

10ème Congrès Français d'Acoustique

Lyon, 12-16 Avril 2010

Champs direct et réverbéré dans les espaces dévolus à la musique

François Aballéa¹, Philippe Martin², Pierre-Jean René², Mario Rossi³

¹ LEMA, Ecole Polytechnique Fédérale-Lausanne, CH-1015 Lausanne, Suisse, francois.aballea@epfl.ch

² AER sàrl, rue de l'Ale 25, CH-1003 Lausanne, Suisse, pmartin@a-e-r.ch

³ rue Cité-derrière 8, CH-1015 Lausanne, Suisse, m.rossi.1@bluewin.ch

L'importance relative des champs acoustiques direct et réverbéré est fondamentale pour la qualité d'écoute dans les espaces consacrés à la musique. A témoin, les indices acoustiques de clarté C de Alim, de définition D de Thiele, de rapport signal sur bruit de Lochner et Burger, etc.

De fait, dans les édifices religieux existants et accueillant des concerts de musique sacrée avec chœur, solistes et orchestre, il n'est guère possible de déduire de la mesure de ces indices la disposition et les positions optimales des exécutants. Le plus souvent diverses contingences sans rapport avec les critères d'écoute dictent les choix.

La comparaison expérimentale du champ réverbéré dans différentes configurations a montré que celui-ci dépendait beaucoup plus qu'admis par les modèles simples déduits des lois de Sabine et que cela n'était pas sans conséquence pour les conditions d'écoute, notamment relativement aux réflexions précoces, car cela implique une dépendance des distances critiques en fonction de la position des musiciens et chanteurs.

Cela revêt une importance particulière dans la Cathédrale de Lausanne : en effet une assistance électroacoustique y crée des pseudo-réflexions précoces – sans cette dernière la clarté, l'intimité et la présence sont notoirement insuffisantes – dont les amplitudes relatives ont été planifiées en fonction du champ réverbéré. Ce dernier est simplement caractérisé par des spectres en 1/1 octave, ou simplement par les niveaux globaux, en fonction de la position d'une source de puissance acoustique de référence.

1 Introduction

L'origine de cette étude expérimentale se trouve dans la problématique générale de mise en oeuvre optimale d'une assistance électroacoustique pour chœurs et solistes lyriques telle qu'installée dans la cathédrale de Lausanne. Le principe de cette assistance a été présenté au CFA02 à Lille [1]. Depuis, elle a été mise en place lors de la réalisation d'une nouvelle estrade de concert et est utilisée par pratiquement tous les concerts de musique sacrée ou profane – plus de 50 à ce jour – avec la participation et le suivi du quatrième auteur. Les intéressés en trouveront une description complète, y compris les motivations psychoacoustiques dans l'ouvrage [2].

En raison de différentes contingences, d'ordre pratique et économique, il a été proposé de déplacer l'estrade de concert de la croisée du transept au chœur, donc de prévoir non seulement le déplacement des systèmes de microphones, mais surtout la reprogrammation des amplitudes et dispersions des pseudo réflexions. Si l'opération était simple en ce qui concerne les retards – à l'aide de relevés d'échogrammes – ce n'a pas du tout été le cas pour les amplitudes. Cette situation a contraint à procéder par réglages successifs des gains de chaque voie, comme lors de la première mise en fonctionnement de l'assistance. De manière surprenante, les gains finaux étaient nettement plus élevés que ce qui était prévisible.

Dans l'idée d'en déterminer les raisons, et surtout de déterminer les emplacements les plus favorables et ceux préjudiciables, on a entrepris une expérimentation systématique. A l'écoute et sur la base d'échogrammes, il était évident que le champ réverbéré était en cause. Il devait être plus élevé, obligeant ainsi à augmenter les contributions précoces de manière à rétablir un bon rapport entre contributions précoces et tardives.

