

SYNTHESE SUR LES PRINCIPALES TECHNIQUES DE MESURE  
DE REPONSE IMPULSIONNELLE EN ACOUSTIQUE DES SALLES

par : L. OTSHUDI  
J.P. GUILHOT

UNIVERSITE PAUL SABATIER - L.A.M.I

Laboratoire d'Acoustique de Métrologie et d'Instrumentation  
38, Rue des 36 Ponts - 31062 TOULOUSE (France)

**RESUME**

Cet article fait le point sur les principales techniques de mesure d'une réponse impulsionnelle en acoustique des salles. Elle comprend deux parties : la première est consacrée aux techniques dites traditionnelles, tandis que la seconde traite des méthodes modernes.

Cette étude comporte, pour chaque technique proposée :

- une approche théorique,
- ainsi que la mise en oeuvre pratique métrologique.

Une présentation systématique des principaux avantages et inconvénients relatifs à l'utilisation de chaque technique constitue aussi le souci majeur de cette synthèse.

Sur le plan du traitement du signal, ce travail met en évidence, dans sa seconde partie, le fait que toutes les techniques récentes de mesure ont un fondement théorique commun basé sur le doublet temporel "convolution et corrélation".

**ABSTRACT**

We examine the principal methods for measuring impulse responses in room acoustics. The first part of the paper is a synthesis of conventional techniques ; the second discusses modern methods, together with the main advantages and disadvantages of the techniques. It is shown in the second part that all new techniques in our signal processing are based on convolution and correlation theory.

## INTRODUCTION

La difficulté majeure rencontrée dans le domaine des techniques de mesures en acoustique des salles est due au fait que l'on ne connaît pas la description mathématique (modèle) qui caractérise le comportement de ces systèmes. La démarche habituellement utilisée par les acousticiens est alors d'expérimenter directement sur le système en vue de déterminer ses propriétés acoustiques. Cette expérimentation conduit en général à la mesure de la réponse impulsionnelle, opérateur temporel propre du système. La détermination de cette fonctionnelle se fait par l'étude de la réponse du système à des signaux particuliers d'excitation. On verra, dans cette étude, que les techniques de mesure se différencient surtout par la nature même du signal test.

Cet article discute aussi des principaux avantages et inconvénients relatifs à l'utilisation de chaque technique. Quant aux approches mathématiques formulées dans ce travail, elles font référence à l'hypothèse opérationnelle d'acoustique linéaire dans le cas monovariable stationnaire et ergodique.

### I. TECHNIQUES TRADITIONNELLES

#### I.1. Formalisme mathématique

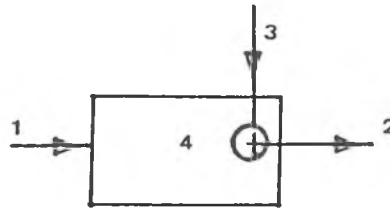


Fig. 1.1 - Représentation d'un canal acoustique (salle) :

- 1 - signal d'excitation
- 2 - signal de sortie
- 3 - bruit additif  $n(t)$
- 4 - canal acoustique  $h(t)$

L'ensemble de ces techniques de mesures traditionnelles ou conventionnelles est fondé sur la théorie d'analyse spectrale.

La réponse impulsionnelle  $h(t)$  d'un canal acoustique (salle) de la fig. 1.1 est donnée par l'expression intégrale :

$$h(t) = \int \frac{H(\nu)}{D(\nu)} e^{2j\pi\nu t} d\nu ; \quad (1)$$

$h(t)$  est une fonction physique et  $D(\nu)$  est l'étendue spectrale de  $H(\nu)$ .

Soit symboliquement  $h(t) \rightleftharpoons H(\nu)$

Le couple  $(h, H)$  constitue une "paire" de Fourier. La formule intégrale (1) met en relation les deux formes de représentations temporelle et fréquentielle de la caractéristique fonctionnelle d'une salle au moyen de l'opération de transformation de Fourier, considérée comme outil mathématique fondamental de la métrologie fréquentielle.

Certains analyseurs bicanaux -et c'est le cas du HP 5420- permettent de mesurer directement la réponse impulsionnelle à partir d'une mesure de densité spectrale d'interaction (DSI) appelée communément "interspectre" et notée " $S(\nu)$ " dans ce texte, avec  $i, j = 1, 2, 3, \dots$ . Si  $i = j$  on a le cas de l'autospectre.<sup>1,2</sup>

Si  $X(\nu)$  et  $Y(\nu)$  sont respectivement les représentations fréquentielles des signaux d'entrée  $x(t)$  et de sortie  $y(t)$  du système à mesurer (salle) : on a la relation spectrale suivante :

$$Y(\nu) = H(\nu) \cdot X(\nu) \quad (2)$$

ou  $X^*(\nu) \cdot Y(\nu) = H(\nu) X^*(\nu) X(\nu)$  ;  $X^*(\nu)$  est le complexe conjugué de  $X(\nu)$

soit  $S_{12}(\nu) = H(\nu) S_{11}(\nu)$

Comme dans la pratique, on considère :

$$G(\nu) = \begin{cases} 2 S(\nu) & \text{pour } \nu > 0 \\ S(\nu) & \text{pour } \nu = 0 \\ 0 & \text{pour } \nu < 0 ; \end{cases}$$

on peut écrire aussi que  $G_{12}(\nu) = H(\nu) \cdot G_{11}(\nu)$ ,

$$\text{d'où l'on tire } H(\nu) = \frac{G_{12}(\nu)}{G_{11}(\nu)} \quad (3)$$

Pour tenir compte de l'effet du bruit additif  $n(t)$  sur le signal de sortie  $y(t)$ , il faut corriger la relation (3) comme suit :

$$G'_{12}(\nu) = X^*(\nu) [ Y(\nu) + N(\nu) ]$$

où  $N(\nu)$  est la représentation fréquentielle du bruit  $n(t)$

On a finalement :

$$H'(\nu) = \frac{G'_{12}(\nu)}{G_{11}(\nu)} = H(\nu) + \frac{G_{13}(\nu)}{G_{11}(\nu)} \quad (4)$$

La contribution du bruit est ici représentée par le terme  $G_{13}(\nu)/G_{11}(\nu)$ , terme rendu généralement très petit en augmentant le nombre de réalisations mis en jeu dans l'opération de moyennage.

## I.2. Sources d'excitations conventionnelles

En métrologie conventionnelle acoustique, il y a principalement deux grandes familles des signaux tests d'excitation : les signaux aléatoires à corrélation microscopique et les excitations impulsives.

Pour ce qui est des signaux aléatoires à corrélation microscopique, le processus représentatif de cette catégorie des signaux est le "bruit blanc",  $b(t)$ . Sur le plan de la terminologie, il convient de faire remarquer que l'appellation "bruit blanc" est liée à la représentation fréquentielle, tandis que le concept de corrélation microscopique correspond à la représentation temporelle.

