

SEPTIEME COLLOQUE SUR LE TRAITEMENT DU SIGNAL ET SES APPLICATIONS

NICE du 28 MAI au 2 JUIN 1979

UNE EXPERIENCE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE APPLIQUEE A LA CARACTERISATION DE MACHINES INDUSTRIELLES

Auteurs : Y. Blanchard, D. Médynski, G. Pinson (ONERA)
J. Jacques, H. Leblond (INRS)

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

INSTITUT NATIONAL DE RECHERCHE SUR LA SECURITE
B.P. N° 27-54 500 VANDOEUVRE

RESUME

Description d'une expérience d'imagerie acoustique utilisant une antenne constituée de 36 microphones répartis aléatoirement dans une pupille d'écoute.

Cette antenne est testée en chambre sourde sur une source ponctuelle, puis sur 4 machines industrielles dans une bande 0-5 kHz.

Ce travail s'est effectué dans le cadre d'une collaboration INRS-ONERA.

I. INTRODUCTION

Parmi les techniques qui peuvent être mises en oeuvre pour réduire le bruit en milieu de travail -traitement anti-réverbérant des locaux, capotage des machines, etc...- la plus radicale reste encore l'intervention directe à la source de bruit. Elle s'avère pourtant peu pratiquée, pour plusieurs types de raisons : soit que les mécanismes de génération de bruit soient trop complexes pour être représentés par un modèle de sources ponctuelles localisables ; soit que l'inventaire des sources de bruit en présence et l'évaluation de leur contribution au bruit total ne puissent être faits que grossièrement. On devine l'intérêt d'un instrument qui, placé devant une machine industrielle, permettrait d'isoler les sources de bruit principales et de mesurer leurs niveaux respectifs, ou mieux encore leurs caractéristiques spectrales. Dans cette perspective, l'INRS et l'ONERA se sont associés pour mettre en oeuvre l'expérience, décrite ici, d'un premier prototype d'antenne acoustique appliqué à la localisation de sources de bruit de machines industrielles.

II. PRINCIPE ET DEFINITION DU SYSTEME

II.1 Généralités

L'image acoustique d'un objet sonore étendu est obtenue par une méthode classique qui est la transposition dans le domaine acoustique de l'holographie

SUMMARY

Description of an acoustical imagery experiment with an array of 36 randomly located microphones.

This array was tested in an anechoic chamber, first on a point source then on 4 industrial machines ; the bandwidth was 0-5 kHz.

This work was carried out as an INRS-ONERA collaboration.

de Fourier. Elle comporte deux étapes :

- le champ sonore est relevé en tous points de la surface plane d'une "pupille" d'écoute à une certaine distance de la source, sous son expression complexe (amplitude et phase). On sait qu'il représente, dans le cas idéal d'une pupille très éloignée de la source, la transformée de Fourier spatiale de la répartition des points sonores de l'objet ;
- l'image des sources est obtenue à partir de l'hologramme par inversion de cette transformée de Fourier. La densité relativement faible de points significatifs dans une image acoustique (en comparaison des densités bien plus importantes des images optiques), permet d'envisager cette restitution en temps semi réel par calcul numérique.

Dans les conditions expérimentales habituelles, cette méthode d'imagerie acoustique comporte un certain nombre de limitations d'ordre pratique, liées en particulier :

- à l'écartement possible entre objet sonore et pupille d'écoute : il sera souvent difficile de considérer l'objet sonore à l'infini ou dans la zone de Fraunhofer. Pour une source située en champ proche (zone de Fresnel), l'inversion de Fourier doit être complétée par des termes correctifs d'ordre deux qui dépendent de la distance visée. La restitution holographique conduit alors à une "image"



UNE EXPERIENCE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE
APPLIQUEE A LA CARACTERISATION DE MACHINES INDUSTRIELLES

tridimensionnelle, ce qui complique singulièrement sa réalisation numérique ;

aux dimensions de la pupille et à la densité des points de mesure qui y sont réellement effectués. L'image restituée est en effet le résultat d'une convolution entre l'objet sonore et la transformée de Fourier bidimensionnelle de la fonction de répartition des capteurs dans la pupille d'écoute. Ainsi, le pouvoir de résolution angulaire est lié aux dimensions finies de la pupille ; l'échantillonnage de celle-ci par un réseau de microphones conduit à une répétition périodique de l'image restituée qui ne peut être tolérée que s'il ne se produit pas de recouvrement de ces images partielles ; enfin, si le maillage minimum ainsi déterminé n'est pas effectivement assuré (on parle alors de réseau "lacunaire" de microphones), la réponse à un point source se trouve entachée de remontées secondaires dont le niveau dépend essentiellement du nombre de capteurs effectivement utilisés ainsi que de leur distribution dans la pupille.

