HAL
open science

L'acoustique de l'église de Souvigny 30 ans après

H Dujourdy, J. P Espitia Hurtado, L Quartier, J.-D Polack

To cite this version:

H Dujourdy, J. P Espitia Hurtado, L Quartier, J.-D Polack. L'acoustique de l'église de Souvigny 30 ans après. 12ème Congrès Français d'Acoustique (CFA 2014), Société Française d'Acoustique, Apr 2014, Poitiers, France. pp.1267-1273. hal-01304208

HAL Id: hal-01304208

https://hal.science/hal-01304208

Submitted on 19 Apr 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

L'acoustique de l'église de Souvigny 30 ans après

H. Dujourdy[a], J.P. Espitia Hurtado[a], L. Quartier[b] et J.-D. Polack[a]
[a]LAM - D'Alembert, 11, rue de Lourmel, 75015 Paris, France
[b]IJLRDA, équipe LAM - UPMC - CNRS (UMR 7190), 11, rue de Lourmel, 75015 Paris, France
dujourdy@lam.jussieu.fr

En avril 1983, Émile Leipp a réalisé des mesures acoustiques dans l'église prieurale de Souvigny, à l'occasion du bicentenaire des orgues de François Henri Clicquot, les seules à être parvenues sans modification jusqu'à notre époque avec celles de la cathédrale de Poitiers. Malheureusement, cette église a subit une rénovation intérieure en 2010, où l'enduit de la nef et des bas-côtés a été rénové et recouvert d'une peinture acrylique. Depuis, les organistes se plaignent que l'acoustique a été modifiée. En octobre 2013, nous avons eu l'occasion de réaliser de nouvelles mesures acoustiques dans la même église, en plaçant sources et microphones aux mêmes emplacements qu'Émile Leipp. Nous comparerons les résultats de Leipp avec les nôtres, et expliquerons comment la peinture peut modifier l'acoustique d'une église, une plainte à laquelle le laboratoire a souvent été confronté sans jamais jusqu'à maintenant pouvoir y apporter de réponse documentée.

1 Introduction

A l'occasion du bicentenaire de l'orgue de Souvigny, en 1983, Émile Leipp a effectué les premiers relevés acoustiques de l'église. Ils sont basés sur des mesures de niveau sonore et analyses des décroissances à partir d'une source émettant du bruit rose. L'ensemble de la méthode de mesure est intégrée dans un plan de recherche imaginé dès 1975 pour décrire la qualité acoustique des lieux existants [Lei78], lors du constat que l'acoustique des salles ne s'est pas améliorée depuis les bases scientifiques posées par Lachez [Lac79] et Sabine [Sab15]. En 2013, suite aux travaux de rénovation dans l'église, de nouvelles mesures ont été réalisées par l'équipe Lutherie, Acoustique et Musique de l'institut Jean le Rond d'Alembert. Dans cet article, nous détaillons la méthode de mesure de Leipp et la comparons avec celle d'aujourd'hui. Ensuite, nous interprétons les résultats et établissons un diagnostique de l'état actuel de l'acoustique interne d'un point de vue musical et architectural par rapport à 2013.

2 L'église et son orgue

L'église prieurale Saint-Pierre et Saint-Paul de Souvigny, située dans le Bourbonnais, dans le département de l'Allier, est composée de cinq nefs flanquées de doubles collatéraux, six travées, deux transepts, le cœur et son déambulatoire. D'une longueur de 84 mètres et d'une largeur de 28 mètres sous une voûte aux nervures ouvragées à 17 mètres de hauteur, elle renferme les tombeaux des Bourbons, la Chapelle Vieille (1375), la Chapelle Neuve (1448) et la Sacristie (1769). Historiquement l'église de Souvigny, située aux confins de quatre provinces (l'Auvergne, le Berry, le Nivernais et la Bourgogne), est érigée au Xeme siècle.

