

# Mesure et identification de réponses impulsionnelles acoustiques par NLMS-DC

M. Mekarzia<sup>1</sup>, M. Guerti<sup>2</sup>, A. Guessoum<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Departement d'Aéronautique, Université de Blida, Algérie

<sup>2</sup>Department d'Electronique, ENP El Harrach, Algérie

<sup>3</sup>Department d'Electronique, Université de Blida, Algérie

M\_mekarzia@yahoo.fr

## Résumé :

Dans ce travail, nous présentons les résultats pratiques de la réalisation d'un système de mesure de réponses impulsionnelles acoustiques. La réalisation du banc de mesure nous a permis de mesurer la réponse impulsionnelle acoustique d'une salle avec une dynamique de 48 dB avec la méthode d'identification par intercorrélation des signaux tests. Cette dernière s'est avérée meilleure que l'identification par l'algorithme du gradient stochastique à pas décroissant (NLMS-DC) surtout pour l'identification de réponses impulsionnelles dans les milieux bruités.

## Mots clés :

Réponse impulsionnelle, Canal acoustique, Intercorrélation, Algorithme adaptatif, Identification, Acoustique.

## 1. Introduction.

Les phénomènes acoustiques dans un milieu acoustique sont mesurés à partir de la notion du canal acoustique (fig.1) ce dernier dépend de trois éléments principaux :

- la forme et les propriétés acoustiques des murs et des objets de la salle.
- la source avec son diagramme d'émission spectrale et sa position (HP : haut-parleur).
- le récepteur avec son diagramme de directivité et sa position (MIC : microphone).

Dans l'approximation de l'acoustique linéaire ce canal est un filtre linéaire dont l'entrée est le signal  $x(t)$  et la sortie  $y(t)$  [1] :

$$y(t) = h(t) * x(t) \quad (1)$$

Où  $h(t)$  est la réponse impulsionnelle (RI) du canal acoustique.

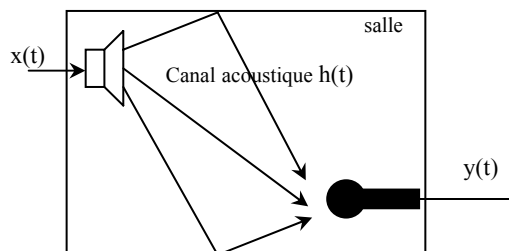


Figure 1 : Canal acoustique.

Le but de la mesure est de trouver la RI  $h(t)$  qui caractérise complètement le canal acoustique. En acoustique des salles, ces RI ont une durée de l'ordre de la seconde, la dynamique souhaitée est de l'ordre de 60 dB. La technique de mesure classique qui engendre une impulsion et enregistre la RI ne permet pas de répondre simultanément à toutes ces

exigences. De plus, le risque augmente considérablement lorsque les transducteurs (HP et MIC) sont soumis à des impulsions. Nous décrivons deux méthodes de mesure qui sont mieux adaptées aux exigences de la mesure des RI.

## 2. Principe de la mesure des RI.

L'organigramme général de la méthode de mesure est donnée sur la figure 2 l'élément essentiel de cette méthode est l'identification de la réponse impulsionnelle  $h(t)$  à partir des deux signaux  $x(t)$  et  $y(t)$ .

### 2.1 Identification par la méthode intercorrélation.

La fonction d'intercorrélation entre les signaux  $x(t)$  et  $y(t)$  s'écrit :

$$R_{YX}(\tau) = R_{XY}(\tau) * h(\tau) \quad (2)$$

Lorsque la fonction d'autocorrélation du signal d'entrée est proportionnelle à l'impulsion de Dirac, on a :

$$R_{yx}(\tau) = h(\tau) \sigma_x^2, \quad R_{xx}(\tau) = \sigma_x^2 \delta(\tau)$$

avec  $\sigma_x^2$  est l'énergie du signal  $x(t)$ .

Par conséquent, la RI s'obtient par un simple calcul de la fonction d'intercorrélation des signaux entrée-sortie. Pour la suite, on note  $x(n)$ ,  $y(n)$  et  $h(n)$  les versions échantillonnées, à la fréquence  $F_e$ , des signaux  $x(t)$ ,  $y(t)$  et  $h(t)$ .

