

Analyse statistique d'un ensemble de théâtres et salles de concert parisiens

Jean-Dominique Polack, Fabio Leão Figueiredo, S. Liu

Université Pierre et Marie Curie
Institut Jean Le Rond d'Alembert
11, rue de Lourmel
75015 Paris
France
E-mail : jean-dominique.polack@upmc.fr

Résumé

Au cours de l'année 2009, le groupe d'acoustique des salles de l'équipe LAM (Lutherie, Acoustique, Musique) de l'Institut Jean Le Rond d'Alembert à l'Université Pierre et Marie Curie a effectué une série de mesures acoustiques dans quatorze salles de concert parisiennes qui proposent des concepts architecturaux très différents. Elles ont été choisies pour leur importance historique, architecturale, ou acoustique. Les mesures ont été effectuées dans les salles vides et occupées, et une analyse statistique complète a été menée pour caractériser la base de données ainsi obtenue. Cet article décrit brièvement le protocole, avant de présenter l'analyse statistique. Les résultats obtenus donnent un nouvel éclairage sur la structure des mesures acoustiques dans les salles.

Abstract

During the year of 2009, the room acoustics group of the LAM (Équipe Lutherie, Acoustique, Musique) at Institut Jean Le Rond d'Alembert - Université Pierre et Marie Curie, Paris) performed a series of acoustical measurements in music halls in Paris. The halls were chosen in regarding their importance to the historic, architectural or acoustic domains. The measured ensemble of fourteen rooms includes quite different architectural designs. The measurements were made both in empty and in occupied rooms, and a comprehensive series of statistical analysis was carried out to fully characterize the database thus obtained. The presentation briefly describes the protocol, then moves on to the statistical analysis. The results obtained draw new insight into the structure of room acoustical measurements, and will be compared with results from the literature.



u cours de l'année 2009, le groupe d'acoustique des salles de l'équipe LAM (Lutherie, Acoustique, Musique) de l'Institut Jean Le Rond d'Alembert à l'Université Pierre et Marie Curie a effectué une série de mesures acoustiques dans quatorze salles de concert parisiennes. Les salles et les théâtres avaient été sélectionnés pour leur intérêt historique, architectural ou acoustique.

Un protocole systématique a été mis en place pour vérifier des procédures de mesure en acoustique des salles. Nous avons déjà publié l'étude de l'influence sur les indices acoustiques de directivités différentes de source, de configurations acoustiques différentes des salles, et de la pré-égalisation du signal d'excitation [4]. Par conséquent, la présente publication est consacrée à l'analyse statistique des indices acoustiques mesurés, afin d'évaluer la pertinence des indices de la norme ISO 3382 [5].

Le matériel de mesure

La source

Le matériel de mesure se compose d'une source sonore dodécaédrique (Outline GSR), et d'un caisson de basse (Tannoy Power VS10) connecté à la source, tous deux connectés à leur amplificateur.

À sa fréquence de fonctionnement, le rayonnement de caisson de basses est omnidirectionnel. Il en est de même pour le dodécaèdre jusqu'à l'octave 1 kHz (Figure 1).

Toutefois, aux fréquences plus élevées, la directivité s'écarte de l'omnidirectionnalité, mais les variations restent inférieures à 5 dB dans la bande d'octave la plus haute considérée par la norme ISO 3382 (Figure 1).