Parmi les nombreuses personnalités qui viendront à Souvigny, Mayeul de Provence y meurt en 994. Il est canonisé et les pèlerins viendront vénérer son tombeau. Ensuite, l'église est reconstruite, puis plusieurs modifications seront entreprises jusqu'à Dom Geoffroy Chollet, prieur de Souvigny de 1424 à 1454, qui s'attachera à la restaurer. Elle sera peu modifiée jusqu'à aujourd'hui et constitue une représentation harmonieuse des styles du XIeme au XVIIIeme siècle.

Symbole du Bourbonais, l'église contient également un témoin prestigieux de l'époque classique, le plus ancien orgue François-Henri Clicquot, manufacturé de 1783 sous le règne de Louis XVI. Il est, avec son grand frère de la cathédrale de Poitiers (1790), le seul témoin intégralement conservé du grand facteur. Mondialement connu pour la subtilité de sa mécanique, l'éclat de ses anches – trompettes, clairon, cromorne, hautbois, voix humaine – rend idéalement le répertoire baroque français et la littérature de la fin du XVIIIeme siècle. Érigé sur la tribune occidentale, il a la particularité d'avoir traversé les ans sans transformation : en 1887, l'orgue est haussé d'un ton, en 1960 on installe une turbine électrique et, en 1977, on lui restitue trois soufflets cunéiformes.

Suite à de récents travaux de rénovation dans l'église de Souvigny, le crépi a été refait à neuf et recouvert d'une peinture acrylique sur les parois de la nef et des bas-côtés jusqu'au transept. Les organistes se plaignent depuis d'une modification de l'acoustique de l'église et des mesures ont été menées afin d'établir un diagnostique de l'acoustique interne.

3 Méthode de Leipp

3.1 Présentation

La méthode de Leipp, aboutie en 1981, consistait à diffuser un signal normalisé en divers points sources à l'aide d'un haut parleur autonome DSM NAGRA, et à l'enregistrer à des positions d'écoute sur magnétophone SNN NAGRA monophonique omnidirectionnel en relevant le niveau en dB(C) à l'aide d'un sonomètre General Radio. Ce matériel a été choisi pour son autonomie, sa qualité et son faible encombrement. Les points de mesure étaient décidés en se basant sur l'expérience des utilisateurs pour trouver les plus intéressants. Pour chaque position source-récepteur, on enregistrait dans un premier temps une séquence longue de 15 secondes de bruit rose en continu puis une séquence courte de 2 secondes et enfin 10 à 20 secondes de bruit de fond : le signal de longue durée servait à analyser la densité spectrale et le signal court les décroissances énergétiques. Le traitement des données s'effectuait au laboratoire à l'aide d'un magnétophone ISN NAGRA et consistait à diffuser la séquence longue à travers un décibelmètre intégrateur et un filtre d'octave modèle Bruel and Kjaer 2218. Le niveau de cette séquence était mesuré en dB linéaires en calibrant le niveau grâce au sonomètre GR mesurant le niveau à l'enregistrement in situ. Le signal diffusé était enregistré à l'aide d'un enregistreur de niveau Bruel and Kjaer 2306 utilisé avec les réglages suivants : vitesse papier 30 mm/s, vitesse crayon 250 mm/s.

Les outils de mesures et de dépouillement ont fait l'objet d'un travail de sélection permettant le traitement de données et le calcul particulier des critères acoustiques établis par E. Leipp. Les mesures de décroissance d'énergie pouvaient aussi être effectuées avec un dispositif d'émission de bruit impulsionnel, en l'occurrence une clapette en bois (figure 1). Ceci permettait de rapidement déceler la présence d'écho.