En pratique, des signaux dont la fonction d'autocorrélation s'approche d'une distribution de Dirac sont les séquences binaires pseudo aléatoires (SBPA) [2]. Le signal d'excitation  $x(n)$  est construit à partir d'une séquence SPBA périodique de valeur 0 et 1 générée par un registre à décalage de  $m$  étages bouclé (fig.3). En choisissant convenablement la configuration du registre à décalage, on peut générer une séquence SPBA de longueur maximale de période  $L = 2^m - 1$ . Cette suite de 0 et 1 est ensuite convertie en crêteaux de  $\pm V$  volts. Le signal  $x(n)$  obtenu est périodique de période  $T = L / F_e$ .

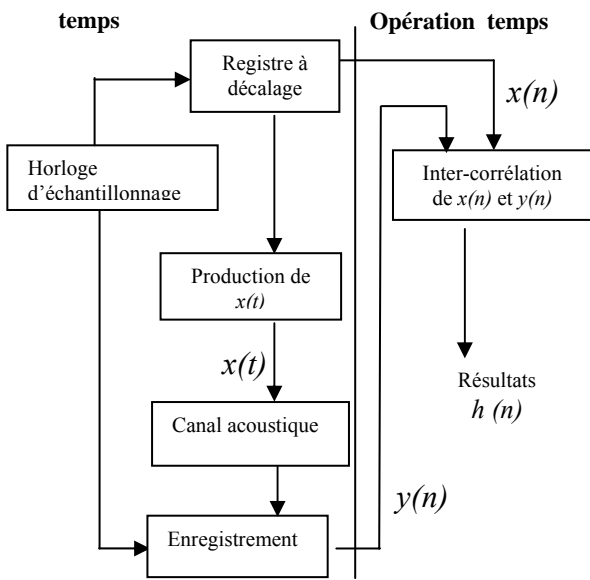


Figure 2: Organigramme de la méthode de mesure

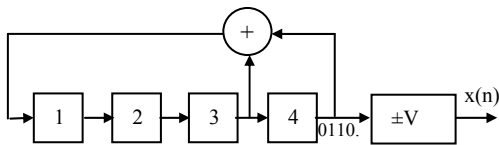


Figure 3 : Séquence SPBA maximale m=4

Le signal de sortie  $y(n)$  est en absence de bruit auditif, de même période que  $x(n)$ . La fonction d'inter corrélation  $R_{YX}(k)$ , étant de même période que  $x(n)$  et  $y(n)$ , peut se calculer sur une moyenne de plusieurs périodes  $L$  :

$$R_{YX}(k) = \frac{1}{pL} \sum_{n=1}^{pL} y(n)x(n-k) \quad (3)$$

où  $p$  désigne le nombre de périodes  $L$ . L'estimation de la réponse impulsionnelle est obtenue par la formule suivante :

$$R_{YX}(k) = \frac{R_{YX}(k)}{\sigma_x^2}, \quad k=1, \dots, N$$

où  $N$  est le nombre de points estimé. L'estimation de  $\sigma_x^2$  est donnée par :

$$\sigma_x^2 = \frac{1}{pL} \sum_{n=1}^{pL} x(n)^2 \quad (4)$$

Les paramètres dans cette méthode sont la longueur  $L$  de la séquence, le nombre  $p$  de périodes et la taille  $N$  de la RI identifiée.

## 2.2 Identification par algorithme du gradient stochastique.

Le système d'identification adaptatif de la RI est représenté sur la figure 4.

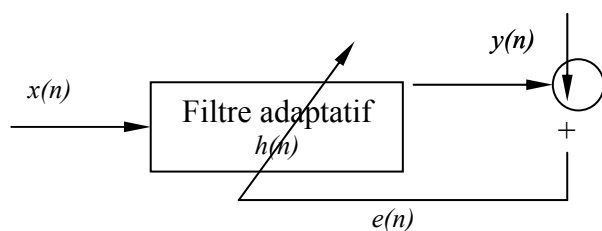


Figure 4 : Identification adaptative

L'erreur en sortie de ce système s'écrit :