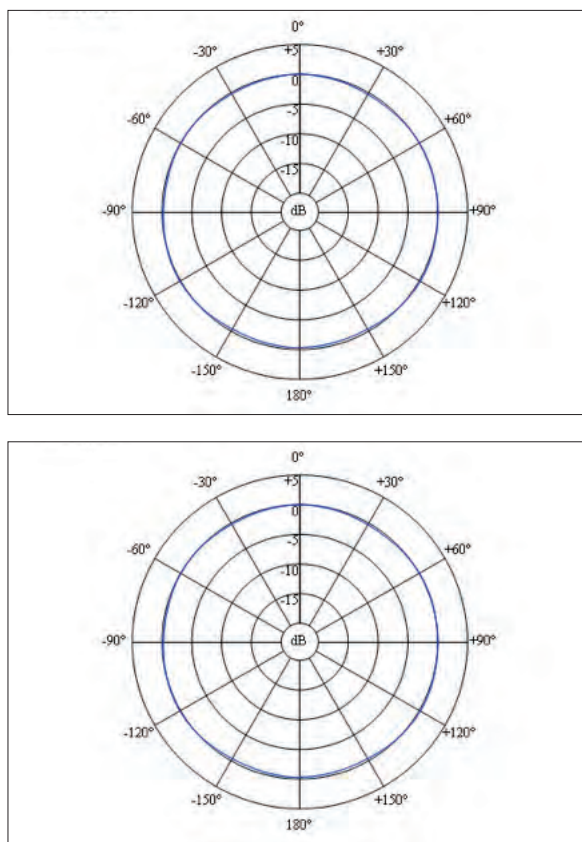


Fig. 1 : Réponse polaire de la source à 1 kHz et 4 kHz
Polar responses of the source at 1kHz and 4kHz

Le microphone

Toutes les mesures ont été effectuées avec un microphone Ambisonics SoundField ST 250, connecté à une carte son multicanale pilotée par un ordinateur portable.

Le microphone Soundfield contient quatre capsules infracardioides montées en tétraèdre. En combinant les signaux de sortie des quatre capsules, un microphone de pression et trois microphones à gradient de pression, orientés à angle droit les uns par rapport aux autres, peuvent être reconstitués. Ce signal à quatre canaux est connu sous le nom de B-Format Ambisonics.

La figure 2 présente les réponses en pression du microphone de pression (tracé supérieur) et des microphones gradient (tracé inférieur) reconstituées à partir de la SoundField ST250. La réponse du microphone omnidirectionnel est constante à moins de 1dB de 60 Hz à 4 kHz, et la réponse du microphone en figure-de-huit à ± 1 dB dans la même gamme de fréquence et même jusqu'à 2 kHz.

Le signal

Un sinus glissant exponentiel a été utilisé pour le signal d'excitation, car il permet une élimination a posteriori des distorsions harmoniques de la source sonore, tout en autorisant un rapport de signal-bruit efficace [3,7]. Il a été enregistré et traité avec les plug-ins Aurora, développés par Angelo Farina de l'Université de Parme.

Le sinus glissant est généré de 20 Hz à 20 kHz en 30 secondes. Une durée relativement longue a été choisie parce que le rapport signal-bruit est proportionnel au temps de balayage.

La figure 3 présente le spectre du sinus glissant mesuré dans la grande chambre anéchoïque du LNE (tracé supérieur) ainsi que le spectre du signal compensé (tracé intermédiaire). La figure 3 montre que la compensation permet de corriger le signal sur une large bande, de 60 Hz à 5,5 kHz, c'est-à-dire pour la bande couverte par la norme ISO 3382 [5]. Cependant, le post traitement permet de prolonger la bande passante de 40 Hz à 18 kHz, au prix d'une légère réduction du niveau (tracé inférieur de la figure 3). Cette bande passante supplémentaire n'est nécessaire que pour l'auralisation, mais pas pour mesurer les indices.