La manipulation était effectuée pour chaque bande

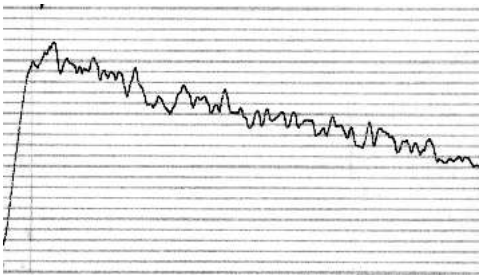

FIGURE 1 – Tracé de la décroissance de l'énergie mesurée avec une clapette en bois dans l'église de Souvigny (de Leipp, position E1-S1, octave 1 kHz)

d'octave centrée sur 63 Hz à 16 kHz et le niveau était relevé en dB(C) et porté sur la fiche caractéristique du lieu testé. Le dépouillement consistait à relever les 4 critères principaux :

- **La densité spectrale**, qui décrit la modulation du spectre aux différents points de mesures par rapport à une référence de la source mesurée à 1 mètre en chambre sourde.
- **Le traînage** est la durée pendant laquelle le son passe du niveau maximum au niveau de bruit de fond après arrêt de la source. Il est mesuré par la distance LH sur le modèle de la figure 2.
- **Le pouvoir séparateur** qui détermine la netteté des messages. Il est définit par le nombre d'événements sonores élémentaires (syllabes, notes musicales, etc.) nettement discernables par seconde. E. Leipp suggère que la durée minimale séparant deux événements sonores discernables est le temps que met le son à décroitre de 5 dB dans une salle. Le pourvoir séparateur est donc donné par l'inverse de ce temps pris à partir de l'interruption brusque de la source. Il est caractérisé par la mesure de LE sur le modèle de la figure 2.
- **L'inertie** est liée à l'attaque des sons : c'est l'inverse du temps nécessaire pour que le son atteigne 10 dB au dessous de son niveau maximum à partir du niveau de bruit de fond, c'est à dire après la mise en marche de la source. Il est mesuré par la distance OR sur le modèle de la figure 2.

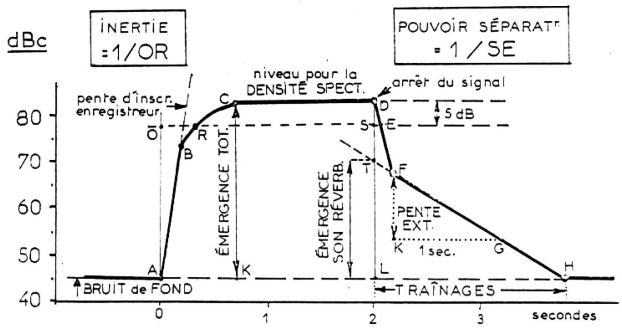

FIGURE 2 – Modèle d'une courbe de décroissance : description des calculs des critères objectifs de Leipp, d'après [Lei78]

Ces éléments sont interprétés en fonction de l'usage, de l'architecture du lieu et de la position source-récepteur et consignés dans un rapport de mesure.

3.2 Discussion

Leipp avait mis sur pied cette méthodologie propre après avoir préalablement étudié les protocoles de mesures utilisés par ses contemporains. Il était au fait du manque de correspondance entre le temps de réverbération de Sabine et la qualité acoustique des salles. Il connaissait les résultats des recherches effectuées en psychoacoustique par Beranek dans les années 50 [Ber62], puis par Wilkens dans les années 70 [WP75], en passant par les groupes de Göttingen et de Dresde concernant les messages sonores musicaux. Il avait lu les résumés de Jordan [Jor69] sur l'évolution des critères objectifs et leur corrélation avec l'impression d'écoute, comme l'atteste les archives du laboratoire.

La méthode Leipp, descriptive et basée sur l'expérience, diffère des principes de la caractérisation de l'acoustique des salles établis jusqu'alors. Malheureusement, la faible sensibilité de l'équipement utilisé et la non répétition dans des conditions similaires (afin de vérifier ce qui est stable de ce qui relève du bruit) ne permet pas l'utilisation de certains de ses critères dans un cadre comparatif avec nos mesures. En particulier, les fluctuations de la source empêchent la mesure d'une décroissance inférieure à 5 dB. La thèse de P. Jouenne [Jou92] dont nous nous sommes inspirés pour l'étude de la méthode de mesure de E. Leipp rend compte de ces états de fait. Enfin, la méthode Leipp n'est pas prescriptive : elle ne permet pas d'établir une correction acoustique.