Ainsi, un signal aléatoire est dit à corrélation microscopique si sa fonction d'autocorrélation est assimilable à une distribution de Dirac :

$$s_{bb}(\tau) = 1/2 N_0 \delta(\tau) \quad (5)$$

Cela se traduit en fréquence par la constance spectrale :

$$S_{bb}(\nu) = 1/2 N_0 \text{ (densité spectrale de puissance constante).}$$

Quant aux excitations impulsives, dites souvent aussi "impacts" -et c'est le cas, par exemple, du "coup de pistolet"-, elles sont également d'usage courant en analyse acoustique. Mais le problème qui se pose est que le modèle du dispositif n'est pas normalisé, en même temps que le modèle mathématique du signal généré diffère d'un laboratoire à un autre. Ainsi, par exemple, dans certaines études menées au LAMI [ 1 ], on a réutilisé la formulation du signal impulsif modélisé [2] par la fonction :

$$p(t) = \begin{cases} p_0 \cdot e^{-at} (1 - at) & \text{pour } t \geq 0 \\ 0 & \text{pour } t < 0 \end{cases}$$

avec  $a = 1/t_0$  ;  $t_0$  étant la largeur de l'impulsion.

## I.3. Aspects méthodologiques pratiques

### I.3.1. Cas d'une analyse avec une source impulsive (impact)

C'est l'approche la plus directe dans la pratique de mesure de la réponse impulsionnelle d'une salle. Elle consiste à exciter celle-ci avec un tel signal impulsif, et d'observer directement la réponse (Fig. 1.2).

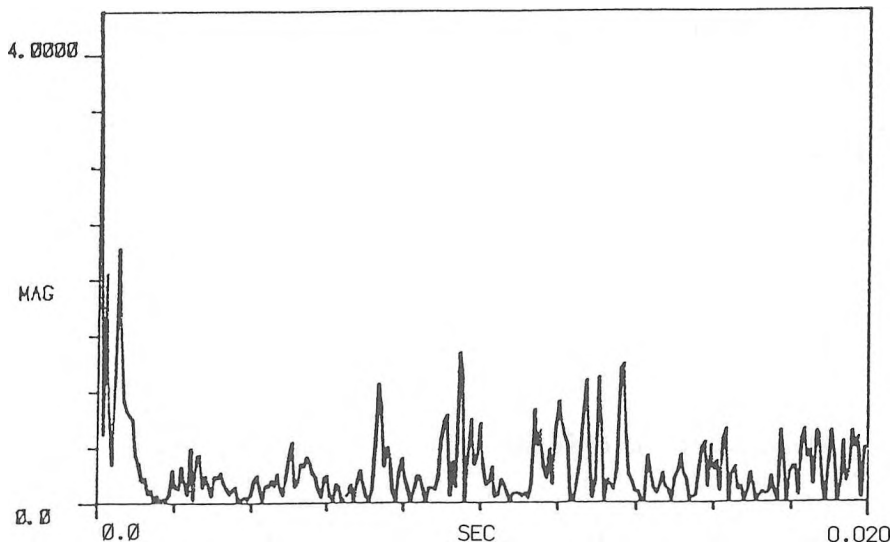


Fig. 1.2 - Réponse impulsionnelle d'une salle excitée par un coup de pistolet

A cette simplicité de mise en oeuvre de la mesure, viennent s'ajouter deux inconvénients :

1. Irrégularité de la distribution énergétique à toutes les fréquences utiles.
2. Médiocrité de la dynamique et de la reproductivité des résultats.

### 1.3.2. Analyse avec une source de bruit blanc

Dans la pratique, la relation (4) s'interprète en se basant sur la paire de Fourier (h, H), ce qui permet d'écrire :

$$\begin{aligned}
 h'(t) &= \int \frac{H'(\nu)}{D(\nu)} e^{2j\pi\nu t} d\nu = \int \left[ \frac{H(\nu)}{D(\nu)} + \frac{G_{13}(\nu)}{G_{11}(\nu)} \right] e^{2j\pi\nu t} d\nu \\
 &= \int \frac{G_{12}(\nu)}{G_{11}(\nu)} e^{2j\pi\nu t} d\nu + \int \frac{G_{13}(\nu)}{G_{11}(\nu)} e^{2j\pi\nu t} d\nu \quad (6)
 \end{aligned}$$

Comme le signal d'entrée  $x(t)$  est dans ce cas un processus à corrélation microscopique, donc à densité spectrale de puissance (DSP) constante, c'est-à-dire, ici,  $G_{11}(\nu) = 1/2 N_0$ , la relation (6) devient :

$$h'(t) = \frac{2}{N_0} \int_{D(\nu)} G_{12}(\nu) e^{2j\pi\nu t} d\nu + \frac{2}{N_0} \int_{D(\nu)} G_{13}(\nu) e^{j\pi t \nu} d\nu \quad (7)$$

D'autre part, en considérant les intercorrélations et les interspectres : les couples  $(g_{12}, G_{12})$  et  $(g_{13}, G_{13})$  constituent deux paires de Fourier.

D'où finalement :

$$h'(t) = \frac{2}{N_0} [g_{12}(t) + g_{13}(t)] \quad (8)$$

Les relations (7) et (8) mettent en évidence deux façons d'opérer la mesure d'une réponse impulsionnelle.

Premièrement, par la mesure de l'interspectre, c'est-à-dire de la densité interspectrale d'énergie (DIE) sur laquelle on applique une transformation de Fourier. Ce procédé est le plus ancien et le plus répandu sur les analyseurs spectraux de traitement du signal.

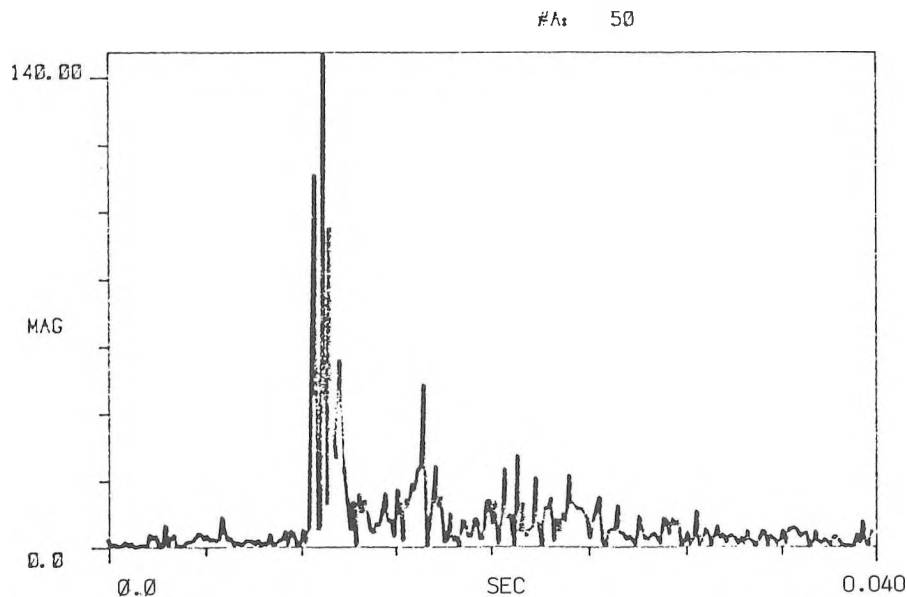


Fig. 1.3 - Réponse impulsionnelle de la salle, obtenue par la méthode spectrale.