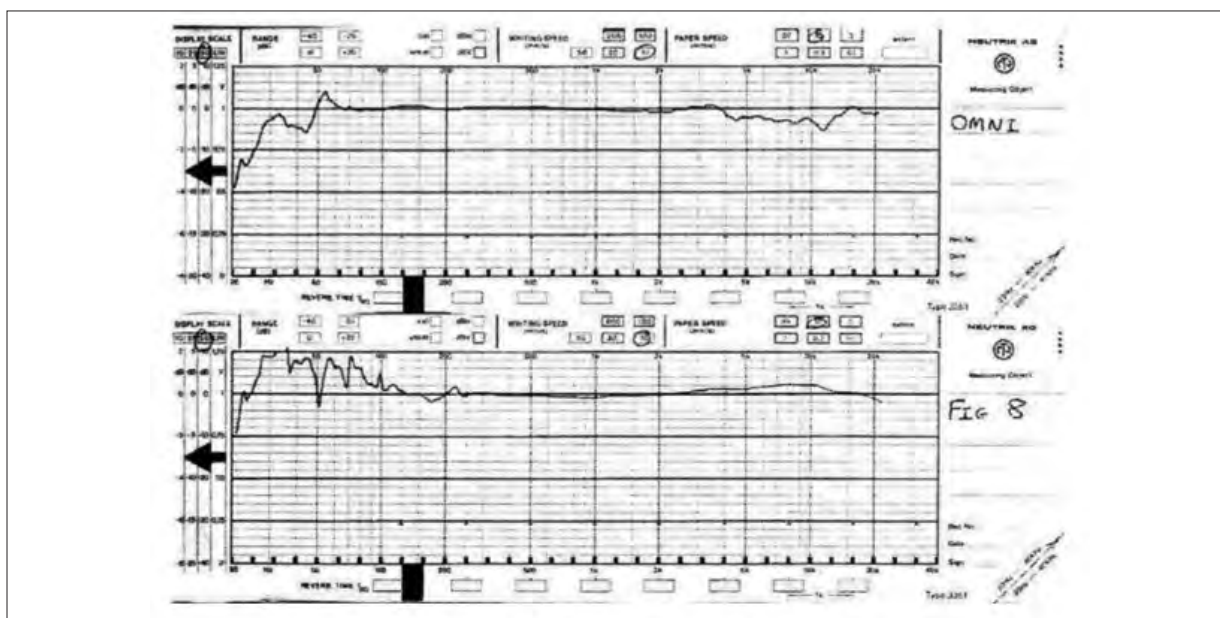


Fig. 2 : Réponses de microphone ST250
Responses of ST250 microphone

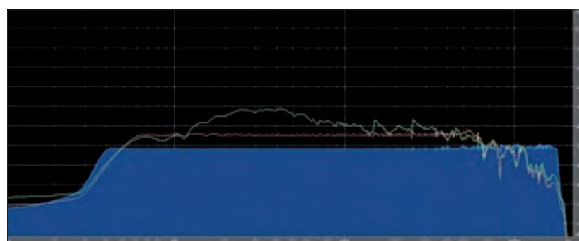


Fig. 3 : Spectre du signal original et des deux étapes de la compensation
Original spectrum of the signal and the two steps of compensation

Pour toutes les mesures, seul le signal compensé a été émis dans les salles, puisque nous sommes seulement intéressés par les indices.

Le protocole de mesure

Les 16 salles

Les salles ont été sélectionnées pour leur intérêt historique, mais également architectural et acoustique.

	Volume (m3)	Sièges	Abbr.
Théâtre des Abbesses	4 500	396	ABE
Théâtre de l'Athénée	3 366		ATH
Opéra Bastille	26 000		BAS
Chapelle Royale de Versailles	14 400		CHP
Théâtre du Châtelet		2 300	CHT
Cité de la Musique	13 400	1 200	CIT
Salle Cortot	2 580	400	COR
Opéra Garnier			GAR
Maison de la Culture du Japon	6 300	400	JAP
Auditorium du Louvre	4 500		LOU
Théâtre de la Porte Saint Martin		1 000	MAR
Auditorium du Musée d'Orsay	1 700	347	ORS
Salle Pleyel	17 800		PLE
Maison de Radio France	10 000		RAD
Théâtre du Ranelagh	1 920		RAN
Théâtre de la Ville	5 120	1 012	VIL

Tabl. 1 : Les 16 salles
The 16 halls

Comme notre but n'était pas d'évaluer l'excellence acoustique, mais plutôt les critères acoustiques, nous avons cherché un ensemble représentatif de salles avec une large gamme de caractéristiques telles que le volume, la forme, les matériaux des murs, le nombre de sièges et l'usage artistique.