L'acoustique de Sabine ne considère qu'un modèle très simple de calcul du champ réverbéré valable en première

approximation, ne faisant bien entendu pas intervenir les positions ni des sources ni des observateurs [2]. Il existe certes des méthodes complexes et lourdes en calculs pour s'atteler à ce type de problème, mais la question était d'ordre pratique : il fallait une réponse dans les plus brefs délais !

De simples mesures du niveau réverbéré à l'aide d'un sonomètre intégrateur avec analyse en bande d'octave en des emplacements représentatifs du public ont permis d'objectiver la situation. Ces mesures ont eu lieu avant ou après un concert ou une manifestation – avec des emplacements à chaque fois différents pour les chœurs, les solistes et les accompagnateurs (orchestre de chambre le plus souvent).

2 Expérimentation

Elle a consisté à mesurer les niveaux dans les nefs pour une puissance acoustique de référence (90 dB re 1 pW en bruit rose) dans toutes les situations expérimentées. On disposait d'un sonomètre NOR140 et d'une source de puissance B&K. Le traitement des données s'est effectué « at home ».

Les plans de situation des Figures 1 à 3 donnent schématiquement les emplacements de la source de puissance (lettre A, B, C et D) et ceux d'observation pour chaque campagne de mesure (15.01.09, 04.02.09 et 15.12.09). Ces derniers se situent entre les piliers libres ou engagés de la Cathédrale, dans la nef principale et les latérales (ils sont repérés par un chiffre – rang du pilier des nefs – et une lettre désignant la nef N, C ou S). Un emplacement particulier DG se trouve dans le déambulatoire devant un gisant ; évidemment, il n'y a jamais d'auditeur en ce point, mais comme il n'y a pratiquement pas de champ direct ni de réflexions précoces, il est bien représentatif du champ réverbéré. Selon la présence ou non d'une estrade et d'un podium, la source se

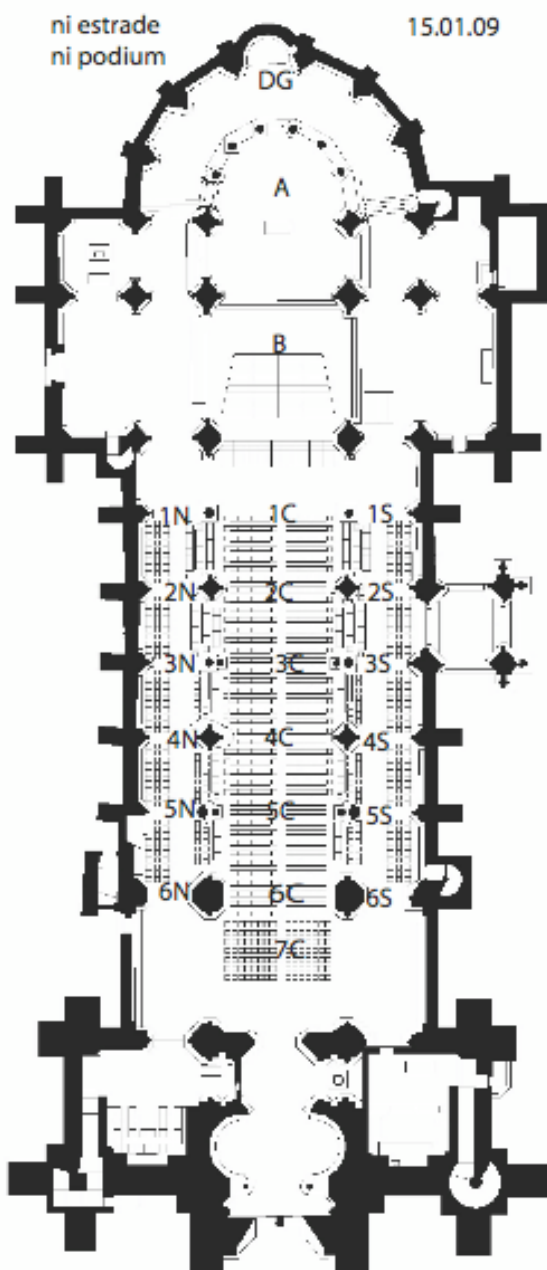


Figure 1 : plan de situation du 15 janvier 2009

trouvait sur celle-ci ou à même le dallage. Les plans de situation indiquent ces conditions.