$$e(n) = y(n) - H^T(n-t)X(n)$$

où  $H$  est un vecteur colonne qui regroupe les  $N$  premières valeurs de la réponse impulsionnelle identifiée et  $X(n)$  un vecteur qui résume le passé du signal :

$$X^T(n) = [x(n), x(n-1), \dots, x(n-N+1)]$$

La RI se calcule en minimisant l'erreur quadratique moyenne EQM :

$$EQM = E(e(n)^2)$$

La solution récursive de ce problème est donnée par l'algorithme du gradient stochastique normalisé (NLMS)[3] :

$$H(n) = H(n-1) + \frac{\alpha X(n)e(n)}{X^T(n)X(n)} \quad (6)$$

où  $0 < \alpha \leq 1$  est le pas d'adaptation de l'algorithme. Pour affaiblir l'erreur quadratique moyenne du régime permanent de l'algorithme, nous avons utilisé une version de l'algorithme NLMS à pas décroissant (NLMS-DC) vers 0 dont le pas d'adaptation est donnée par [2] :

$$\alpha = \begin{cases} 0.5 & \text{pour } n \leq \frac{n_x}{2} \\ \frac{0.5}{n - \frac{n_x}{2}} & \text{pour } n > \frac{n_x}{2} \end{cases}$$

où  $n_x$  désigne la taille totale en échantillons du signal  $x(n)$ .

Pour  $n \leq n_x/2$ , le choix du pas d'adaptation  $\alpha = 0.5$  permet une convergence rapide de l'algorithme. Après l'instant  $n_x/2$ , le pas décroissant vers zéro permet d'obtenir une erreur quadratique moyenne faible en régime permanent.

Dans cette méthode, le signal  $x(n)$  n'est pas obligatoirement une séquence SBPA. Par la suite pour permettre la comparaison, nous utilisons le même signal d'excitation  $x(n)$ .

## 3. Réalisation du banc de mesure.

Le banc de mesure que nous avons réalisé en pratique est illustré par le synoptique de la figure 5.

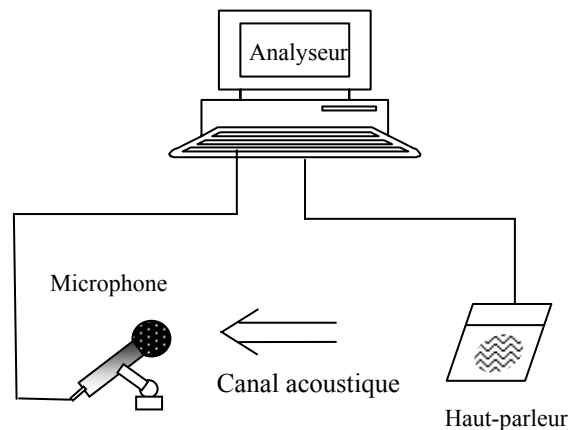


Figure 5: Schéma du banc de mesure

Le matériel utilisé dans le banc de mesure est décrit comme suit :

- Un analyseur de fréquence temps réel bicanal type (2133B&K) (B&K=Brüel & Kjær). nous avons utilisé cette analyse pour, d'une part, générer le signal d'excitation qui est un bruit blanc pseudo-aléatoire  $x(n)$  de bande de fréquence égale à 5KHz et d'amplitude 2volts efficace. D'autre part, cet analyseur permet l'acquisition en temps réel et en synchronisme avec l'excitation  $x(n)$  du signal de réponse de la salle  $y(n)$ .
- Un haut-parleur de type (4224B&K) transforme le signal d'excitation  $x(n)$  en une pression sonore qui sera diffusée dans la salle.
- Un microphone à bras rotatif type (3923B&K) qui permet de convertir les pressions acoustiques en signaux électriques exploitables sur l'analyseur de spectre. Le couple microphone – haut parleur définit le canal acoustique de la salle.
- Un sonomètre modulaire intégrateur de précision type (2131B&K) qui permet de mesurer le niveau du bruit ambiant existant dans la salle pendant la mesure[1].

La mesure de la réponse impulsionnelle du canal acoustique est effectuée en deux étapes :

- Acquisition en synchronisme des signaux  $x(n)$  avec le matériels décrits ci-dessus.
- Identification en temps déferé de la réponse impulsionnelle par les méthodes du gradient stochastique et la méthode d'intercorrélation.