Deuxièmement : par la mesure de la fonction d'intercorrélation.

Avec l'emploi des sources à corrélation microscopique, il y a deux avantages essentiels : dynamique adéquate et possibilité d'assurer l'uniformité de la distribution temporelle énergétique (utilisation de haut parleur à rayonnement

omnidirectionnel).

Par contre, le principal obstacle de cette approche est qu'il faut faire un nombre assez grand de moyennages (50 par expérience) avant toute validation d'un résultat de mesure (Fig. 1.3).

## II. TECHNIQUES MODERNES

### II.1. Conceptualisation mathématique

Les différentes approches métrologiques modernes de mesure d'une réponse impulsionnelle sont actuellement essentiellement basées sur deux opérateurs de traitement du signal, à savoir : la convolution et la corrélation.

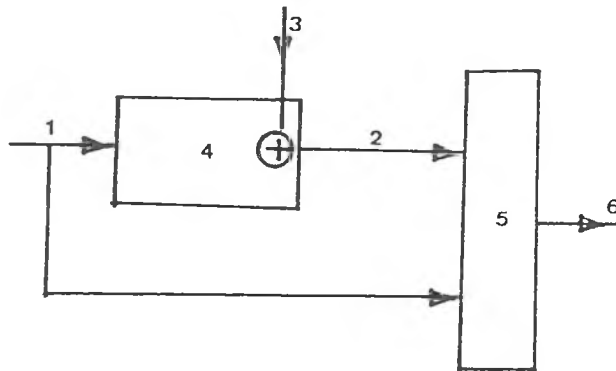


Fig. 2.1 - Synoptique de mesure d'une réponse impulsionnelle par la méthode de corrélation :

- 1 - signal d'excitation
- 2 - réponse de la salle
- 3 - bruit additif
- 4 - canal (salle)
- 5 - corrélateur
- 6 - réponse impulsionnelle

Si, dans un premier temps, on suppose que le bruit  $n(t)$  n'agit pas sur la salle (Fig. 2.1), la réponse de la salle est donnée par la formule de VASCHY [3], comme suit :

$$y'(t) = (h*x) (t) ; * \text{ est le produit de convolution} \quad (9)$$

En admettant l'influence du bruit  $n(t)$  dans la salle, on déduit aussi sa participation en sortie :

$$y''(t) = (h*n) (t) \quad (10)$$

En tenant compte de l'hypothèse de linéarité émise en introduction, on obtient la réponse globale de la salle par additivité :

$$\begin{aligned} y(t) &= y'(t) + y''(t) \\ &= (h*x)(t) + (h*n)(t) \end{aligned}$$

D'où l'intégrale de convolution :

$$y(t) = \int_0^{\infty} [x(t-\theta) + n(t-\theta)] h(\theta) d\theta ; \quad (11)$$

D'autre part, en considérant la statistique du second ordre des signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  en corrélation, on peut aussi écrire que :

$$s_{21}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T y(t)x(t-\tau) dt ; \text{ fonction d'intercor-} \quad (12)$$

rrelation

$$s_{11}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)x(t-\tau) dt ; \text{ fonction d'auto-} \quad (13)$$

corrrelation

En introduisant dans (12) l'expression de  $y(t)$  donnée par l'intégrale de convolution, on obtient le développement suivant :

$$s_{21}(\tau) = \int_0^{\infty} \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t-\theta) + n(t-\theta)] x(t-\tau) h(\theta) dt d\theta$$

En admettant l'hypothèse de la décorrélation statistique entre les signaux  $x(t)$  et  $n(t)$ , on a :

$$s_{13}(\tau-\theta) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T n(t-\theta) x(t-\tau) dt = 0$$

D'où finalement :

$$s_{21}(\tau) = \int_0^{\infty} s_{11}(\tau-\theta) h(\theta) d\theta \quad (14)$$

On constate, en définitive, que le concept du doublet temporel "convolution et corrélation" est explicité par la relation qui lie la FAC (Fonction autocorrélation) du signal d'entrée et la FIC (Fonction d'intercorrélation) des signaux d'entrée et de sortie du système analysé.



Soit symboliquement :

$$s_{21} = s_{11} * h$$

Il convient donc de souligner que la relation (14) est une formule générale intégrale pour la mesure d'une RI (réponse impulsionnelle).

## II.2. Principes généraux opératoires

On peut grouper en trois catégories les différentes techniques récentes de mesure de réponse impulsionnelle en acoustique des salles : les techniques de déconvolution numérique, les méthodes de corrélation et les techniques de filtrage inverse.

### II.2.1. Technique de déconvolution numérique

Le principe de cette approche peut être expliqué à partir de l'équation fondamentale de convolution (9). La déconvolution consiste à résoudre cette équation par rapport à  $h(t)$ , à partir des enregistrements sur un intervalle de temps fini  $T$  ( $0 \leq t \leq T$ ) des signaux d'entrée-sortie  $x(t)$  et  $y(t)$ .

Le problème de la déconvolution étant analytiquement complexe, on s'oriente en général vers des hypothèses d'approximation comme, par exemple :

$$x(t) = x(n\Delta t), \text{ avec } N\Delta t = T \text{ et } n = 1, \dots, N$$

$$\text{pour } n\Delta t < t < \Delta t(n+1) : \Delta t \text{ est le pas d'échantillonnage.}$$

$$h(t) = h\left(\frac{2n+1}{2} \Delta t\right)$$

L'opération de convolution étant commutative, l'équation (9) s'écrit aussi :

$$y'(t) = \int_0^t h(t-\theta) \cdot x(\theta) d\theta$$

on approche alors  $y'(t)$  par l'expression

$$y'(n\Delta t) = \Delta t \sum_{i=0}^{n-1} h\left(\frac{2n+1}{2} \Delta t - i\Delta t\right) \cdot x(i\Delta t)$$

soit, en écriture matricielle :

$$Y' = \Delta t \cdot X \cdot H \tag{15}$$

$$\text{avec } Y'^T = [y'(\Delta t) \quad y'(2\Delta t) \quad \dots \quad y'(N\Delta t)]$$

$$H^T = \left[ h\left(\frac{\Delta t}{2}\right) \quad h\left(\frac{3\Delta t}{2}\right) \quad \dots \quad h\left(\frac{2N-1}{2} \Delta t\right) \right]$$

$$\text{et } X = \begin{vmatrix} x(0) & 0 & \dots & 0 \\ x(\Delta t) & x(0) & & 0 \dots 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x[(N-1)\Delta t] & x[(N-2)\Delta t] & \dots & x(0) \end{vmatrix}$$

Si la valeur du signal d'entrée  $X(0^+)$  est  $\neq 0$ , alors le déterminant de la matrice  $X$  est  $\neq 0$ , et donc à partir de (15) on obtient :

$$H = \frac{1}{\Delta t} \cdot X^{-1} \cdot Y'$$

L'inconvénient majeur de cette approche est qu'elle ne traite pas les bruits additifs inconnus  $n(t)$  qui s'ajoutent sur la sortie  $y'(t) = h(t) * x(t) + n(t)$  : ceci contrairement à la méthode de corrélation qui même en présence de telles perturbations donne encore  $s_{21} = s_{11} * h$  (cas où ces perturbations sont supposées indépendantes de l'excitation  $x(t)$ ).