4 Méthode de mesure 2013

Les mesures effectuées par le laboratoire en 2013 ainsi que le post traitement ont été menés avec les mêmes instruments et le même matériel que pour de précédentes compagnes [LFPD10]. Le matériel de mesure acoustique était constitué essentiellement d'un ordinateur portable, d'une carte son avec 8 canaux numériquement contrôlés, d'un microphone Ambisonics B-format (premier ordre) SoundField ST250 [Ger85], d'une source sonore dodécaédrique Outline GRS et d'un caisson de graves Tannoy Power VS10.

La technique d'obtention des réponses impulsionnelles utilisée a été celle de l'émission d'un sinus glissant exponentiel et la déconvolution du signal enregistré par l'inverse du signal émis, car cette technique est reconnue comme la plus efficace en ce qui concerne l'élimination des distorsions harmoniques de la source sonore et le rapport signal/bruit [FF98], [MM01]. Le résultat de cette déconvolution est une réponse impulsionnelle de la salle, et nous pouvons calculer les indices selon la norme ISO 3382 [ISO00].

La partie calcul des indices acoustique des salles a été traitée à l'aide du logiciel MIDAS [PMMD90].

Le sinus glissant exponentiel utilisé pour les mesure balaye les fréquences de 22 Hz à 22 kHz en 30 secondes avec une fréquence d'échantillonnage de 44100 Hz. Une durée longue a été choisie car le rapport signal sur bruit est proportionnel au temps de balayage.

Le signal était joué sur un canal et enregistré sur 5 canaux (1 canal correspondant à la pression, 3 canaux correspondant aux gradients de pression dans les trois axes de l'espace et 1 canal calibré pour le calcul de la force sonore G), ce qui nous donne 5 réponses impulsionnelles par position

source-récepteur. Nous avons fait les enregistrements avec un microphone Ambisonics B-format car ce travail rentre dans le cadre d'une étude générale des salles [LFPD10].

Les positions choisies de la source et du microphone (figure 3) sont les mêmes que celles des mesures effectuées par Émile Leipp en 1983 :

3 positions sources,

- S1 : orgue - au dessus du narthex.
- S2 : autel.
- S3 : chaire.

12 positions de réception, de E1 à E9, plus trois positions bis dans les bas côtés de la nef.

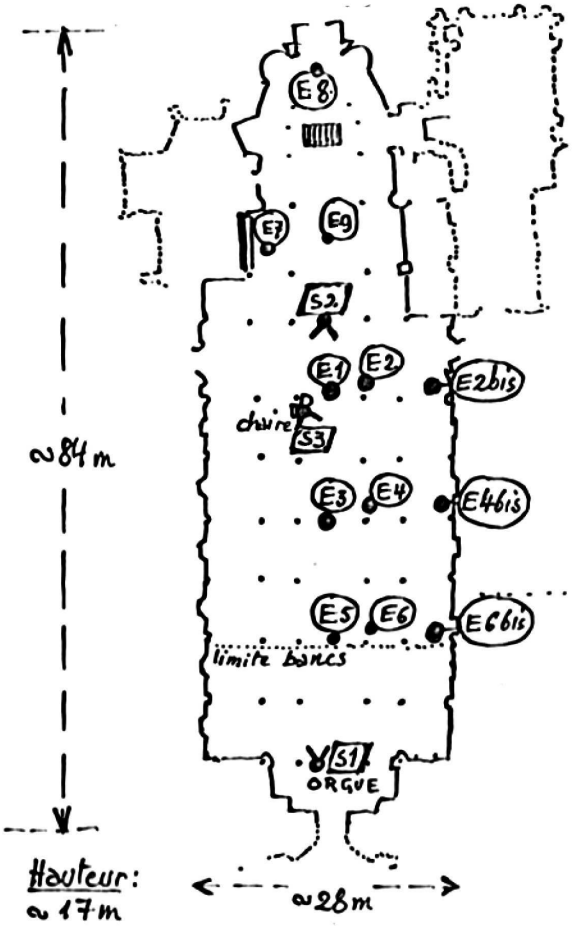

FIGURE 3 – Positions source-récepteur lors des mesures effectuées par E. Leipp dans l'église de Souvigny et reprises pour les mesures de 2013