3 Résultats

Les Tables 1 à 10 résument les principaux résultats. Elles contiennent chacune un ou deux tableaux – si bien que l'information es très compacte. Pour alléger, on s'est limité à ne donner que les niveaux pondérés A notés LAeq exprimés en dB(A) et linéaires notés LZeq exprimés en dB. Les résultats complets en bandes d'octave n'apportent pas d'éléments essentiels qui ne soient contenus dans les résultats ci-après.

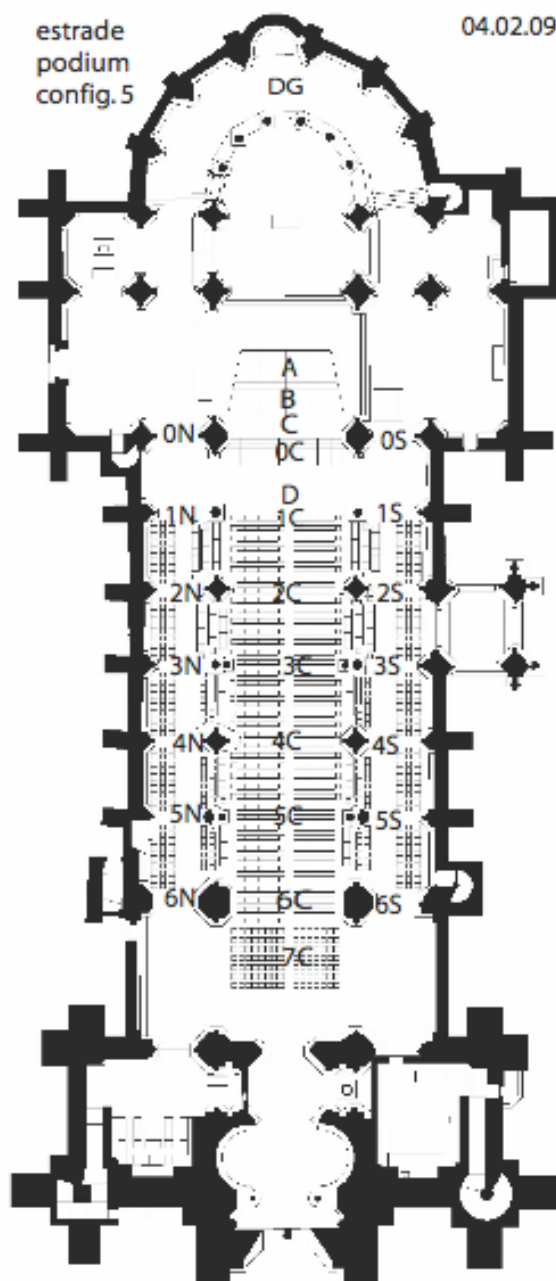


Figure 2 : plan de situation du 4 février 2009

Chaque tableau d'une Table comporte une date et un numéro d'ordre, la date permet d'établir la correspondance avec les plans de situation des Figures 1 à 3. Comme l'on s'intéresse qu'aux variations des niveaux en fonction des emplacements de la source, les tableaux n'indiquent que des différences – là aussi dans le souci d'alléger. Le code est simple : la lettre L indique le niveau et les lettres A, B C ou D correspondent aux positions de la source selon le plan de situation correspondant à la date, ainsi LB-LA est la différence D des niveaux en B et en A. D indique donc la différence des niveaux aux points d'observation lorsque la source passe de A à B ou A à C, comme spécifié, etc. Les tables avec D- (D en 1C) indiquent les variations des différences de niveau ou de niveau par rapport à une place de référence C1 (ou autre).