II.2 Définition de l'antenne

Pour l'expérience envisagée, les dimensions des machines retenues et celles de la chambre sourde de l'INRS où a eu lieu la mesure, fixent pratiquement la distance objet antenne (5m) et les dimensions hors tout de l'antenne (limitée par un cadre carré de 3,15m de côté). On choisit de limiter l'imagerie à une bande de fréquence 500-5 000 Hz qui couvre pratiquement la plage d'émission des machines retenues. La fréquence supérieure ($\lambda = 6,6$ cm) impose le maillage minimum de la pupille : la trame de celle-ci comporte 64 lignes et 64 colonnes espacées de 5 cm.

Dans ces conditions, le pouvoir de résolution de l'antenne sera compris, selon la fréquence, entre 12° (à 500 Hz) et $1,2^\circ$ (à 5 000 Hz).

Le réseau complet devrait comporter 4.096 microphones, ce qui est bien entendu hors de question. On est ainsi conduit au choix d'un réseau lacunaire.

Les microphones sont répartis de façon aléatoire sur la pupille d'écoute. Les lobes secondaires se répartissent alors de façon assez uniforme autour de leur valeur moyenne ($-10 \log N$ pour N capteurs), tandis que le pouvoir de résolution reste de l'ordre de λ/L . On peut utiliser les résultats des études de Lo [1] et Steinberg [2] pour préciser le niveau crête des lobes secondaires. On donne ci-dessous, à titre d'exemple, quelques valeurs numériques, relatives à un maillage de 64×64 brins, avec $\lambda = 6,6$ cm. Les réjections indiquées sont celles du lobe de plus fort niveau du diagramme. La probabilité de ne pas dépasser ces valeurs pour un tirage donné de la répartition aléatoire est de 0,3.

Nombre N de micros	36	95	150	520
Lobe de plus fort niveau	-9,5dB	-13,7dB	-15,7dB	-21,1dB

Ce type de solution permet donc d'obtenir de très bons résultats, avec un nombre limité de capteurs (le 1/10 environ de la pupille complète) et on peut envisager d'exploiter des antennes beaucoup plus économiques (de l'ordre de 1/100 du maillage complet).

II.3 Réponse théorique de l'antenne

Plusieurs tirages d'une distribution aléatoire de 36 microphones ont été essayés, et l'ensemble des réponses obtenues confirme bien les évaluations statistiques de Steinberg. La configuration retenue est reproduite figure 1, avec sa réponse à un point source pour une fréquence de 1250 Hz (figure 2) : ces deux figures se correspondent donc mutuellement par une transformée de Fourier à deux dimensions.

L'antenne mise en place dans la chambre de l'INRS est représentée figure 3. Construite en alliage léger habillée de matériau absorbant, elle est équipée de 36 microphones à électret. Les corrections de champ proche pour la distance visée sont assurées ici directement par positionnement des micros, montés sur tige coulissante, selon une courbure sphérique centrée sur l'axe à 5m de l'antenne.

III. DEROULEMENT ET RESULTATS DES ESSAIS

III.1 Chaîne d'acquisition et de traitement des signaux

Après préamplification, les 36 voies de mesure sont multiplexées trois par trois pour être enregistrées sur les 12 pistes parallèles d'un magnétophone analogique. A l'issue de la campagne de mesure, une conversion numérique des bandes enregistrées est réalisée sur mini-ordinateur.

Le calcul de restitution des images est effectué en temps différé sur le même mini-ordinateur. La prise en compte du signal peut être initialisée à tout instant de l'enregistrement, la durée de prise en compte pouvant varier de 10 ms à 40 ms : dans tous les cas, l'image de la source constitue donc un instantané très bref.

Le programme de traitement se déroule schématiquement selon les étapes ci-dessous :

- a. filtrage numérique indépendamment sur chacune des 36 voies : les filtres utilisés sont du type Filtres à Réponse Impulsionnelle Finie (FIR) calculés à partir de l'algorithme de REMEZ. Selon les cas, la bande de filtrage varie de 25 Hz à 110 Hz ;
- b. restitution des 36 voies sous leur forme complexe traduisant les termes d'amplitude et de phase de la fréquence filtrée ;
- c. rangement de ces 36 valeurs complexes dans une "image d'entrée" (représentant l'hologramme numérique) aux adresses correspondant à la position des capteurs.

Tous les autres points de l'image sont affectés de la valeur 0.