5 Résultats

Les durées de réverbérations présentés dans le tableau 1 ont augmenté suite à la rénovation dans les bandes d'octaves centrées sur les fréquences basses pour toutes les positions source-récepteur. Les durées de réverbérations ont augmenté dans une moindre mesure dans les fréquences moyennes et peu dans les hautes fréquences. L'absorption importante due à l'air dans les médiums et hautes fréquences en est la raison. La forme de la courbe, que ce soit avant ou après rénovation, montre que plus les fréquences sont élevées plus l'absorption due à l'air est grande dans les volumes importants tels que celui de l'église de Souvigny. On remarque que les temps de réverbération mesurés en 1983 présentent quelques fluctuations dues à la méthode utilisée par Leipp. On peut néanmoins apprécier la tendance générale. Notamment, la mesure permet de montrer que les durées de réverbérations ont augmenté de 30% en moyenne pour toutes les positions sources S1 et S2 sur les bandes d'octaves allant de 63 Hz à 8 kHz.

Les mesures effectuées position S3 présentent des variations des temps de réverbération plus importantes qu'ailleurs pour toutes les bandes d'octave avec une variation globale d'environ 40%.

On note que les temps de réverbération ne sont pas différents que l'on se place dans la nef ou dans le déambulatoire. Pourtant cette dernière partie n'a pas été modifiée lors de la rénovation. Ceci s'explique par le fait que dans un champ diffus, le temps de réverbération est homogène et indépendant de la position de mesure.

Les durées de réverbérations augmentent. En conséquence nous regardons le pouvoir séparateur qui par construction est équivalent à EDT.

Comme énoncé ci-dessus, Jouenne [Jou92] a montré que le pouvoir séparateur calculé sur une décroissance de 5 dB était incompatible avec les fluctuations présentes sur les courbes de décroissances (dus à l'utilisation d'un générateur de bruit rose). C'est pourquoi nous avons repris les mesures de Leipp sur la même plage de 5 dB et évalué l'incertitude de mesure en mesurant la pente maximale et la pente minimale (figure 4).

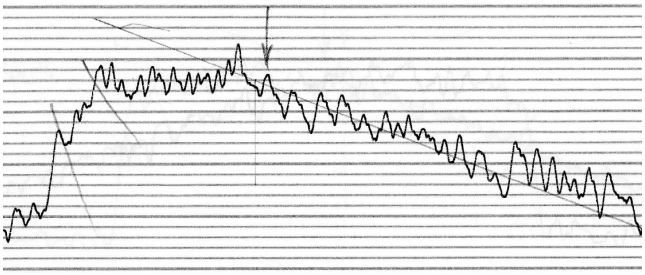

FIGURE 4 – Tracé de la décroissance de l'énergie dans l'église de Souvigny (de Leipp, position S1-E3, octave 125 Hz). L'arrêt de la source est indiqué par une flèche. On peut observer la pente de la décroissance

Tableau 1 – Résultats en seconde et comparaison en % de variation des durées de réverbérations avant et après rénovation dans l'église de Souvigny

Bande d'octave Position		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S1-E1	1983	6.7	6.6	5.8	5.6	5.3	4.4	2.8	1.9
	2013	8.1	8.5	7.9	7.5	6.4	5.2	3.5	2.0
	Var.	20	28	37	34	20	18	25	4
S1-E2	1983	9.0	5.8	5.1	6.5	4.9	4.4	3.4	2.8
	2013	8.3	8.2	8.1	7.4	7.4	6.3	3.6	2.0
	Var.	-7	41	59	14	51	44	5	-28
S1-E8	1983	7.8	7.0	7.0	6.3	5.8	4.7	3.4	2.6
	2013	8.4	8.5	7.9	7.4	6.6	5.2	3.6	2.1
	Var.	8	21	13	18	13	11	7	-18
S2-E1	1983	4.0	4.0	5.0	5.0	4.7	4.0	2.6	1.6
	2013	8.1	8.3	7.7	7.2	6.3	5.0	3.1	1.6
	Var.	103	107	54	44	35	25	18	1
S3-E1	1983	5.3	3.8	5.0	4.9	4.6	3.7	2.2	1.4
	2013	8.2	8.5	7.4	7.1	6.1	4.8	2.8	1.5
	Var.	55	124	48	46	33	29	29	9
Moy. S1-S2	1983	7.1	5.8	5.7	5.6	5.0	4.2	2.9	2.2
	2013	8.4	8.4	7.9	7.3	6.5	5.2	3.4	1.9
	Var.	18	44	40	32	31	24	17	-13
Écart-type de la variation		44	48	18	15	15	12	11	16