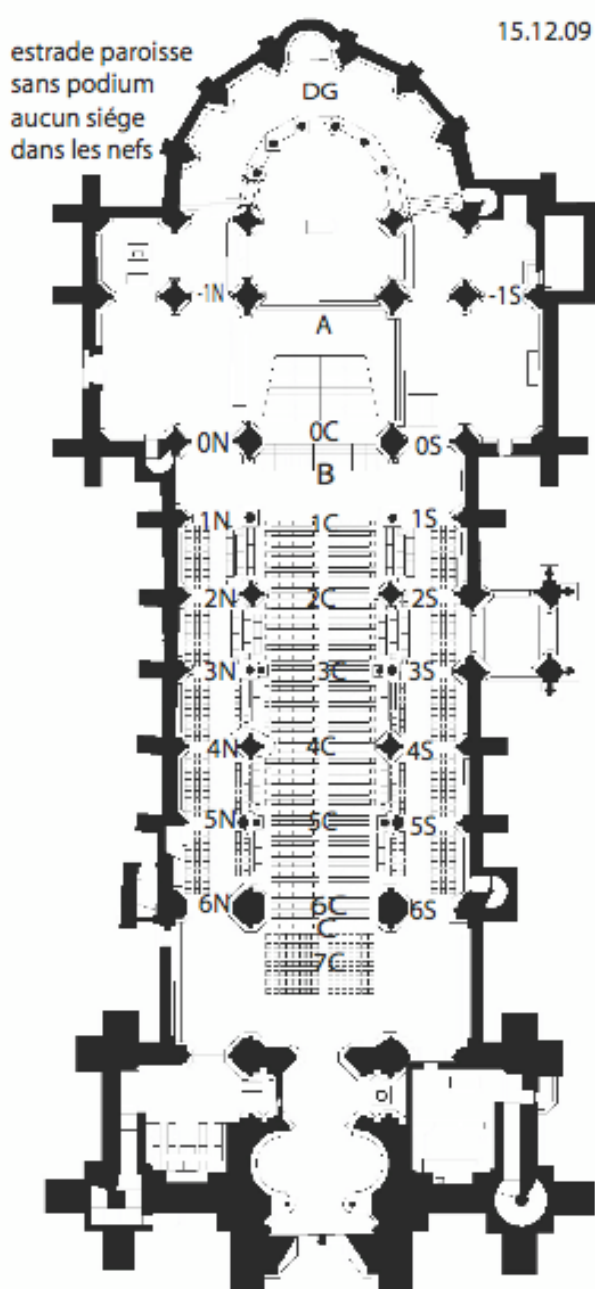


Figure 3 : plan de situation du 15 décembre 2010

15/01/09 -1			D = LB-LA					
LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-9.6	-6.6	DG			
		-1N						-1S
		0N			0C			0S
-4.2	-4.4	1N	-3.6	-3.8	1C	-5.2	-4.8	1S
-4.3	-5.1	2N	-4.6	-4.5	2C	-5.2	-4.7	2S
-4.7	-3.9	3N	-5.0	-5.1	3C	-5.0	-4.8	3S
-4.9	-4.5	4N	-4.9	-5.0	4C	-4.6	-4.3	4S
-5.2	-4.6	5N	-5.7	-1.6	5C	-5.3	-4.9	5S
-5.2	-4.6	6N	-5.3	-4.1	6C	-5.2	-4.4	6S
			-5.4	-4.3	7C			

15/01/09 -2			D - (D en C1)					
LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-6.0	4.5	DG			
		-1N						-1S
		0N			0C			0S
-0.6	-0.6	1N	0.0	0.0	1C	-1.6	-1.0	1S
-0.7	-1.3	2N	-1.0	-0.7	2C	-1.6	-0.9	2S
-1.1	-0.1	3N	-1.4	-1.3	3C	-1.4	-1.0	3S
-1.3	-0.7	4N	-1.3	-1.2	4C	-1.0	-0.5	4S
-1.6	-0.8	5N	-2.1	2.2	5C	-1.7	-1.1	5S
-1.6	-0.8	6N	-1.7	-0.3	6C	-1.6	-0.6	6S
			-1.8	-0.5	7C			