### II.2.2. Typologie des signaux tests et approches opératoires pour la méthode de corrélation

La description des signaux tests faite sommairement ici est celle qui consiste à permettre de solutionner l'intégrale de convolution (14) en vue d'en tirer la réponse impulsionnelle.

Les sources à corrélation microscopique sont aussi d'usage courant en métrologie moderne acoustique.

Cela se justifie surtout par la nature impulsionnelle de leur FAC comme signalé au paragraphe I.2.

Dans ce cas, la relation (14) devient :

$$s_{21}(\tau) = \frac{1}{2} N_0 \int_0^{\infty} \delta(\tau - \theta) h(\theta) d\theta$$

$$\text{soit } s_{21}(\tau) = \frac{1}{2} N_0 h(\tau) \quad (16)$$

Donc au coefficient  $1/2 N_0$  près, on remarque que la FIC est égale à la RI recherchée.

Il y a aussi les séquences binaires pseudo-aléatoires (SBPA) qui sont utilisées comme sources modernes d'excitation [4], [5]. Une SBPA, appelée aussi communément "séquence à longueur maximale" ou encore "M-séquence", est une source réalisée à partir d'une configuration polynomiale primitive  $P_n(x)$  de degré  $n$  (avec  $N = 2^n - 1$ )

la longueur de la séquence) permettant de spécifier les rebouclages nécessaires d'un registre à décalage binaire [6] .

La FAC d'une telle séquence à longueur temporelle maximale  $T_{\max} = (2^n - 1) \Delta T$ , est donnée par :

$$s_{\text{SBPA}}(\tau) = s_{11}(\tau) = \begin{cases} 1 & \text{pour } \tau = 0 \\ -\frac{1}{T} & \text{pour } 1 \leq \tau \leq (2^n - 1) \Delta T \end{cases}$$

avec  $\Delta T = 1/F$  où  $F$  est la fréquence d'horloge de fonctionnement du registre.

Cette FAC présente une analogie formelle avec l'approche physique de la distribution de Dirac ; ce qui permet de la formaliser en représentation en distribution comme suit :

$$s_{11}(\tau) = \left(1 + \frac{1}{T}\right) \delta(\tau) - \frac{1}{T} = \delta(\tau) - \frac{1}{T}$$

Dans ce cas, où l'excitation est une SBPA, l'égalité (14) devient alors :

$$s_{21}(\tau) = \int_0^{\infty} \delta(\tau - \theta) h(\theta) d\theta - \frac{1}{T} \int_0^{\infty} h(\theta) d\theta$$

soit finalement :

$$s_{21}(\tau) = h(\tau) - h_{\text{moy}} \quad (17)$$

où  $h_{\text{moy}}$  est la composante continue de la RI rendue généralement petite par un bon réglage du système de mesure.

#### II.2.2.1. Traitement numérique

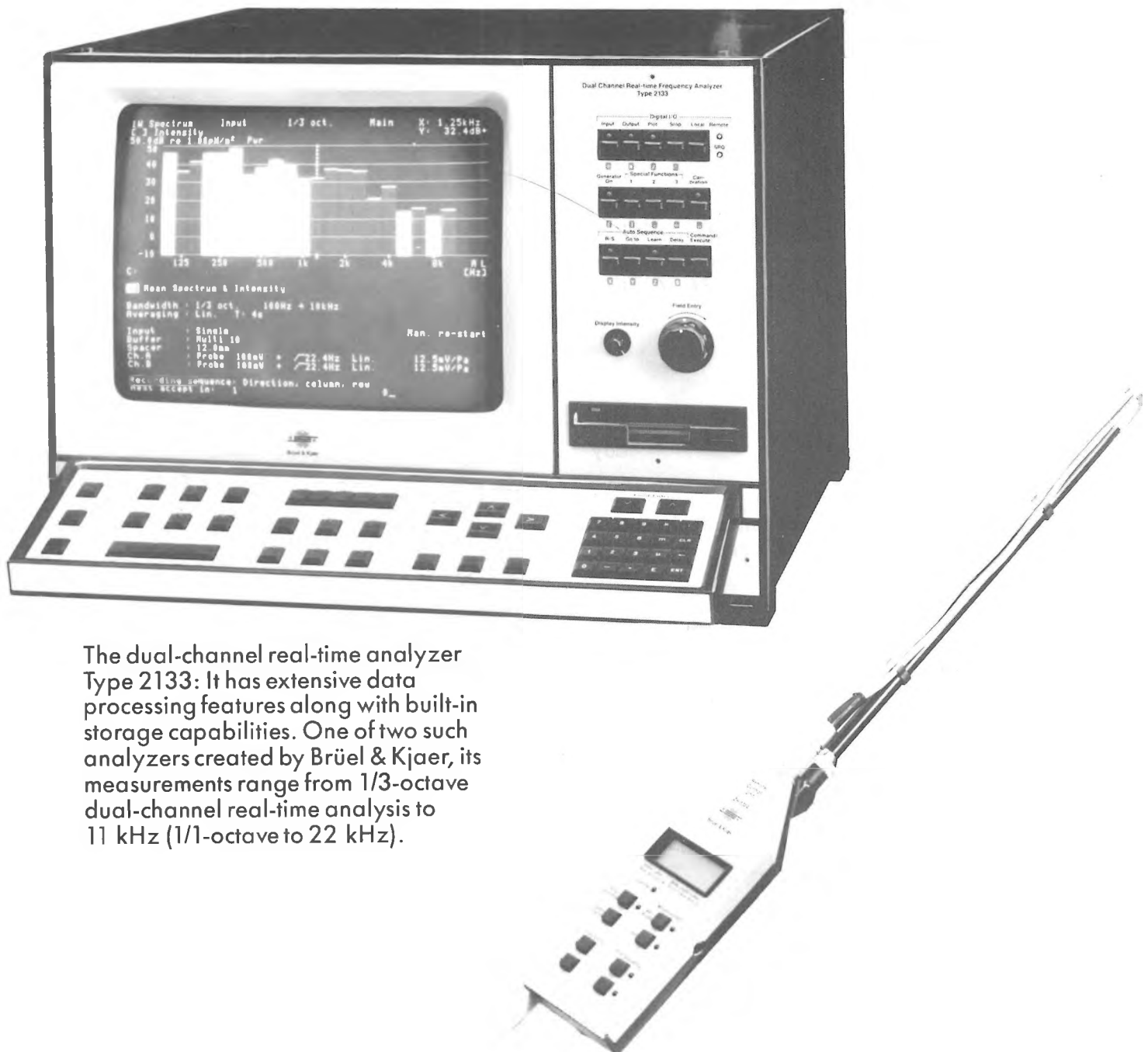
Etant donné que dans les deux cas envisagés précédemment (excitations à corrélation microscopique et SBPA), les solutions finales de l'intégrale de convolution (14) données par (16) et (17) mettent en évidence le caractère proportionnel entre la FIC et la réponse impulsionnelle : le traitement numérique à effectuer consiste globalement à évaluer l'estimateur temporel discret de corrélation  $s_{21}$  donné par :