- d. restitution d'une image de la source acoustique par transformation de Fourier bidimensionnelle de l'hologramme d'entrée, en utilisant successivement ligne par ligne puis colonne par colonne un algorithme de FFT à 64 points ;
- e. tracé d'une image de sortie représentant le module de la transformée de Fourier.

La durée de calcul d'une image, à l'origine de l'ordre de quelques minutes sur mini-ordinateur, a été considérablement écourtée par l'association à celui-ci d'une unité périphérique de traitement arithmétique (MAP : Macro-Arithmetic-Processor) qui permet

UNE EXPERIENCE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE
APPLIQUEE A LA CARACTERISATION DE MACHINES INDUSTRIELLES

de réaliser la transformation de Fourier 64 x 64 points en moins de 10 s. Compte tenu du temps de sortie sur imprimante, la cadence de l'obtention des images est actuellement de 3,5 images/minute.

III.2 Enregistrements "test"

Le système d'imagerie a été d'abord testé sur une source sonore ponctuelle omnidirectionnelle excitée en fréquence pure. Les mesures ont été effectuées à 5 fréquences intéressantes pour les mesures ultérieures mettant en jeu diverses machines industrielles. Elles montrent que, jusqu'à 3 000 Hz, la position et le niveau de la source sont correctement restitués. Aux fréquences supérieures, des remontées de lobes secondaires viennent masquer la source. Elles traduisent la présence, dans le plan d'antenne, d'un champ acoustique anormalement complexe, fait confirmé par des relevés sonométriques et attribué à un phénomène de diffraction. L'image obtenue à 1 550 Hz est présentée figure 4.

III.3 Machines testées

Le système a été essayé sur quatre machines : un aspirateur de copeaux, une dégauchisseuse, une presse électro-pneumatique et un marteau-piqueur. La position et la nature des sources de bruit de ces machines sont assez bien connues. De par leurs dimensions et la nature de leur émission sonore (spectre discret ou à large bande, émission continue ou impulsionnelle), elles constituent un bon échantillonnage des machines industrielles. Sur, ou près de chaque machine a été placé un haut-parleur de petites dimensions, excité en fréquence pure, qui fournit une référence de position.

III.4 Images des machines

Quelques images significatives sont présentées. Sauf indication contraire, la dynamique est limitée à 6 dB afin de mettre en évidence la ou les sources de plus fort niveau.

Aspirateur de copeaux :

Cette machine de grandes dimensions (figure 5a) comportant peu de sources, bien séparées (ventilateur, aspiration, moteur), se prête bien à une opération de localisation. Les images 5b, c et d montrent une localisation correcte du haut-parleur de référence et l'identification de la bouche d'aspiration comme source principale.

Presse (50 000 daN) :

De grandes dimensions (figure 6a), elle représente un type intéressant et répandu de machines, à savoir celles dont le bruit est du type impulsionnel. Chaque cycle dure 1 seconde et s'accompagne de l'émission de deux impulsions sonores brèves (80 ms environ) distantes de 300 ms. Les sources de bruit, à vide, sont situées à la partie supérieure de la machine (embrayage, échappement d'air). L'image 6b met en évidence plusieurs sources à la partie supérieure de la machine qu'il est, embrayage excepté, difficile d'identifier précisément à des sources connues. On notera la présence d'une source de fort niveau, aberrante, car très en dehors de la machine.

Dégauchisseuse :

Le bruit de cette machine à bois (figure 7a), assez simple de conception, est dû à l'interaction aéro-

dynamique de l'air entraîné par l'outil avec les lèvres de la table. Les images présentées (figure 7b), correspondent à des instantanés (1/55ème de seconde) très rapprochés. D'un instant à l'autre, les sources se déplacent sur le bâti de la machine. Le résultat n'est pas aberrant car l'antenne voit la source principale, l'outil, dans la direction où elle émet faiblement (source dipolaire). L'antenne détecte probablement les vibrations du bâti. Si on décentre (figure 7c), on fait pivoter (figure 7d) la machine par rapport à l'antenne, l'outil apparaît alors comme la source principale.

Marteau-piqueur (figure 8a) :

Il constitue un cas difficile car les sources (échappement, vibrations du corps et de l'outil) sont diverses et très rapprochées. Le fonctionnement de l'engin étant cyclique, le bruit émis est, en fait, du type impulsionnel et son spectre discret. L'antenne localise une seule source, au niveau de l'outil (figure 8b). Les figures 8c à 8f montrent une séquence de quatre images prises avec le haut-parleur de référence en fonctionnement. Aux instants de percussion du marteau, l'antenne localise l'outil et faiblement ou pas du tout, le haut-parleur (figures 8e et 8c). Hors percussion, l'antenne détecte le haut-parleur comme source dominante (figures 8d et 8f).