Tableau 2 – Résultats et comparaison en % de variation des pouvoirs séparateurs calculés sur une décroissance de 10 dB avant et après rénovation dans l'église de Souvigny

Bande d'octave Position		63 Hz	125 Hz	250 Hz	500 Hz	1 kHz	2 kHz	4 kHz	8 kHz
S1-E1	1983	0.9	0.9	1.9	1.1	1.2	1.6	2.1	3.4
	2013	0.8	0.7	0.7	0.7	0,8	1.1	1.7	2.9
	Var.	-18	-26	-63	-32	-28	-33	-21	-14
S1-E2	1983	0.7	1.1	1.2	1.0	1.3	1.4	1.8	–
	2013	0.7	0.6	0.7	0.7	0.8	1.0	1.5	2.6
	Var.	5	-43	-41	-29	-35	-29	-16	–
S1-E8	1983	0.8	0.9	0.9	1.0	1.1	1.3	1.7	2.3
	2013	0.7	0.6	0.6	0.7	0.7	0.9	1.4	2.8
	Var.	-20	-29	-34	-29	-34	-32	-16	-21
S2-E1	1983	1.5	1.4	1.2	1.2	1.3	1.5	2.4	3.7
	2013	0.9	1.1	1.0	1.1	1.4	1.7	2.7	4.7
	Var.	-43	-23	-14	-8	5	16	11	26
Moy. S1-S2	1983	0.9	1.1	1.2	1.1	1.3	1.5	2.2	3.3
	2013	0.7	0.8	0.8	0.8	1	1.2	1.9	3.4
	Var.	-22	-30	-32	-25	-22	-18	-12	5
Écart-type de la variation		19	9	20	11	19	23	14	–

La comparaison des valeurs de Leipp aux nôtres est présentée figure 5. La figure montre bien une tendance similaire mais la différence est importante et l'incertitude est élevée. De plus, les résultats de Leipp sont systématiquement hors du champ de variation. Ceci peut s'expliquer par le fait que Leipp mesurait la décroissance à partir de la bosse finale jusqu'à l'arrêt du signal, alors que nous la mesurons à partir de la valeur moyenne du signal avant arrêt.

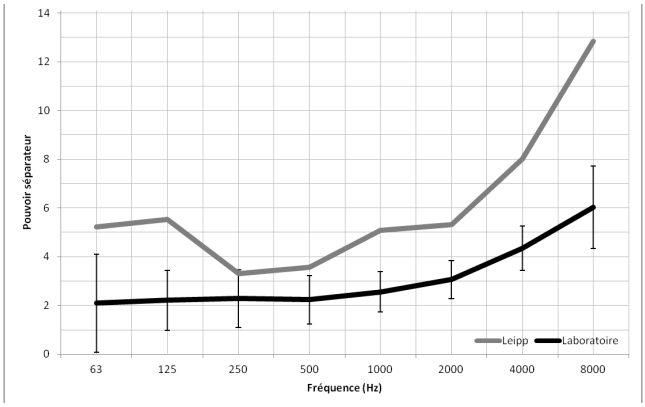

Figure 5 – Moyenne des pouvoirs séparateurs positions S1 et S2 dans l'église de Souvigny : comparaison des dépouillements par Leipp et le laboratoire à partir des mêmes courbes

Conformément à la recommandation de Jouenne, nous avons préféré évaluer les pouvoirs séparateurs sur une décroissance de 10 dB. La figure 6 montre une bonne corrélation entre les deux mesures, avec une diminution systématique du pouvoir séparateur.