### 3. Résultats expérimentaux.

Nous avons toujours utilisé le même analyseur de fréquence à deux canaux type (4224B&K) ainsi que le milieu acoustique (salle de mesure). Mais nous avons testés plusieurs couples de microphones /haut-parleurs.

Les dimensions de la salle utilisée sont : 8 mètres de largeur, 20mètres de longueur et de 3.5mètres de hauteur. Le critère de performance utilisé pour la comparaison entre les différentes mesures est le rapport signal sur le bruit (RSB) qui se calcul comme suit :

- Méthode d'intercorrélation : le RSB est calculé par le rapport de l'énergie du début de la RI sur l'énergie de la queue de la RI.
- Algorithme NLMS-DC : le RSB est calculé par le rapport de l'énergie du signal  $y(n)$  sur l'énergie du signal d'erreur.

#### 4-1 Influence du type de HP sur la mesure.

Dans cette manipulation, nous avons évalué l'effet du type de HP sur la mesure. Pour cela nous avons utilisés 3 types de HP, le premier est une source sonore professionnelle de type (4224 B&K), le deuxième est de marque (MICDIS de puissance 100w) et le troisième est de marque (TNGY de puissance 80w).

Les paramètres de la mesure sont :

- $x(n)$  est une séquence de bruit blanc (6 séquences de 1 seconde).
- La distance qui sépare le HP et le MIC est  $d=3$ mètres.

- Sensibilité de l'analyseur de fréquence est de 50mV/pa
- La réponse impulsionnelle identifiée et de taille 2500 points.

Les résultats de cette mesure sont résumés sur le tableau 1. Cette manipulation montre que l'utilisation d'un HP professionnel donne une identification de la réponse impulsionnelle meilleure que l'utilisation des HP grand public qui reproduisent mal les basses fréquences.

**Tableau 1** : Calcul de RSB (dB) de la mesure

Type de HP utilisé	RSB (dB)	
	Inter corrélation	NLMS-DC
HP TNGY 80w	46.68	32.00
HP MICDIS 100w	46.40	34.50
HP (4224 B&K)	47.67	45.00

#### 4-3 Influence de la distance (d) qui sépare le HP et le MIC sur la mesure.

Dans cette manipulation, nous avons évalué l'effet de la distance (d) qui sépare le HP et le MIC sur la mesure. Pour cela nous avons utilisé :

- Un HP type (4224B&K).
- Séquence du bruit blanc : 6 séquences pseudo-aléatoire d'une seconde.
- Un MIC type (4165 B&K)
- Sensibilité de l'analyseur de fréquence est 52mv/pa.
- Taille de la réponse impulsionnelle  $N=2500$ .

Les résultats de cette manipulation sont donnés sur le tableau 2. Lors de cette manipulation nous avons obtenu des résultats qui montrent que l'intercorrélation identifie la RI avec RSB constant pour toutes les distances.

Cela est due à sa robustesse au bruit. Par contre l'algorithme NLMS-DC identifie mieux la RI pour des distances petites ou le MIC ne reçoit que les ondes directes (grandes puissances) ce qui montre que cet algorithme est sensible au bruit.

**Tableau 2** : Calcul de RSB (dB) de la mesure

Distance d (mètre)	RSB (dB)	
	intercorrélation	NLMS-DC
$d = 1.5$	47.07	48.00
$d = 3$	47.67	45.00
$d = 6$	46.92	45.00

#### 4-2 Influence de la longueur de la séquence du bruit sur la mesure.

Nous avons évalué l'effet de la longueur de la séquence du bruit du signal d'excitation sur la mesure en utilisant les paramètres de mesure suivants :

- Un HP type (4224).
- Un MIC type (4165).
- Distance  $d = 3$  mètres.
- Sensibilité de l'analyseur de fréquence est 50mv/pa.
- Taille de la réponse impulsionnelle  $N = 2500$ .

Lors de cette manipulation nous avons obtenu des résultats qui montre qu'une meilleure mesure de la réponse impulsionnelle doit se faire avec un signal d'excitation  $x(n)$  représenté par une séquence de

bruit de durée importante (ordre d' une seconde) et de plusieurs périodes pour la méthode d'inter-corrélation.