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Y.T. LO
A probabilistic approach to the problem of large antenna arrays
Radio Science, Vol. 68 D, n° 9, sept. 64.
- [2] STEINBERG
Peak sidelobe of the phased array having randomly located elements.
IEEE on AP - mars 72.

Les auteurs remercient MM. M. CAFAXE, D.ROBINET et J. SUEUR de l'INRS pour leur collaboration technique.

----oo00oo----



UNE EXPERIENCE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE
APPLIQUEE A LA CARACTERISATION DE MACHINES INDUSTRIELLES

Fig. 2 - Diagramme d'antenne

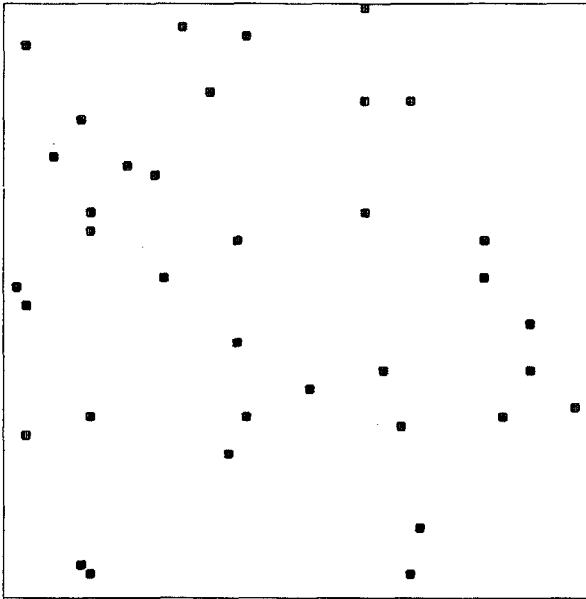


Fig. 1 - Répartition des capteurs

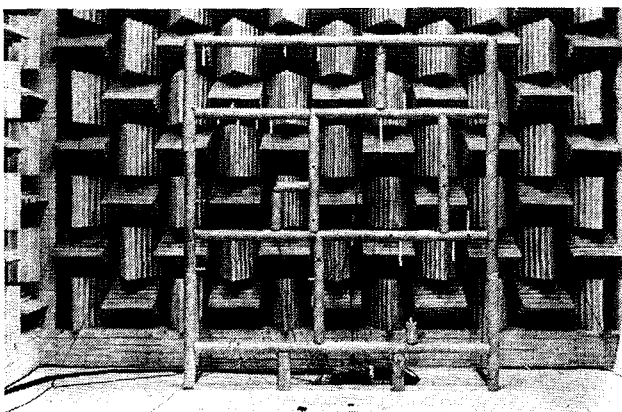
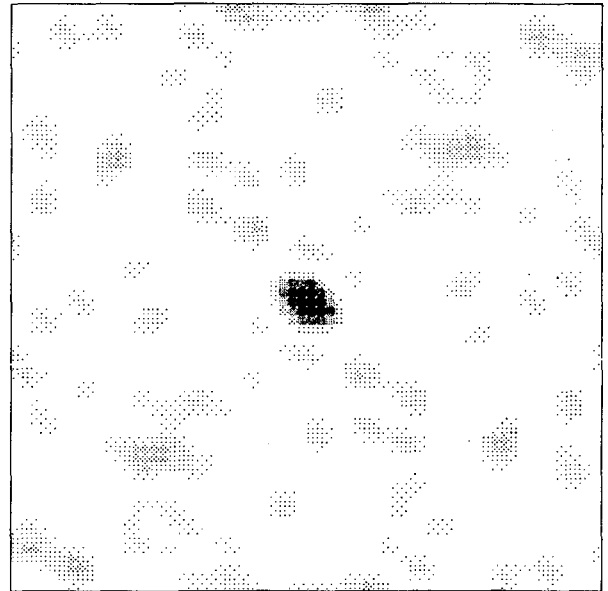
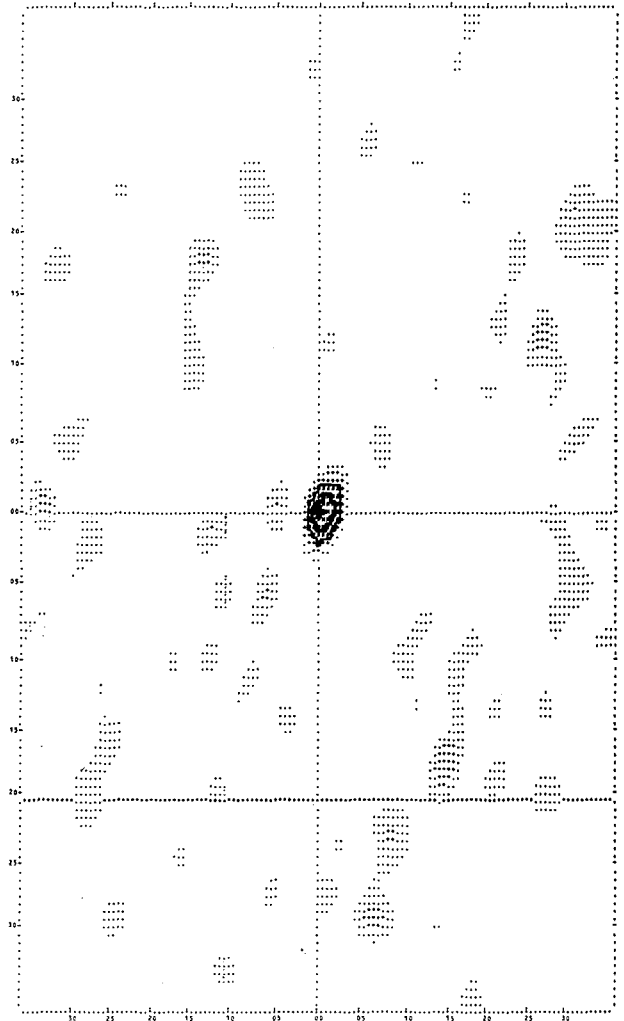
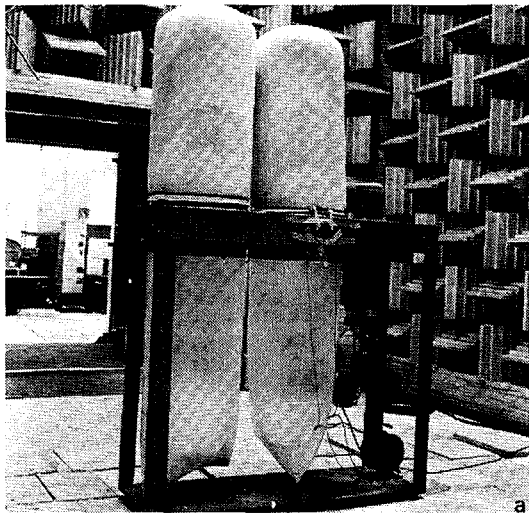


