction du temps T et du seuil S.

V. COMPARAISON AVEC LES METHODES CLASSIQUES.



- Fonction de corrélation.  
 - - - - Coefficient de cohérence conditionnel mesuré.  
 ..... Coefficient de cohérence conditionnel calculé sur la base d'un modèle gaussien.

Fig. 6 - Radiomètre et microphone à  $\theta = 30^\circ$

Par rapport aux méthodes classiques de corrélation, l'analyse de la méthode du type échantillonnage conditionnel présentée possède plusieurs avantages. Elle ne demande en fait qu'une correspondance entre un événement choisi sur un signal et un autre événement sur un autre signal, indépendamment de déformations linéaires ou non de sa signature, alors que les techniques de corrélation demandent en plus une correspondance fréquence à fréquence. De plus, les hypothèses sous-jacentes à son utilisation semblent moins restrictives, par exemple sur le plan de la stationnarité des signaux. Enfin, elle permet de discriminer entre plusieurs composantes d'un

signal complexe. Néanmoins, la comparaison avec les méthodes classiques est instructive du point de vue de la compréhension des phénomènes. La figure 6 illustre cette comparaison. On a tracé pour les signaux de radiomètre et de microphone à  $\theta = 30^\circ$  les trois courbes suivantes :

- la fonction de corrélation des signaux recalés autour du temps de propagation qui, avec un maximum négatif de 0,24 montre déjà un niveau conséquent de cohérence au sens linéaire entre les deux signaux.
- le coefficient de cohérence conditionnelle mesuré pour sa valeur maximale en durée T et pour les mêmes valeurs du retard  $\tau$ .
- le coefficient de cohérence conditionnelle calculée sur la base de deux signaux gaussiens ayant la fonction de corrélation mesurée. Cette comparaison montre un domaine commun dans la région du pic négatif où l'échantillonnage des signaux n'a pas apporté d'informations complémentaires par rapport à l'analyse classique, et un domaine dans la région du pic positif où une différence notable apparaît. Ce type de résultat est encore à l'heure actuelle en cours d'étude.

VI. CONCLUSION

La méthode présentée et utilisée dans les études de discrimination de sources de bruit de jet, montre son intérêt pour une meilleure compréhension d'une classe de mécanismes physiques générateurs de bruit. Son développement et son application à d'autres études aéroacoustiques, telles que celles des fréquences discrètes apparaissant dans le bruit des machines tournantes (compresseurs ou hélices) font partie des travaux en cours à l'ONERA pour la définition de méthodes amenant à la réduction du bruit.

VII. REFERENCES

- [1] DE BELLEVAL J.F.  
Caractérisation de la turbulence d'un jet chaud au moyen de la mesure de son émission infra-rouge.  
Publication ONERA N° 74-159  
English Translation ESA T-T248 (1976)  
ESA T T248 (1976)
- [2] DAHAN C.  
Emission acoustique des structures cohérentes dans un jet turbulent  
Publication ONERA 1976-4
- [3] DAHAN C. - ELIAS G. - MAULARD J. - PERULLI M.  
Cohérent structures in the mixing zone of a subsonic hot free jet  
JSV (1978) 59 (3), p. 313-333

- [4] CHU B.T. - KOVASZNY L.S.G.  
Non linear interactions in a viscous heat conducting gas  
J.F.M., 3, p. 494-514 (1958)