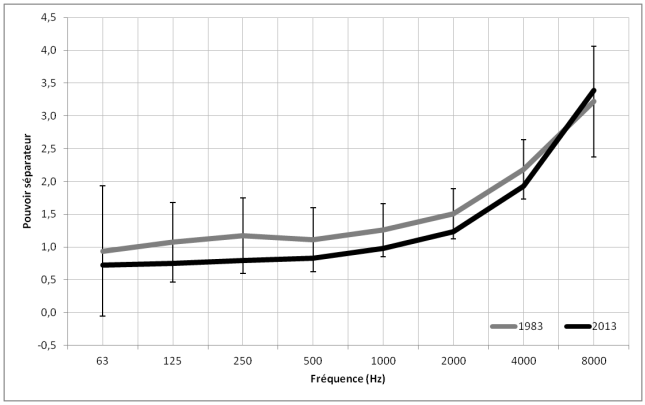

Figure 6 – Moyenne des pouvoirs séparateurs positions S1 et S2 calculés sur 10 dB dans l'église de Souvigny : comparaison entre 1983 et 2013

le tableau 2 présente le pouvoir séparateur en quelques positions de mesures et sa valeur moyenne. Le pouvoir séparateur présente une diminution comparable à l'augmentation de la durée de réverbération. On mesure une diminution de 20% en moyenne sur les positions S1 et S2 sur les bandes d'octaves centrées sur 63 Hz à 8 kHz. Comme pour la durée de réverbération, la variation est plus importante dans les basses fréquences avec plus de 30% de variation à 250 Hz. Elle diminue progressivement à environ 20% à 1 kHz et atteint 0% à 8 kHz.

Cette diminution est valable pour toutes les positions de mesures si bien que, même si la différence entre 1983 et 2013 n'apparaît pas significative sur la figure 6 au regard de l'incertitude, le biais reste systématique, et donc significatif.

On remarque que cette variation est plus importante pour S1 que pour S2, avec une tendance similaire mais 3 à 4 fois plus importante : la variation moyenne sur les bandes d'octaves centrées sur 63 Hz à 8 kHz est d'environ 7% pour S2 et 25% pour S1. La différence de variation du pouvoir séparateur calculé sur une décroissance de 10 dB entre S1 et S2 s'explique par la différence d'éloignement des sources. Lorsque l'on fait varier l'absorption surfacique, la décroissance d'énergie enregistrée sur 10 dB varie de manière moins importante pour une source éloignée que pour une source proche car le champ acoustique engendré est y plus homogène et moins sensible aux variation. Au contraire pour un couple source-récepteur proche soumis à un champ direct plus intense, le pouvoir séparateur est plus grand et la variation plus sensible.

6 Commentaires

Le choix du matériel et la méthode de mesure de E. Leipp jettent un doute sur les résultats des mesures, particulièrement en ce qui concerne le filtrage et le moyennage des décroissance de l'énergie. Certains critères non répétables n'ont pu être validés aujourd'hui pour l'étude comparative. Nous avons conservé l'indice de pouvoir séparateur car il donne une idée de l'intelligibilité mais nous l'estimons néanmoins sur une décroissance de 10 dB faute de pouvoir obtenir des valeurs fiables sur une décroissance de 5 dB. D'autres indices d'intelligibilité donnent des indications plus précises que le pouvoir séparateur, bien que des études montrent qu'une décroissance de 5 dB peut être corrélée avec la mesure du RASTI [Mig92]. Seul le TR30 permet de comparer directement les résultats. Enfin, les caractéristiques de la source sonore ne sont pas étudiées et empêchent de conclure rigoureusement sur les résultats obtenus par E. Leipp dans l'église de Souvigny.