Table 1 : bilan des mesurages

15/01/09 -3			DA=LA - (LA en C1)					
LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			2.1	2.0	DG			
		-1N						-1S
		0N			0C			0S
-0.8	-0.6	1N	0.0	0.0	1C	-1.2	-1.3	1S
-2.2	-1.1	2N	-1.5	-1.2	2C	-2.3	-2.2	2S
-3.1	-2.9	3N	-2.3	-1.7	3C	-3.4	-3.2	3S
-4.3	-3.8	4N	-3.6	-2.6	4C	-4.5	-3.9	4S
-5.3	-4.8	5N	-3.8	-6.5	5C	-5.1	-4.1	5S
-6.8	-5.7	6N	-5.3	-4.6	6C	-6.4	-5.4	6S
			-6.2	-4.5	7C			

15/01/09 -4			DB=LB- (LB en C1)					
LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-3.9	-0.8	DG			
		-1N						-1S
		0N			0C			0S
-1.4	-1.2	1N	0.0	0.0	1C	-2.8	-2.3	1S
-2.9	-2.4	2N	-2.5	-1.9	2C	-3.9	-3.1	2S
-4.2	-3.0	3N	-3.7	-3.0	3C	-4.8	-4.2	3S
-5.6	-4.5	4N	-4.9	-3.8	4C	-5.5	-4.4	4S
-6.9	-5.6	5N	-5.9	-4.3	5C	-6.8	-5.2	5S
-8.4	-6.5	6N	-7.0	-4.9	6C	-8.0	-6.0	6S
			-8.0	-5.0	7C			

Table 2 : bilan des mesurages

04/02/09-1 D=LB-LA

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-0.7	-0.5	DG			
		-1N						-1S
-0.7	0.2	0N	-4.3	-2.6	0C	-0.7	-0.6	0S
-0.3	-0.1	1N	-0.3	-0.3	1C	-0.7	-0.7	1S
-0.2	-0.3	2N	-1.3	0.0	2C	-0.7	-0.4	2S
-0.7	-0.5	3N	-3.0	-0.5	3C	-0.6	-0.5	3S
-0.3	-0.4	4N	-0.8	-0.3	4C	-0.9	-0.4	4S
-0.8	0.4	5N	-0.7	-1.2	5C	-1.0	-1.3	5S
-0.7	-0.5	6N	-1.0	-1.1	6C	-0.8	-1.1	6S
			-0.2	-0.6	7C			

04/02/09-2 D-(D en 1C)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-0.4	-0.5	DG			
		-1N						-1S
-0.4	0.2	0N	-4.0	-2.6	0C	-0.4	-0.6	0S
0.0	0.2	1N	0.0	0.0	1C	-0.4	-0.4	1S
0.1	0.0	2N	-1.0	0.3	2C	-0.4	-0.1	2S
-0.4	-0.2	3N	-2.7	-0.2	3C	-0.3	-0.2	3S
0.0	-0.1	4N	-0.5	0.0	4C	-0.6	-0.1	4S
-0.5	0.7	5N	-0.4	-0.9	5C	-0.7	-1.0	5S
-0.4	-0.2	6N	-0.7	-0.8	6C	-0.5	-0.8	6S
			0.1	-0.3	7C			