Le tableau 1 répertorie les 16 salles sélectionnées pour la campagne, ainsi que leur volume et leur nombre de sièges. Elle indique également les abréviations utilisées pour y faire référence.

Les positions de mesure

Dans chaque salle à l'exception des salles plus petites, dix positions de microphone ont été retenues, comme indiqué dans la norme ISO 3382, en essayant de préserver une distribution standard des positions tout en respectant les contraintes physiques de chaque salle. En conséquence, les positions de microphone ont été sélectionnées selon le schéma suivant :

- Positions 'a', 'b' et 'c' sur l'axe longitudinal central ('a' la plus proche et 'c' la plus éloignée de la scène).
- Positions 'd' et 'e' sur l'axe longitudinal latéral ('d' plus proche et 'e' plus loin de la scène).
- Positions 'f' et 'h' sur l'axe longitudinal central, respectivement au premier et au deuxième balcon.
- Positions 'g' et 'j' sur les côtés du premier et du deuxième balcon, respectivement.

D'autres positions ont été utilisées à l'occasion, selon les spécificités architecturales des salles. En ce qui concerne la source, elle a été placée au centre de la scène. Pour les positions de microphone de l'axe longitudinal, des positions gauche et droit de la source (LR) ont également été utilisées.

Les indices et leur distribution

Les indices

Pour chaque position de mesure, un ensemble d'indices a été calculé suivant la liste recommandée par la norme ISO 3382 [5]. Ils sont donnés dans le tableau 2.

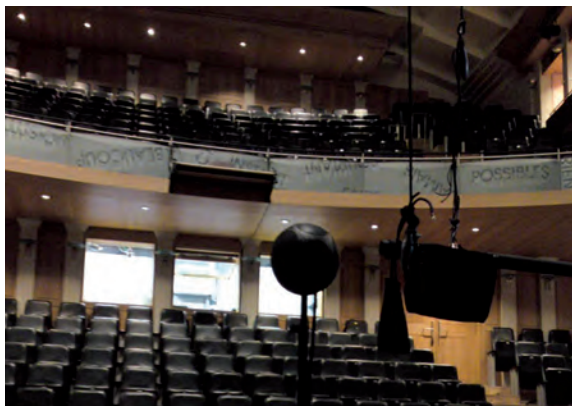
Indices	Formules
T30 (s)	$\frac{2,11 \cdot (-35 \text{ dB}) - (-5 \text{ dB})}{E(t) = \int_0^t p^2(\tau) d\tau}$
EDT (s)	$\frac{5,11 \cdot (-10 \text{ dB}) - (-5 \text{ dB})}{E(t) = \int_0^t p^2(\tau) d\tau}$
Ts (ms)	$\left[\int_0^t t \cdot p^2(t) dt / \int_0^t p^2(t) dt \right]$
G (dB)	$10 \log \left[\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt / \int_0^{\infty} p^2(t) dt \right]$
C80 (dB)	$10 \log \left[\int_0^{80 \text{ ms}} p^2(t) dt / \int_{80 \text{ ms}}^{\infty} p^2(t) dt \right]$
LF	$\left[\int_{200 \text{ Hz}}^{8000 \text{ Hz}} p^2(t) dt / \int_0^{\infty} p^2(t) dt \right]$

Tabl. 2 : Les indices
The indices

Des indices supplémentaires ont été également calculés, tels que le rapport de basses BR (rapport entre le temps moyen de réverbération à 125 Hz et 500 Hz, et le temps moyen de réverbération à 500 Hz et 1 kHz) et le rapport d'aigus TR (rapport entre le temps moyen de réverbération à 2 kHz et 4 kHz, et le temps moyen de réverbération à 500 Hz et 1 kHz). Tous deux ont été introduits par Beranek [2].