L'identification par gradient stochastique n'exige pas une périodicité du signal d'excitation  $x(n)$  pour le tableau 3.

**Tableau 3** : Calcul de RSB (dB) de la mesure.

Séquence du bruit	RSB (dB)	
	Inter-corrélation	NLMS-DC
6s de 1s	47.67	45.00
3s de 2s	47.70	40.27
6s random	34.32	37.00

### Conclusion.

Nous avons réalisé un banc de mesure de réponse impulsionnelle acoustique utilisant du matériel acoustique professionnel ( matériel Brüel & Kjaer). Les réponses impulsionnelles pratiques obtenues ont une dynamique moyenne de 48 dB. Les mêmes mesures ont été effectuée avec deux cartes (cartes SoundBlaster), la dynamique de la mesure dans ce cas ne dépasse pas 10 dB.

La réalisation de ce banc de mesure nous a permis aussi de conclure que la méthode d'inter-corrélation identifie mieux les réponses impulsionnelles acoustiques dans les milieux bruités que l'algorithme du gradient stochastique à pas décroissant.

Ces résultats peuvent être améliorés en prenant plus de précautions pour minimiser l'effet du bruit ambiant présent dans la salle durant la mesure.

### Références.

[1] Guy-Bart Stan, Jean-Jacques Embrechts, Dominique Archambeau, " Comparison of different impulse response measurement techniques" , Journal of the Audio Engineering Society 50 (2002), no. 4, 249–262.

[2] Thierry Le Pollès, "Modelling of the diffuse fields in architectural acoustics by the transport theory. Application to the urban environment", LCPC Nantes, University of Maine, April 8, 2003.

[3] A. Benallal, "Study of fast RLS algorithms and application to the identification of acoustic Impulses response", Phd thesis, Rennes 1988.

[4] G. IRI Dejan, A. Miroslava Miloevic, "Transient noise influence in MLS measurement of room impulse response", Acta Acustica United with Acustica 91 (2005), no. 1, 110–120.

[5] S. Müller, P. Massarani, "Transfer-function measurement with sweeps ", Journal of The Audio Engineering Society 49 (2001), no. 6, 443–471.

[6] M. Rajih et P. Comon. "Alternating Least Squares Identification of Under-Determined Mixtures Based on the Characteristic Function", in ICASSP'06, Toulouse, France, May 2006.

[7] R. Zgheib , G. Fleury, E.Lahalle, "A new fast algorithm for simultaneous identification and optimal reconstruction of non stationary AR processes with missing observations", 12th Digital Signal Processing Workshop, pp. 371-376, Grand Teton National Park (USA), September 24-27, 2006.

[8] E.Lahalle, J.Oksman, "Real-time LMS identification of CAR models", IEEE 5th International Conference on Information, Communication & Signal Processing, pp. 381-384, Bangkok (Thailand), December 6-9, 2005.

[9] M. Mekarzia, "Measure and identification of the acoustic Impulse responses", Master thesis, University of Blida 2000.

[10] Analyzer of the frequencies real time 2123/ 2133 instruction, vol. 2 use Brüel& Kajaer 1991.

[11] Loudspeaker 4224 Data Brüel & Kajaer 1991.

[12] Condenser Microphone and Microphone preamplifier for acoustic measurement, "Data Handbook" Brüel & Kajaer 1992.

[13] L. Albera, P. Comon, P. Chevalier, et A. Ferreol. "Blind Identifcation of Underdetermined Mixtures based on the Hexacovariance", in ICASSP'04, vol. 40, pages 29\_32, Montreal, Canada, May 2004.

[14] Angelo Farina, "Simultaneous measurement of impulse response and distortion with a swept-sine technique ", 108th Convention of the AES (2000).

[15] Swen Müller and Paulo Massarani, "Transfer-function measurement with sweeps", Journal of The Audio Engineering Society 49 (2001), no. 6, 443–471.

[16] A. Khouaja. " Modelisation and Identification Systems Non-linear using Models of Volterra with Reduced Complexity ". Thesis of doctorate, University of Nice-Sophia Antipolis, May 2005.