Fig. 3 - Antenne en chambre sourde

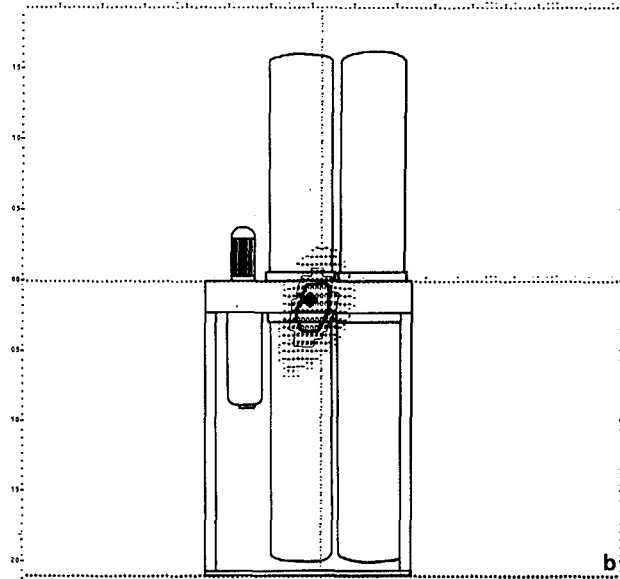
Fig. 4 - Restitution d'un source à 1550 Hz
(dynamique 12 dB)



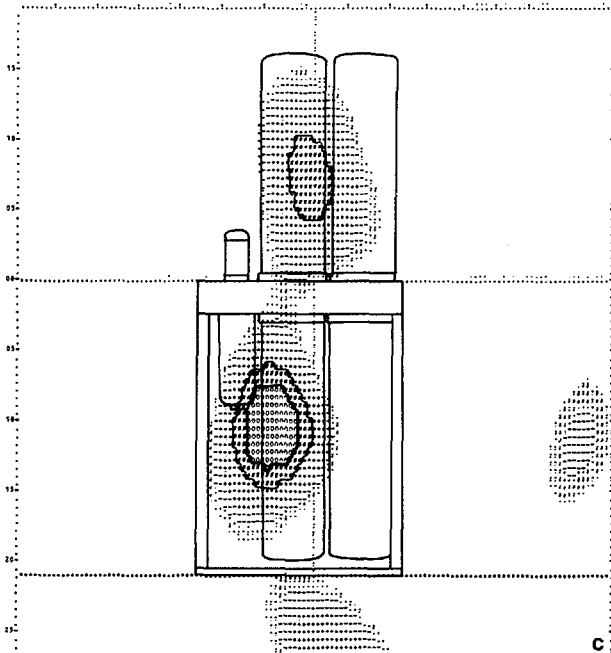
UNE EXPERIENCE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE
 APPLIQUEE A LA CARACTERISATION DE MACHINES INDUSTRIELLES