Théâtre de la Ville, Paris



Salle Cortot, Paris



Salle Pleyel, Paris



Maison de la Culture du Japon, Paris



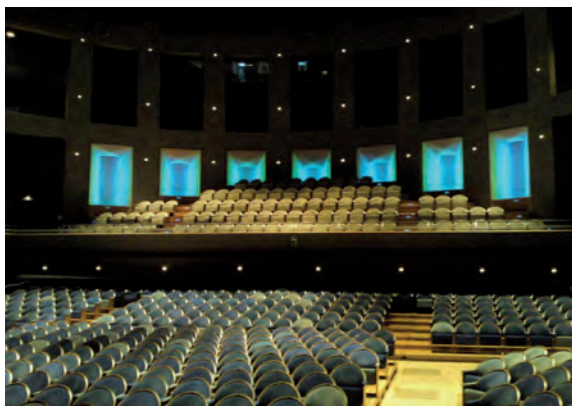
Auditorium du Louvre, Paris



Théâtre du Châtelet, Paris



Opéra Bastille, Paris



Cité de la Musique, Paris, photos Fábio Leão Figueiredo

Distributions

Suite aux recommandations de Bech et Zakharov [1], nous avons tout d'abord vérifié la distribution de tous les indices, pour chaque bande d'octave. Les figures 4 et 5 présentent deux exemples, pour les valeurs moyennes sur toutes les bandes d'octave des deux indices C80 et T30.

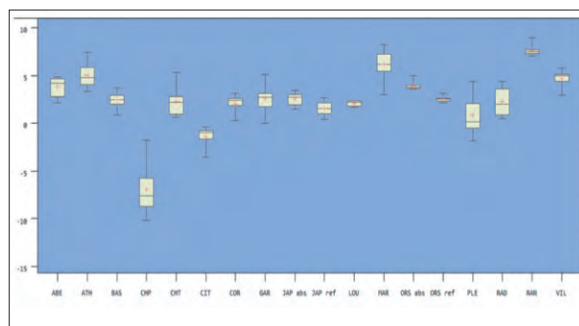


Fig. 4 : Boîtes à moustaches pour le C80 moyen
Box plots for mean C80

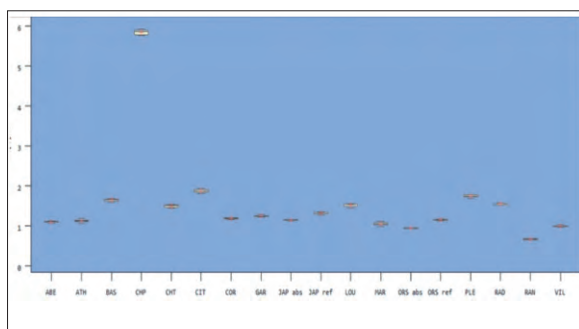


Fig. 5 : Boîtes à moustaches pour le T30 moyen
Box plots for mean T30

La plupart des boîtes à moustaches sont similaires à celle de la figure 4 : elles présentent des variations importantes pour une même salle, et un fort chevauchement pour différentes salles. Par contre, le temps de réverbération T30 se comporte différemment car sa valeur est remarquablement constante pour une même salle (Figure 5). Cependant, les temps de réverbération peuvent être similaires pour différentes salles, même si leurs tailles et leurs types sont très différents comme c'est le cas pour l'Opéra Garnier et la Salle Cortot. En conséquence, un seul indice ne suffit pas à caractériser une salle, et l'ensemble de tous les indices est nécessaire à leur classification.

Analyse descriptive des données

Si l'on retient tous les indices mesurés pour toutes les bandes d'octave, un total de 55 valeurs est obtenu pour chaque position de mesures dans chaque salle. Un tel ensemble de données et sa grande dimensionnalité posent un défi à la visualisation et à l'analyse.

Comme la visualisation est impossible au-delà de quelques dimensions, l'ensemble des données doit être réduit.