$$s_{21}(i) = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y(k) x(k-i)$$

Pour une analyse avec une excitation à corrélation microscopique on procède d'abord, dans la pratique, à l'acquisition puis au stockage en fichiers des signaux d'entrée et de sortie échantillonnés  $x(n)$  et  $y(n)$ .

# THE COMPLETE ACOU

Our state-of-the-art instruments do far more than measure the intensity of sound in any given situation. With this system, Brüel & Kjaer



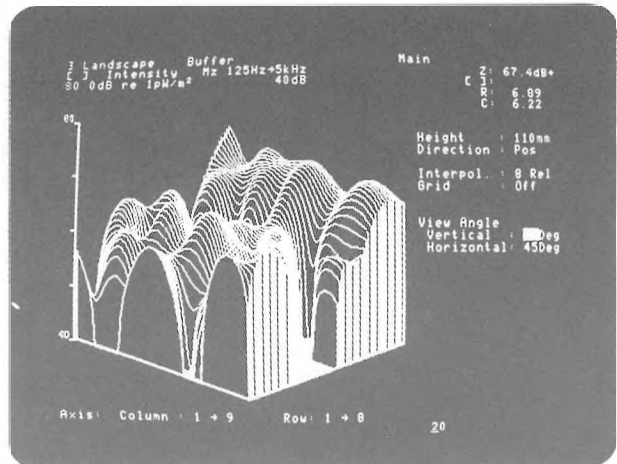
The dual-channel real-time analyzer Type 2133: It has extensive data processing features along with built-in storage capabilities. One of two such analyzers created by Brüel & Kjaer, its measurements range from 1/3-octave dual-channel real-time analysis to 11 kHz (1/1-octave to 22 kHz).

# ISTICS LABORATORY

instruments can map, graph, record and analyze sound events. It's like having an entire laboratory calibrated to the highest possible accuracy.



New intensity probe 3545 and remote control unit ZH 0354, for direct connection to, and control of, Analyzer 2133.



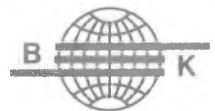
An MS-DOS compatible data storage is used in the built-in disc drive. An optional intensity mapping software package, the BZ 7021, is also available.



Sound intensity calibrator 3541, an innovation in intensity measurements.



## Brüel & Kjær



Brüel & Kjær Canada Ltd., 90 Leacock Road, Pointe Claire, Que., H9R 1H1

Montreal: (514) 695-8225 Ottawa: (613) 225-7648 Toronto: (416) 677-5472  
Winnipeg: (204) 694-2884 Edmonton: (403) 484-4228 Vancouver: (604) 278-4257

Les opérations relatives à ce traitement, à savoir : le pilotage du CAN (convertisseur analogique/numérique), l'acquisition, le stockage, le calcul proprement dit de l'estimateur ainsi que le moyennage, sont réalisées à l'aide du calculateur HP 9000.

La fig. 2.2 montre le dispositif expérimental utilisé.

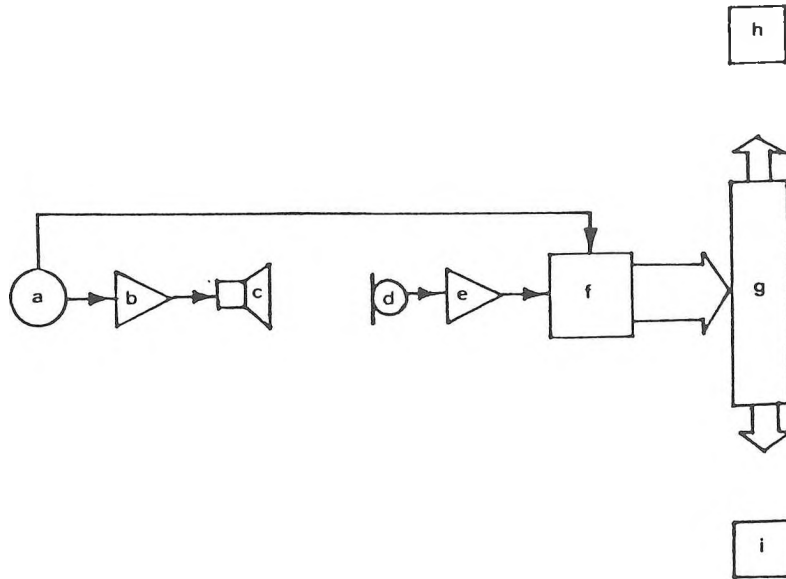


Fig. 2.2 - Dispositif expérimental :

- |                             |                           |
|-----------------------------|---------------------------|
| a - source                  | f - CAN                   |
| b - amplificateur           | g - calculateur (HP 9000) |
| c - haut-parleur            | h - unité de disque       |
| d - microphone              | i - terminal graphique    |
| e - amplificateur de mesure |                           |

L'inconvénient majeur rencontré dans cette approche métrologique est le temps relativement assez long que prend le calcul de l'estimateur.

Avec une SBPA, le calcul de la RI par corrélation est décrit en termes de multiplication matricielle par la relation :

$$\hat{s}_{21} = \frac{1}{N} X_N \cdot Y_N$$

où  $X_N$  est alors un signal représenté en matrice carrée (dimension =  $2^n - 1$ ) constituée d'éléments obtenus par shiftage circulaire (droite) de la séquence

symétrisée par assignation des valeurs  $\pm 1$  aux deux états binaires (1 en -1 et 0 en 1) et  $Y_N$ , un vecteur de longueur N.

Ce cas où la salle est excitée par un tel processus, revêt en pratique une importance particulière, car cela permet de minimiser les opérations nécessaires pour l'évaluation de l'estimateur de corrélation par l'utilisation de l'algorithme rapide de transformation d'Hadamard (THR).