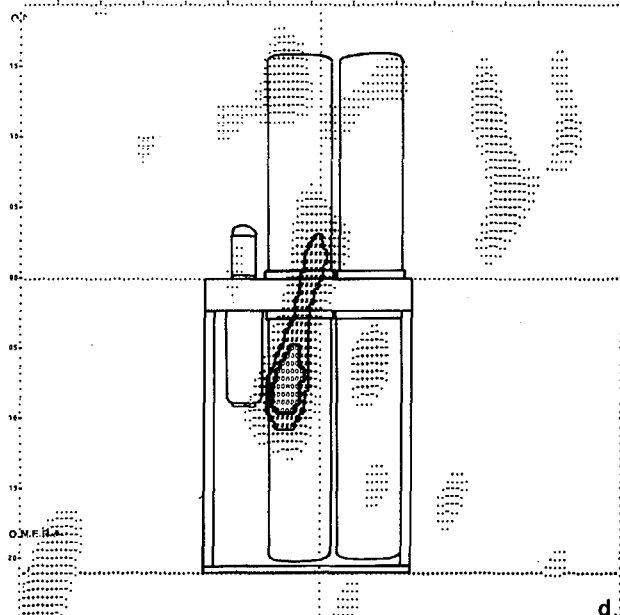
a



b



c



d

Fig. 5 a) Aspirateur de copeaux b) Restitution avec haut parleur 930 Hz c) 610 Hz d) 930 Hz

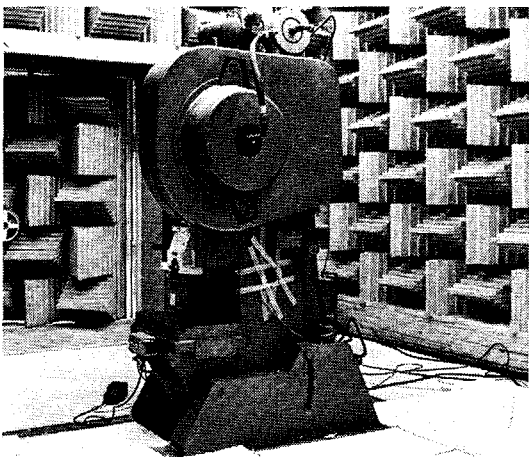


Fig. 6a - Presse

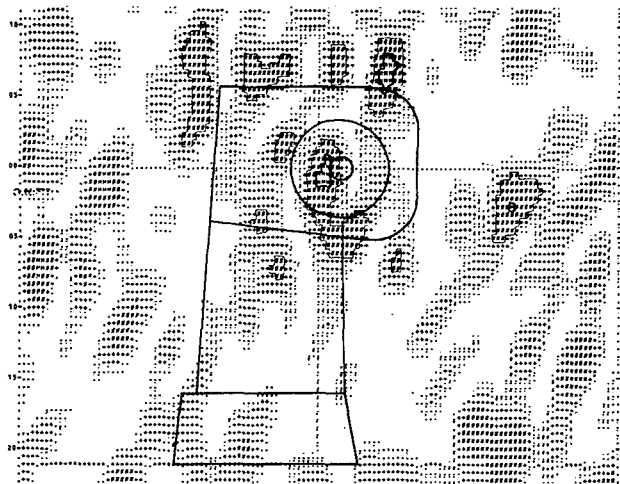


Fig. 6b - 1 550 Hz (dyn. : 15 dB)



UNE EXPERIENCE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE
APPLIQUEE A LA CARACTERISATION DE MACHINES INDUSTRIELLES