Mais même en regroupant tous les résultats des différentes octaves en une seule valeur moyenne pour chaque indice, cela réduit seulement l'ensemble des données à 13 dimensions, ce qui est encore trop pour la visualisation. En conséquence, il faut faire appel à l'analyse descriptive des données.

Toutes les méthodes d'analyse descriptive des données ont en commun de projeter les données sur un repère orthonormal, obtenu itérativement par sélection à chaque étape de la direction de l'extension maximale de l'ensemble de données, puis réduction de la dimension en considérant l'espace orthogonal.

Partitionnement des données

L'analyse en clusters est une méthode de partitionnement qui vise à diviser un ensemble de données en plusieurs groupes homogènes afin que les données de chaque sous-ensemble partagent des caractéristiques communes. Ces caractéristiques correspondent généralement à des critères de proximité (similitude) qui sont définies par l'introduction de mesures de distance et de classes entre les objets [9]. Pour obtenir la bonne partition, il faut simultanément :

- minimiser les différences intra-classes pour obtenir des groupes aussi homogènes que possible,
- maximiser les différences inter-classes.

Les k-means sont une méthode itérative de classification. On spécifie le nombre k de groupes à obtenir, les calculs sont répétés plusieurs fois, et la solution optimale est sélectionnée. La première itération commence par choisir, au hasard ou non, k objets qui représentent les centres des k classes. Les distances entre tous les objets et les k centres sont alors calculées et les objets sont agrégés au centre le plus proche. L'étape suivante consiste à redéfinir les centres de chaque classe en prenant leur barycentre. Plusieurs itérations sont nécessaires pour atteindre la convergence.

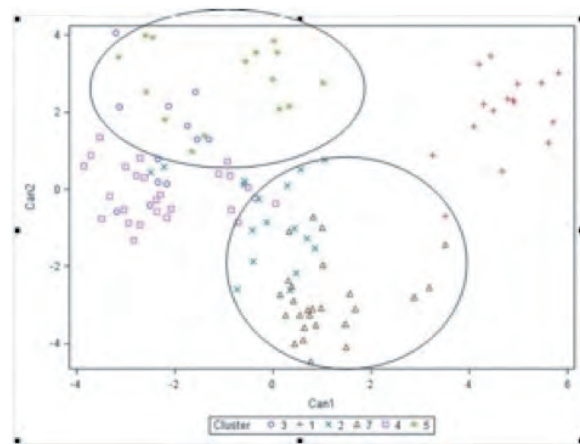


Fig. 6 : Les deux premiers axes de discrimination canonique pour le partitionnement en 7 classes
First two axes of canonical discriminations for clustering in 7 classes

La figure 6 présente les clusters obtenus pour une analyse en 6 classes, projetée sur le plan défini par les deux premiers axes de discrimination canonique, c'est-à-dire les combinaisons linéaires des 10 variables standardisées qui maximisent le rapport entre la variation inter-groupe et la variation intra-groupe des 6 classes.

En réalité, nous avons commencé avec 7 classes, mais la classe 6, correspondant seulement à la Chapelle Royale, est très loin des autres en raison du temps de réverbération élevé (voir Figure 5). C'est pourquoi la classe 6 n'apparaît pas sur la figure 6. Deux groupes de deux classes se chevauchent sur la figure 6 : les classes 2 et 7 ; et les classes 3 et 5. Elles sont signalées par des ellipses. Nous avons finalement décidé de combiner ces classes, pour obtenir 5 catégories correspondant à : théâtres de taille moyenne ; salles d'opéra ; auditoriums de taille moyenne ; salles de concert ; la Chapelle Royale.

Le résultat intéressant est que l'analyse en clusters des données de la mesure conduit à une classification qui correspond à la typologie traditionnelle des salles. Cela prouve la pertinence de notre corpus de salles, ainsi que la pertinence des indicateurs choisis pour caractériser les salles de concert. De plus, nous avons constaté que la discrimination des classes est maximale sur les indices T30, Ts et C80.