Table 3 : bilan des mesurages

04/02/09-5 D=LD-LA

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-6.1	-5.2	DG			
		-1N						-1S
-3.3	-1.8	0N			0C	-3.8	-3.7	0S
-1.6	-1.4	1N			1C	-1.3	-1.4	1S
-0.7	-0.8	2N	-7.9	-7.6	2C	-0.9	-0.7	2S
-1.6	-1.7	3N	-4.4	-2.1	3C	-1.5	-1.5	3S
-1.8	-1.6	4N	-1.6	-1.9	4C	-1.6	-1.6	4S
-1.8	-2.8	5N	-1.9	-2.4	5C	-1.9	-2.4	5S
-1.8	-1.8	6N	-2.1	-2.0	6C	-1.9	-1.5	6S
			-1.7	-1.8	7C			

04/02/09-6 D-(D en 1N)

	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-4.5	-3.8	DG			
		-1N						-1S
-1.7	-0.4	0N			0C	-2.2	-2.3	0S
0.0	0.0	1N			1C	0.3	0.0	1S
0.9	0.6	2N	-6.3	-6.2	2C	0.7	0.7	2S
0.0	-0.3	3N	-2.8	-0.7	3C	0.1	-0.1	3S
-0.2	-0.2	4N	0.0	-0.5	4C	0.0	-0.2	4S
-0.2	-1.4	5N	-0.3	-1.0	5C	-0.3	-1.0	5S
-0.2	-0.4	6N	-0.5	-0.6	6C	-0.3	-0.1	6S
			-0.1	-0.4	7C			

Table 5 : bilan des mesurages

04/02/09-3 D=LCB-LA

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-10.5	-9.2	DG			
		-1N						-1S
-9.4	-8.6	0N			0C	-9.5	-9.0	0S
-8.2	-7.9	1N	-7.6	-7.7	1C	-9.2	-8.5	1S
-8.7	-7.9	2N	-9.6	-8.6	2C	-8.8	-8.0	2S
-9.1	-8.4	3N	-11.7	-8.8	3C	-8.8	-8.0	3S
-5.7	-7.9	4N	-9.0	-8.6	4C	-9.1	-8.4	4S
-9.0	-8.8	5N	-9.3	-8.9	5C	-8.9	-8.0	5S
-8.9	-6.9	6N	-9.5	-8.5	6C	-9.0	-7.8	6S
			-8.8	-6.2	7C			

04/02/09-4 D-(D en 1C)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-2.9	-1.5	DG			
		-1N						-1S
		0N			0C			0S
-0.6	-0.2	1N	0.0	0.0	1C	-1.6	-0.8	1S
-1.1	-0.2	2N	-2.0	-0.9	2C	-1.2	-0.3	2S
-1.5	-0.7	3N	-4.1	-1.1	3C	-1.2	-0.3	3S
1.9	-0.2	4N	-1.4	-0.9	4C	-1.5	-0.7	4S
-1.4	-1.1	5N	-1.7	-1.2	5C	-1.3	-0.3	5S
-1.3	0.8	6N	-1.9	-0.8	6C	-1.4	-0.1	6S
			-1.2	1.5	7C			

Table 4 : bilan des mesurages

04/02/09-7 LA-(LA en 1C)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-2.8	-3.1	DG			
		-1N						-1S
-0.1	-1.2	0N	4.1	2.9	0C	-0.3	-0.9	0S
-0.5	-1.2	1N	0.0	0.0	1C	-1.2	-1.7	1S
-1.5	-2.0	2N	-0.5	-1.2	2C	-1.8	-2.6	2S
-2.4	-2.8	3N	0.7	-2.0	3C	-3.0	-3.5	3S
-3.8	-4.3	4N	-3.0	-3.1	4C	-3.7	-3.9	4S
-4.7	-4.2	5N	-4.0	-3.5	5C	-4.7	-4.3	5S
-6.3	-6.5	6N	-4.9	-4.6	6C	-6.0	-5.4	6S
			-6.1	-5.4	7C			