On montre [ 5 ] avec cet algorithme, que le nombre d'opérations est sensiblement égal à  $2,5 N \log_2 N$  au lieu de  $N^2$  classiquement. Ainsi, le gain en nombre d'opérations peut se chiffrer par :

$$G.O. = \frac{N^2}{2,5.N.\log_2 N} = \frac{N}{2,5 \log_2 N}$$

Exemple : pour 512 points, l'algorithme rapide effectue 22 fois moins d'opérations que le calcul direct conventionnel, et, pour 4 094 points, il réalise 136 fois moins d'opérations.

Il convient aussi de mentionner que les SBPA sont des signaux d'excitation à faible niveau, ce qui rend plus acceptable l'hypothèse de linéarité acoustique. La seule difficulté qui se présente est celle de passer par une phase de calculs initiaux qui consiste à mettre la matrice  $X_N$  de la SBPA sous forme d'une matrice d'Hadamard, un préalable pour l'application de cet algorithme.

Il est utile de rappeler ici que la matrice d'Hadamard (H) est une matrice carrée de dimension  $2^n$ , dont les éléments sont  $+1$  ou  $-1$ , et dont les lignes (ou les colonnes) sont mutuellement orthogonales.

Contrainte métrologique : il faut présumer de la durée de la RI à mesurer et s'assurer que cette durée est inférieure à la longueur temporelle maximale de la séquence  $T_{\max}$  [ 7 ].

Pour réaliser le traitement relatif à cette partie, nous nous sommes référés en particulier aux travaux cités en référence [ 5 ] et [ 8 ]. A. LEMPEL [ 8 ] met en évidence et démontre l'équivalence (par permutation) entre la matrice d'une séquence à longueur maximale et la matrice d'Hadamard du même ordre ; tandis que J. BORISH et J. ANGEL [ 5 ] décrivent pour un système acoustique excité avec une SBPA, toute la démarche de mise en oeuvre du calcul de la FIC basé sur l'utilisation de la transformation rapide d'Hadamard.

Ainsi donc, quatre modules-programmes ont été créés :

- module d'acquisition de la réponse  $y(n)$  de la salle ;
- module de génération de la séquence ;
- module de calcul des transformations permutationnelles ;
- module de calcul proprement dit de la THR.

En ce qui concerne le module de calcul des transformations permutationnelles ( $P_1$  et  $P_2$ ), notre approche n'est plus basée sur la représentation matricielle de la séquence comme proposé dans [ 5 ] et [ 8 ], mais sur sa représentation "séquentielle-série", ce qui permet de stocker seulement un vecteur de longueur  $N = 2^n - 1$  au

lieu d'un tableau dimensionné ( $N \times N$ ). Ce mono-dimensionnement de la matrice a été rendu possible grâce au caractère déterministe de la séquence binaire pseudo-aléatoire.

Les figures 2.3 et 2.4 montrent les RI obtenues avec une excitation SBPA pour deux salles distinctes.

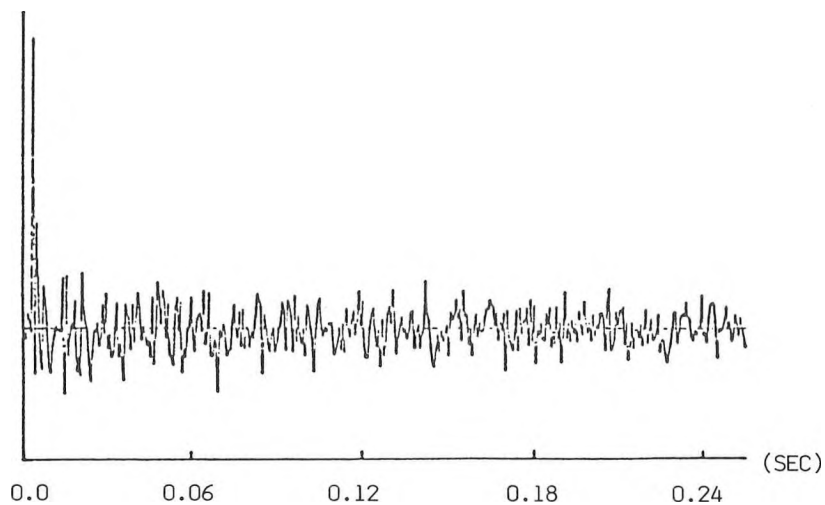


Fig. 2.3 - Réponse impulsionnelle d'une salle obtenue par corrélation classique avec une excitation binaire pseudo-aléatoire.

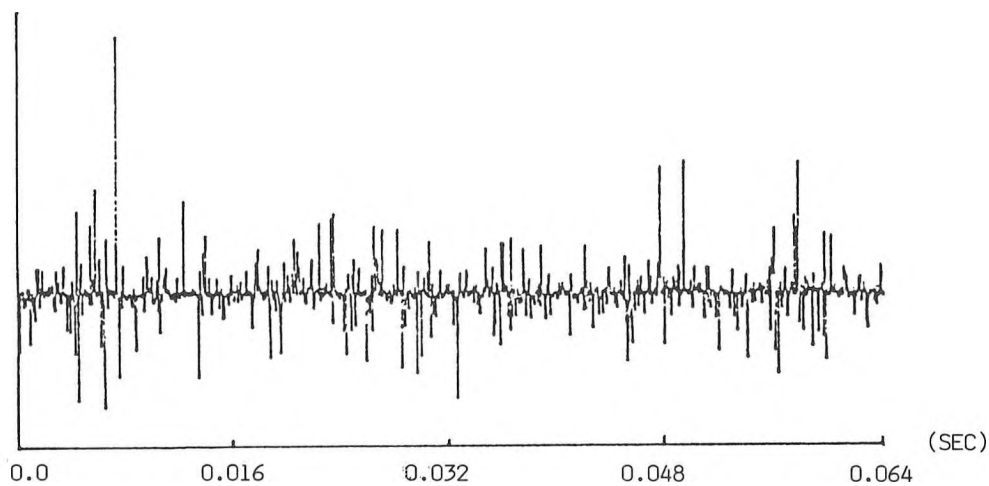


Fig. 2.4 - Réponse impulsionnelle d'une salle obtenue par corrélation utilisation la THR (on ne visualise que le début de cette réponse, les 1 024 premiers points).



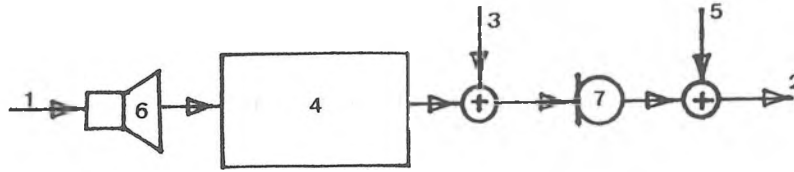


Fig. 2.5 - Système général de mesures acoustiques :

- 1 - signal d'excitation  $x(t)$
- 2 - signal de sortie mesuré du système  $y(t)$
- 3 - bruit acoustique  $n_3(t)$
- 4 - canal acoustique  $h_4(t)$
- 5 - bruit électrique  $n_5(t)$
- 6 - haut-parleur  $h_6(t)$
- 7 - microphone  $h_7(t)$ .