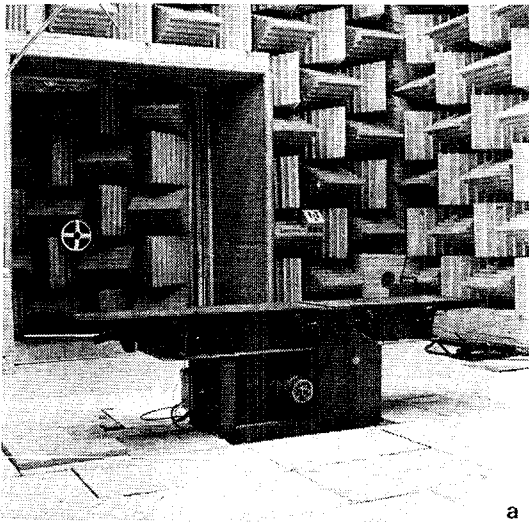
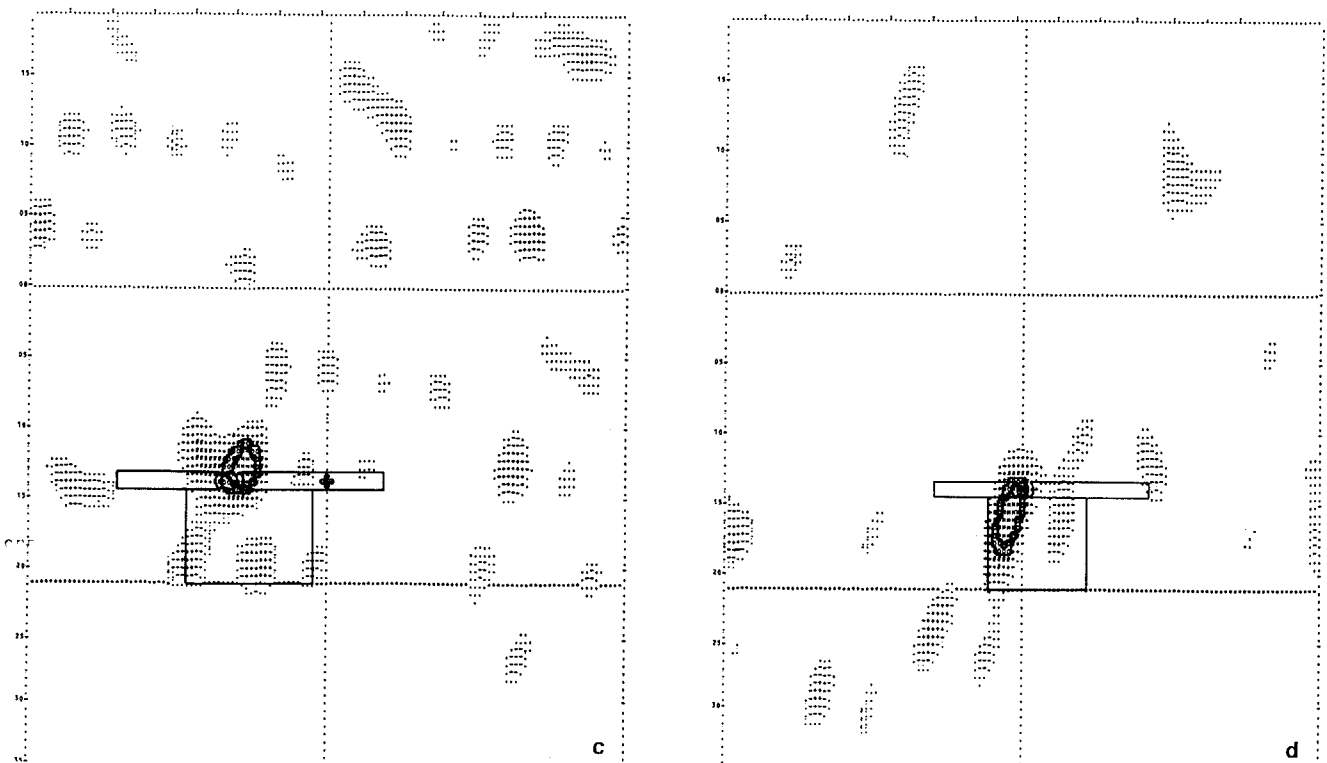
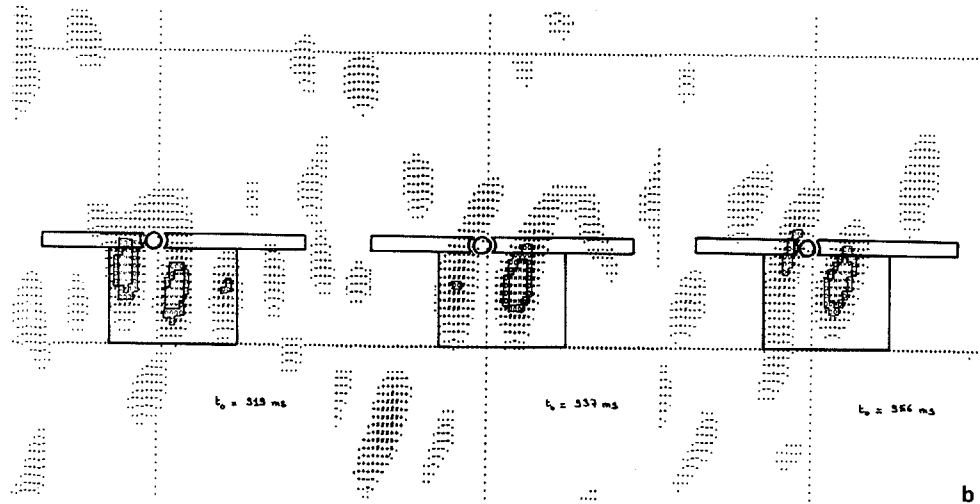