7 Conclusion

Nous avons présenté la comparaison des résultats des mesures qui ont eu lieu dans l'église de Souvigny en 1983 et en 2013. La rénovation de l'enduit et l'application d'une peinture acrylique dans l'église de Souvigny ont modifié les durées de réverbération et le pouvoir séparateur dans le sens d'une augmentation du premier et d'une diminution du deuxième. Ces variations vont dans le sens inverse d'une amélioration de l'intelligibilité du message transmis. Dans le cas particulier de l'orgue, l'évolution de l'acoustique interne a augmenté l'impression de flou acoustique particulièrement dans les basses et moyennes fréquences. L'éloignement important entre l'instrument et l'auditoire augmente encore cet effet.

La variation des indices acoustiques des salles mesurée est imputable aux modifications des surfaces internes de l'édifice. Les mesures dans les parties non modifiées du bâtiment présentent les mêmes variations et conforte l'hypothèse que le champ acoustique est diffus dans tout l'espace. Une cartographie acoustique pouvait l'expliquer plus précisément.

Enfin, la variation moins importante dans les hautes fréquences s'explique par l'absorption acoustique de l'air

qui devient très significative dans les grands espaces. Il serait néanmoins intéressant de vérifier l'influence de la peinture aux hautes fréquences dans un espace plus réduit concerné par des modifications identiques. La peinture acrylique présente en effet une surface lisse, ce qui devrait diminuer d'autant plus l'absorption dans les hautes fréquences, phénomène que nous n'avons pas pu constater dans l'église de Souvigny.

Remerciements

Ce travail est en partie supporté par IMPÉDANCE S.A.S., 80 Domaine de Montvoisin - 91400 Gometz-la-Ville - France.

Références

[Ber62] Leo L. Beranek. *Music, Acoustic and Architecture*. New-York, john wiley and son edition, 1962.

[FF98] Patrizio Fausti and Angelo Farina. Acoustic measurements in opera houses : comparison between different techniques and equipment. In *Internationnal conférence on Acoustics*, Seattle (WA), June 1998.

[Ger85] Michael Gerzon. Ambisonic in multichannel broadcasting and video. *Journal of the Audio Engineering Society*, 33 :859–871, 1985.

[ISO00] ISO. 3382 acoustique "Mesurages de la durée de réverbération des salles en référence à d'autres paramètres acoustiques", 2000.

[Jor69] Vilhelm Lassen Jordan. Room acoustics and architectural acoustics development in recent years. *Applied Acouslics, Vol. 2(1) (1969), 59 - 81*, 1969.

[Jou92] Philippe Jouenne. *Caractérisation de la qualité acoustique des lieux d'écoute, adaptation et automatisation de la méthode Leipp, analyse et validation*. PhD thesis, Université Pierre et Marie Curie, 1992.

[Lac79] Théodore Lachez. Acoustique et optique des salles de réunions. *Chez l'auteur*, 1879.

[Lei78] Emile Leipp. La qualité acoustique des lieux d'écoute. *Bulletin du groupe d'acoustique musicale No. 99*, 1978.

[LFPD10] Fabio Leao Figueiredo, Jean Dominique Polack, and Hugo Dujourdy. Salles à l'acoustique variable : étude de cas à paris. In *10ème Congres Francais d'Acoustique*, Lyon, 2010.

[Mig92] J. G. Migneron. Utilisation de l'indice rasti et du temps de réverbération initial pour l'analyse des problèmes d'acoustique architecturale. *Le Journal de Physique IV*, 02(C1) :C1–135–C1–138, April 1992.

[MM01] Swen Müller and Paulo Massarani. Transfer-function measurement with sweeps. *Journal of the Audio Engineering Society*, 49(6) :443–471, 2001.

[PMMD90] J. D. Polack, X. Meynial, A. H. Marshall, and G. Dodd. Evaluation assistée par ordinateur de l'acoustique des salles dès le stade de la conception : le logiciel MIDAS. *Le Journal de Physique Colloques*, 51(C2) :C2–1105–C2–1108, February 1990.

[Sab15] Wallace Clement Sabine. Collected parpers on acoustic. 1915.

[WP75] A. Wilkens and G. Plenge. The correlation between subjective and objective data of concert halls. *Auditorium Acoustics. R. Mackenzie Applied Science Publisher*, 1975.