Analyse de corrélation

Afin d'examiner s'il existe un lien entre deux ensembles de données x et y , nous pouvons représenter chaque observation i comme un point de coordonnées (x_i, y_i) dans un repère cartésien. La forme du nuage ainsi obtenu révèle l'existence ou non de corrélation. Dans les deux premiers tracés de la figure 7, les données sont concentrées le long d'une des diagonales, correspondant à une relation linéaire entre les deux indices ; la précision de l'ajustement de la relation linéaire est mesurée par la dispersion autour de la ligne, ou par le coefficient de détermination R carré, qui atteint des valeurs proches de 1 lorsque la dispersion est petite. En revanche, la dispersion est grande, et R est petit, lorsque les données sont dispersées comme dans le dernier tracé de la figure 7.

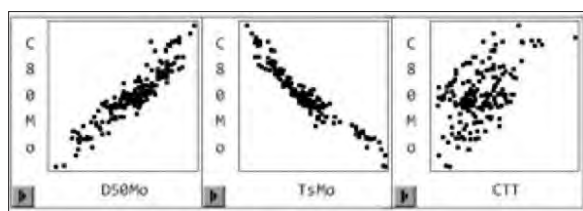


Fig. 7 : Exemples de corrélations entre indices
Examples of correlations between indices

R-carré	notre étude	Pelorsen	Jullien
T30 x EDT	0,91	0,65	0,93
T30 x C80	- 0,78	- 0,53	- 0,74
T30 x Ts	0,85	0,55	0,90
EDT x C80	- 0,82	- 0,91	- 0,88
EDT x Ts	0,84	0,94	0,98
C80 x Ts	- 0,95	- 0,95	- 0,91

Tabl. 3: Principales corrélations
Main correlations

Le tableau 3 donne les principales corrélations entre indices observées dans notre base de données et les compare avec les résultats de la littérature [6,8].

Il est évident que les résultats sont similaires, à l'exception des corrélations avec T30 dans l'étude de Pelorsen [8]. La différence réside probablement dans les différences entre les protocoles de mesure : les positions de mesure ont été choisies au hasard par Pelorsen, mais pas par Jullien qui a utilisé une grille systématique semblable à la nôtre mais plus complète.

Le principal résultat de l'analyse de corrélation est de confirmer les liens étroits entre les indices T30, Ts et C80 révélés par l'analyse en clusters.

Analyse en composantes principales

L'idée sous-jacente à l'analyse en composantes principales (ACP) est de rendre compte de la variance observée dans un nuage de données en limitant le nombre de composantes, définies comme de simples transformations mathématiques des variables initiales.

Une analyse en composantes principales (ACP) a été effectuée pour un grand nombre d'ensembles d'indices, y compris leurs valeurs par octave. La figure 8 présente les valeurs moyennes par octave des indices dans le plan constitué par les deux composantes principales. Chacun des 13 indices est représenté sur cette figure par un point, et la direction et la distance de l'origine du repère au point indiquent la contribution de chaque indice aux deux composantes principales.

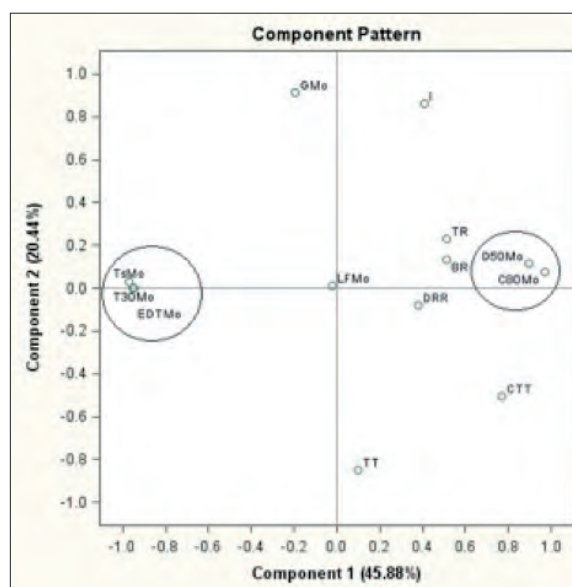


Fig. 8 : ACP pour la valeur moyenne des indices sur toutes les octaves
PCA for mean octave values of the indices