Fig. 7a - Dégauchoiseuse
b - Evolution temporelle
c - Machine décentrée
d - Machine pivotée



UNE EXPERIENCE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE
 APPLIQUEE A LA CARACTERISATION DE MACHINES INDUSTRIELLES

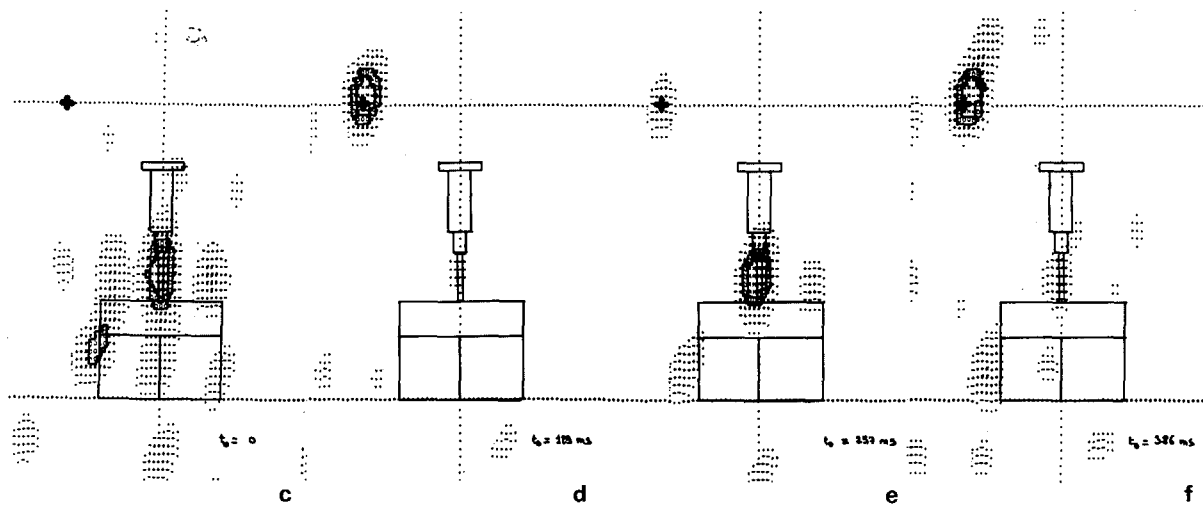
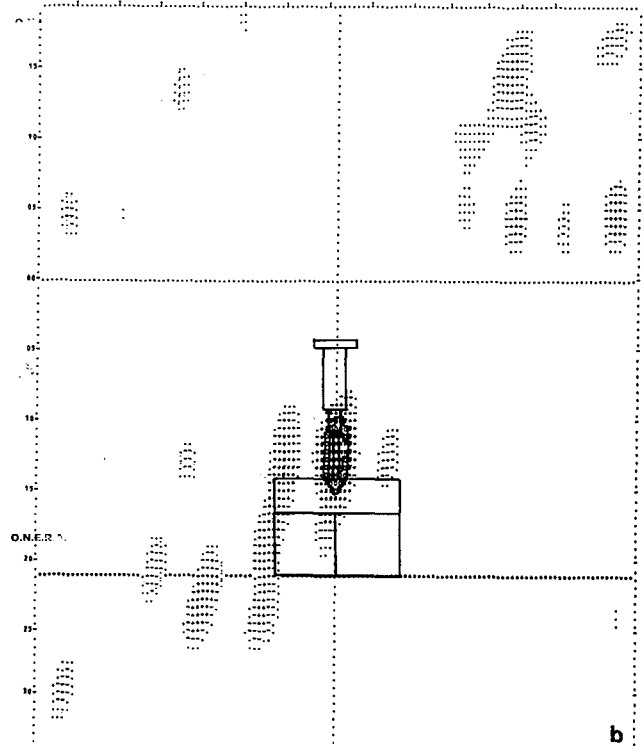


Fig. 8a - Marteau piqueur

- b - 1 295 Hz
- c - 8d - 1 360 Hz
- e - 8f - 1 360 Hz