### II.2.3. Techniques de filtrage inverse [9]

Sur la figure 2.5. la sortie  $y(t)$  s'exprime en fonction des autres paramètres fonctionnels par :

$$y(t) = [x(t) * h_6(t) * h_4(t) + n_3(t)] * h_7(t) + n_5(t)$$

En posant :  $n(t) = n_3(t) * h_7(t) + n_5(t) :$

$$h_{67}(t) = h_6(t) * h_7(t) ; \quad \text{et}$$

$w(t) = x(t) * h_{67}(t) ;$  cette sortie devient tout simplement :

$$y(t) = w(t) * h_4(t) + n(t) \quad (18)$$

Pour trouver  $h_4(t)$ , la RI du couplage acoustique, il suffit de filtrer  $y(t)$  dans un filtre  $f(t)$  de fenêtre finie tel que  $f(t) * y(t)$ , approxime  $h_4(t)$  sans augmenter l'effet de  $n(t)$  et sous certains critères d'optimalité.

Cette façon de formuler ramène donc le problème de la mesure d'une RI à celui de trouver le filtre  $f(t)$ .

On cherche l'équation du filtre  $f(t)$  par la méthode basée sur des critères des moindres carrés :

$$\text{Erreur} = e = \sum [f(t) * y(t) - h_4(t)]^2 \quad \text{minimale.}$$

$$\text{C'est-à-dire } f(t) * s_{22}(t) = s_{24}(t) \quad (19)$$

D'autre part, en prenant la FAC de  $y(t)$  donnée en (18), on a :

$$s_{22}(t) = s_{ww}(t) * s_{44}(t) + s_{nn}(t)$$

Et la FIC de  $y(t)$  et  $h_4(t)$  donne d'autre part :

$$s_{24}(t) = [w(t) * h_4(t) + n(t)] * h_4^\#(t) ;$$

$$h_4^\#(t) = h_4^*(-t) \text{ fonction adjointe}$$

$$= w(t) * (h_4^\# * h_4)(t) + (n * h_4^\#)(t)$$

Si  $h_4(t)$  est considéré comme un processus à corrélation microscopique et  $n(t)$  un bruit décorrélé, on a les égalités suivantes :

$$(h_4 * h_4^\#)(t) = \delta(t) ;$$

$$(n * h_4^\#)(t) = 0$$

Et comme  $\delta(t) = \delta(-t)$ , postulat dans la théorie de distributin de Dirac, cela donne pour la FIC :

$$s_{24}(t) = w(t) * \delta(-t) = w(-t) \quad (20)$$

En combinant (18), (19) et (20), on a :

$$f(t) * [s_{ww}(t) + s_{nn}(t)] = w(-t)$$

Soit en fréquence, par transformation de Fourier :

$$F(\nu) \cdot S_{ww}(\nu) + S_{nn}(\nu) = W^*(\nu)$$

D'où

$$F(\nu) = \frac{W^*(\nu)}{|W(\nu)|^2 + S_{nn}(\nu)} \quad |W(\nu)| \text{ est le module de } W(\nu)$$

Avec  $S_{nn}(\nu)$  généralement considéré comme un terme constant.

## CONCLUSION

Ce panorama a permis de montrer l'éventail des possibilités opérationnelles dont disposent les acousticiens pour effectuer la mesure d'une réponse impulsionnelle. Il n'est pas une étude comparative de techniques de mesure, mais un exposé de méthodologies. Ces techniques, dans le domaine d'acoustique, s'originent soit dans la métrologie fréquentielle, soit dans la métrologie temporelle. Toutefois, on constate actuellement que les conceptions théoriques de ces méthodes sont basées essentiellement sur des formulations temporelles : ce qui explique en partie le développement de la métrologie temporelle acoustique.

En acoustique moderne des salles, la réponse impulsionnelle, fonctionnelle propre du canal, peut être considérée aujourd'hui comme point de départ de toute étude conduisant à la caractérisation de tels systèmes : c'est pour cette raison que les acousticiens se polarisent sur cet opérateur, et que l'on recommande habituellement de le déterminer avec un soin tout particulier. Mais le problème est que la plupart des modèles théoriques sur lesquels sont fondées ces techniques de mesure sont soit trop idéalisés (indépendance statistique des signaux), soit trop simplifiés (globalisation de la réponse impulsionnelle) ; ce qui pose ici naturellement le problème de la "finesse de représentativité" de cet opérateur.

L'approche méthodologique proposée par BERKHOUT, DE VRIES et BOONE [9] semble intéressante sur le plan de la globalisation de la réponse impulsionnelle, ce qui nous a incité, dans le cadre de ce panorama, à en rappeler la formalisation mathématique au paragraphe II.2.3. Sur le plan conceptuel, l'intérêt d'une telle approche est qu'elle permet théoriquement d'obtenir uniquement la réponse impulsionnelle propre (utile) du système à mesurer ; ceci contrairement aux autres techniques qui donnent une réponse impulsionnelle "globale" c'est-à-dire incluant le couplage acoustique et les éléments constitutifs de la chaîne de mesure.

Enfin, aucun critère de choix d'une méthode n'est suggéré dans cette synthèse, car nous pensons que cela doit dépendre des moyens matériels disponibles et surtout du degré de familiarisation de l'utilisateur avec une technique donnée.