On voit sur la figure 8 que le groupe formé par T30, EDT, Ts et C80 contribue fortement à la première composante. Comme cette première composante représente 46 % de la variance des données, ces indices interviennent au premier plan pour expliquer notre base de données. Ce résultat est en accord avec le fait que les mêmes indices constituent les variables principales de discrimination pour l'analyse en clusters (voir Section 4.1). L'indice G contribue à la deuxième composante, qui représente

20,5 % de la variance. L'ACP complète révèle que la troisième composante représente 12,5 % de la variance, et la quatrième composante 9 %. Donc quatre composantes suffisent à expliquer 88 % de la variance de notre base de données.

La figure 8 permet également de visualiser les corrélations entre indices : les indices proches les uns des autres, ou symétriques par rapport à l'origine, sont fortement corrélés. Ainsi, des indices distants mais symétriques comme Ts et C80 sont fortement (et négativement) corrélés. C'est une autre façon d'observer les corrélations obtenues aux sections 4.1 et 4.2.

Les deux premières composantes principales de l'ACP pour notre ensemble complet de salles sont très semblables à celles que Pelorson a obtenu par ACP pour son ensemble de salles [8]. Nous estimons donc que nos résultats s'appliquent par extrapolation à tout ensemble représentatif d'un grand nombre de salles. Cependant, l'ACP d'une salle particulière peut donner des résultats très différents, comme le montre le même Pelorson.

[8] X. Pelorson, J.P. Vian, J.D. Polack, "On the variability of room acoustical parameters: reproductibility and statistical validity", *Applied Acoustics* 37, 175-198 (1992)

[9] G. Saporta, *Probabilités, analyse des données et statistique*, Ed. Technip (1990)

Conclusion

L'analyse statistique présentée dans cet article et sa comparaison avec des analyses semblables, tend à prouver que notre base de données est représentative de la diversité des salles de concerts et théâtres connus dans la littérature : les composantes principales sont les mêmes. Cette conclusion valide nos principes de sélection des salles, ainsi que le protocole de mesure conçu pour la présente étude. Enfin, la présente étude valide les indices recommandés par la norme ISO 3382, dans la mesure où ces indices permettent de discriminer notre corpus des salles.

Remerciements

Les auteurs remercient la direction de toutes les salles pour leur avoir donné l'autorisation d'y effectuer des mesures acoustiques. Ils remercient également Jacques Poitevineau pour ses fructueux conseils concernant l'analyse statistique. Ce travail fait partie d'une thèse de doctorat soutenue par la "Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES)" du Ministère de l'Éducation du Brésil.

Références bibliographiques

- [1] S. Bech, N. Zakharov, *Perceptual, audio, evaluation, Theory, method and application*, Wiley, Chichester, (2006)
- [2] L.L. Beranek, *Concert and Opera Halls. How they sound*, Acoustical Society of America, New York (1996)
- [3] A. Farina, P. Fausti, R. Pompili, "Measurements in opera houses: comparison between different techniques and equipment." *Proc. of ICA98 - International Conference on Acoustics*, Seattle (1998)
- [4] F. Leao Figueiredo, J.D. Polack, "Variations on acoustical measurement procedures and their influence on acoustical parameters", *ISRA 2010*, Melbourne (2010)
- [5] ISO 3382 Acoustics, *Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters* (1997)
- [6] J.P. Jullien, "Structured model for the representation and the control of room acoustical quality, *Int. Congr. Acoustics*, Trondheim, Norway (1995)
- [7] S. Müller and P. Massarani, "Transfer Function Measurements with Sweeps", *Journal of the Audio Engineering Society* 49(6), 443 (2001)