04/02/09-8 LB-(LB en 1C)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
			-3.2	-3.3	DG			
		-1N						-1S
-0.5	-0.7	0N	0.1	0.6	0C	-0.7	-1.2	0S
-0.5	-1.0	1N	0.0	0.0	1C	-1.6	-2.1	1S
-1.4	-2.0	2N	-1.5	-0.9	2C	-2.2	-2.7	2S
-2.8	-3.0	3N	-2.0	-2.2	3C	-3.3	-3.7	3S
-3.8	-4.4	4N	-3.5	-3.1	4C	-4.3	-4.0	4S
-5.2	-3.5	5N	-4.4	-4.4	5C	-5.4	-5.3	5S
-6.7	-6.7	6N	-5.6	-5.4	6C	-6.5	-6.2	6S
			-6.0	-5.7	7C			

Table 6 : bilan des mesurages

04/02/09-9 LC-(LC en 1C)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
		-1N	-5.7	-4.6	DG			-1S
-1.9	-2.1	0N			0C	-2.2	-2.2	0S
-1.1	-1.4	1N	0.0	0.0	1C	-2.8	-2.5	1S
-2.6	-2.2	2N	-2.5	-2.1	2C	-3.0	-2.9	2S
-3.9	-3.5	3N	-3.4	-3.1	3C	-4.2	-3.8	3S
-1.9	-4.5	4N	-4.4	-4.0	4C	-5.2	-4.6	4S
-6.1	-5.3	5N	-5.7	-4.7	5C	-6.0	-4.6	5S
-7.6	-5.7	6N	-6.8	-5.4	6C	-7.4	-5.5	6S
			-7.3	-3.9	7C			

Table 7. bilan des mesurages

04/02/09-10 LD-(LD en 1N)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
		-1N	-6.8	-5.7	DG			-1S
-1.3	-0.4	0N			0C	-2.0	-4.2	0S
0.0	0.0	1N			1C	-0.4	-2.6	1S
-0.1	-0.2	2N	-6.3	-6.2	2C	-0.6	-2.8	2S
-1.9	-1.9	3N	-1.6	-1.5	3C	-2.4	-4.6	3S
-3.5	-3.3	4N	-2.5	-2.4	4C	-3.2	-5.4	4S
-4.4	-4.4	5N	-3.8	-3.3	5C	-4.5	-6.7	5S
-6.0	-5.7	6N	-4.9	-4.0	6C	-5.8	-8.0	6S
			-5.7	-4.6	7C			

Table 8. bilan des mesurages

15/12/09-1 D=LB-LA

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
		-1N	-1.2	-0.8	DG			-1S
1.1	1.5	0N	0.6	0.2	0C	-0.1	1.7	0S
0.3	0.5	1N	3.6	3.0	1C	1.7	1.0	1S
2.4	1.9	2N	2.3	2.6	2C	2.2	1.8	2S
2.0	1.8	3N	2.0	1.7	3C	1.7	1.4	3S
2.0	1.4	4N	2.2	1.5	4C	2.1	1.5	4S
1.8	1.2	5N	1.9	-0.3	5C	2.1	1.5	5S
1.9	1.2	6N	2.0	1.0	6C	5.1	4.7	6S
			1.8	1.8	7C			

15/12/09-2 D-(D en 1C)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
		-1N	-4.8	-2.4	DG			-1S
-2.5	-1.5	0N	-3.0	-2.8	0C	-3.7	-1.3	0S
-3.3	-2.5	1N	0.0	0.0	1C	-1.9	-2.0	1S
-1.2	-1.1	2N	-1.3	-0.4	2C	-1.4	-1.2	2S
-0.9	-1.3	3N	-1.6	-1.3	3C	-1.9	-1.6	3S
-1.6	-1.2	4N	-1.4	-1.5	4C	-1.5	-1.5	4S
-1.6	-1.6	5N	-1.7	-3.3	5C	-1.5	-1.5	5S
-1.8	-1.8	6N	-1.6	-2.0	6C	1.5	1.7	6S
-1.7	-1.8		-1.8	-1.2	7C			