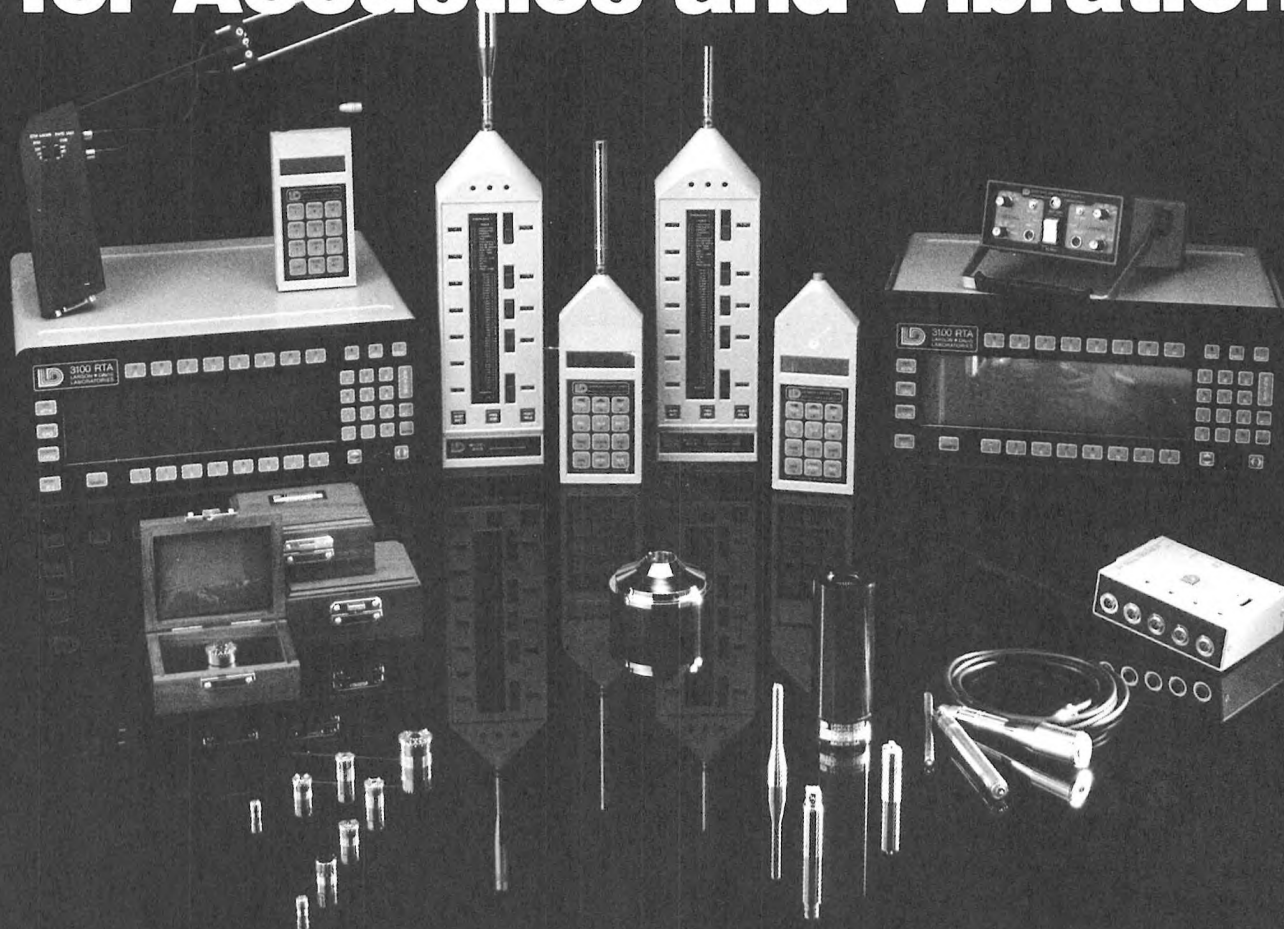
## BIBLIOGRAPHIE

---

- [1] J.L. CHARLES, D. GELY et J.P. GUILHOT - "Problèmes métrologiques posés par la mesure de l'isolement acoustique à l'aide d'une source impulsive".  
Acoustica, 1986, vol. 60, n° 2, pp. 126-134.
- [2] A. DANCER, R. FRANKE et L. OUDIN - "Influence de l'ensemble volume corporel oreille externe sur la transmission des bruits impulsifs du champ libre au tympan chez l'homme et chez le cobaye".  
Acoustica, vol. 47, 1981.
- [3] G. BONNET - "Considérations sur la représentation et l'analyse harmonique des signaux déterministes et aléatoires".  
Extrait des Annales des Télécom., tome 23, n° 3-4, mars-avril 1968.
- [4] H. ALRUIS and M.R. SCHROEDER - "A fast hadamard transform method for the évaluation of measurements using pseudorandom test signals".  
Ile I.C.A., 1983, Paris.
- [5] J. BORISH and J.P. ANGELL - "An efficient algorithm for measuring the impulse response using pseudorandom noise".  
J. Audio eng. soc. 1983, vol. 31, n° 7, pp. 478-487.
- [6] F. JESSIE MAC QILLIAMS and J.A. SLOANE - "Pseudo-random sequences and arrays".  
Proceeding of the IEEE, vol. 64, n° 12, décembre 1976.
- [7] J. MAX - "Méthodes et techniques de traitement du signal et applications aux mesures physiques".  
Masson, 1980, Paris.
- [8] A. LEMPEL - "Hadamard and M-Sequence transforms are permutationally similar".  
Applied Optics, 1979, vol. 18, n° 24, pp. 4064-4065.
- [9] A.J. BERKHOUT, D. de VRIES and M.M. BOONE - "A new method to acquire impulse response in concert halls".  
J. Acoust. Soc. Am. 1980, vol. 68, n° 1, pp. 179-183.
- [10] A.J. BERKHOUT, M.M. BOONE and C. KESSELMAN - "Acoustic impulse response measurement : a new technique".  
J. Audio Eng. soc. : 1984, vol. 32, n° 10, pp. 740-746.
- [11] J. BORISH - "Self contained crosscorrelation program for maximum length sequences".  
J. Audio Eng. Soc., 1985, vol. 33, n° 11, pp. 888-891.
- [12] L. OTSHUDI, J.P. GUILHOT, J.L. CHARLES - "Overview of techniques for measuring impulse response in room acoustics".  
Proceeding IOA/Acoustics, 88, vol. 10, pp. 407-414, Cambridge, avril 1988.
- [13] K.G. BEAUCHAMP - "Walsh functions and their applications".  
Academic Press, 1975.

- [ 14 ] Heinrich KUTTRUFF - "Room Acoustics".  
Applied science publishers LTD, 1973, London.
- [ 15 ] J. LIFERMAN - "Les méthodes rapides de transformation du signal : Fourier,  
Walsh, Hadamard, Haar".  
Masson, 1980, Paris.

# Superior Instrumentation for Acoustics and Vibration



## LARSON-DAVIS LABORATORIES

We have become a new technology leader in acoustics and vibration measuring instruments. Our goal is to provide advanced, precise, high-quality products at very reasonable prices. As the result of a substantial ongoing research program, Larson-Davis products provide versatility and automation untouched by *any* competitive offerings. Our growing product family includes:

- Portable multichannel Real-Time analyzers delivering 1/1, 1/3 and 1/12 octave bands to 125 KHz with future plug-in modules for FFT, acoustic intensity, memory expansion, etc.
- Underwater acoustic analysis equipment.
- Precision sound level meters with computer interfaces and automated control of 1/1 and 1/3 octave filters.
- Data logging noise dosimeters and hand-held sound level meters.
- Environmental and industrial noise monitoring systems.
- Building and architectural acoustics analyzers.
- Vibration measuring and monitoring instruments.
- Audiometric calibration instruments for speech and hearing.
- Network airport noise monitoring systems, with management planning software.
- Precision measuring microphones, preamplifiers, power supplies, instrumentation amplifiers, acoustic intensity probes, calibrators and accessories.

For more information contact the factory.



LARSON-DAVIS  
LABORATORIES

280 South Main  
Pleasant Grove, UT 84062  
801-785-6352 TELEX 705560

**Dalimare**

**Instruments Inc.**

**Yvon J. B. Larose**

Directeur général

FAX:

C.P. 110

Ste-Anne de Bellevue

(Québec) Canada H9X 3L4

(514) 453-0033

TELEX: 05-560502 - TO: 28218