Table 9. bilan des mesurages

15/12/09-3 LA-(LA en 1C)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
		-1N	-2.7	-0.8	DG			-1S
-0.5	-1.1	0N	0.9	1.2	0C	-0.7	-0.9	0S
0.3	-0.1	1N	0.0	0.0	1C	0.1	0.0	1S
-1.0	-0.9	2N	-1.1	-1.1	2C	-1.3	-1.0	2S
-2.1	-1.4	3N	-2.1	-1.8	3C	-2.3	-1.9	3S
-2.7	-2.3	4N	-3.0	-2.3	4C	-4.1	-3.3	4S
-4.1	-3.2	5N	-4.0	-1.3	5C	-5.0	-3.7	5S
-4.9	-3.8	6N	-5.6	-3.9	6C	-5.9	-3.9	6S
-6.4	-4.1		-5.9	-3.3	7C			

15/12/09-4 LB-(LB en 1C)

LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?	LAeq	LZeq	où?
		-1N	-7.5	-4.6	DG			-1S
-3.0	-2.6	0N	-2.1	-1.6	0C	-4.4	-2.2	0S
-3.0	-2.6	1N	0.0	0.0	1C	-3.7	-3.2	1S
-2.2	-2.0	2N	-2.4	-1.5	2C	-3.2	-3.0	2S
-3.0	-2.7	3N	-3.7	-3.1	3C	-3.7	-3.1	3S
-4.3	-3.5	4N	-4.4	-3.8	4C	-4.8	-4.3	4S
-5.7	-4.8	5N	-5.7	-4.6	5C	-5.6	-4.8	5S
-6.7	-5.6	6N	-7.2	-5.9	6C	-6.5	-5.2	6S
-8.1	-5.9		-7.7	-5.1	7C	-4.4	-2.2	6S

Table 10. bilan des mesurages

4 Conclusion

L'inspection des tableaux montre bien que, comme suspecté, le champ réverbéré dépend beaucoup de la position de la source : les variations observées sont souvent plus importantes que celles spatiales observées en se déplaçant dans les neufs.

Sans entrer dans le détail de cette inspection, on peut en dégager les conclusions suivantes :

1 - Placer l'estrade dans le chœur n'est pas le meilleur choix car il maximalise le champ réverbéré (essais du 15.01.09) ; la disposition dans la croisée du transept est nettement plus favorable

2 – La configuration la plus usuelle dans le transept – dite configuration 5 – se particularise par une bonne homogénéité pour les choristes, qu'ils se trouvent dans les premiers ou les derniers rangs de l'estrade ; par contre les solistes sont trop en avant dans la nef - champ réverbéré plus élevé ! - et le chef de chœur trop distant des choristes - trop loin musicalement !

3 – Placer l'estrade dans la croisée du transept et la reculer le plus possible vers le chœur, voire la disposer à cheval entre croisée et chœur est la meilleure solution ; les solistes se placeraient alors tout en avant de la croisée du transept, ce qui est l'emplacement optimum

4 - Expérience faite, le podium d'orchestre n'est pas indispensable, les musiciens pourraient se disposer sur toute la largeur de la croisée, ce qui réduirait la distance entre chef de chœur et choristes.

Ces dispositions ont été proposées aux personnes intéressées.

Remerciements

Nos remerciements vont à tous les intervenants, en particulier aux chœurs et musiciens, aux autorités administratives, religieuses et politiques, et surtout à M. G. Pistolato, intendant de la Cathédrale, qui n'a jamais ménagé ni son temps, ni ses efforts et qui s'est bien souvent impliqué au-delà de ses obligations et à M. J.-L. Dos Ghali dont la passion pour la musique n'a d'égale que sa compétence de chef de chœur.

Références

- [1] Rossi M. N. " Amélioration du confort d'écoute par création de pseudo réflexions précoces", CFA02, Lille (2002) *actes*
- [2] Rossi M. "Audio", PPUR, Lausanne, 2007