

Journées de printemps de la SSA
30 avril 2026, Olten

Evaluation objective et subjective d'un système d'assistance électroacoustique pour les concerts chorals dans la Cathédrale de Lausanne

Victor Desarnaulds

EcoAcoustique SA, 24. av. Université, 1005 Lausanne, desarnaulds@ecoacoustique.ch



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



1

1

Plan de la présentation

- 1) Introduction
- 2) Assistance électroacoustique
- 3) Evaluation objective (mesurages)
- 4) Evaluation subjective (questionnaires)
- 5) Discussion et conclusion



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



2

2

1) Introduction

Cathédrale de Lausanne



100 m x 42 m
x 21 m

1190-1275
(750^{ème}
inauguration)



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



3

3

Chorales de Lausanne

Groupe vocal Acapellia	Gospel Sound
Groupe vocal Les Colombines	Hérisson.ne.s
Amérique Latine en Chœur	Chœur symphonique de l'université populaire de Lausanne
Ensemble Vocal Auditea	Chœur Vivace de Lausanne
Chanteclair	Chorale anarchiste
Chœur Ardito	Chorale du corps de police de Lausanne
Chœur Auguste	Chorale Plein Vent de Lausanne
Chœur Bach	Chorale de la Maison de Quartier Sous-Gare
Chœur de la Basilique de Lausanne	Chorale de la Pontaise
Chœur Calliope Lausanne	Clé des chants
Chœur de la Cathédrale de Lausanne	Club des Jodleurs «Les Romands»
Chœur de la Cité de Lausanne	L'As de Chœur
Chœur de la Colline	Lausanne Résonne
Ensemble Cuadrinio de Pully	Les Petites Voix - Chœur de l'EML
Ensemble vocal Les Vertes Manches	Chœur Préparatoire - Chœur de l'EML
La Chanson d'Epalinges	Chœur d'Enfants - Chœur de l'EML
Chœur Mixte – L'Echo des bois	Chœur Junior - Chœur de l'EML
Chœur Fa7 – Jazz Pop Gospel	Chœur Studio - Chœur de l'EML
Chœur Laudate	Chœur Féminin - Chœur de l'EML
Dynam'hits chœur mixte	Voices - Chœur de l'EML
Chœur d'enfants d'Epalinges	Groupe vocal Café Café
Chœur Faller Lausanne	Voix de Lausanne
Chœur Pro Arte	



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



4

4

Cathédrale de Lausanne Concerts avec chorales



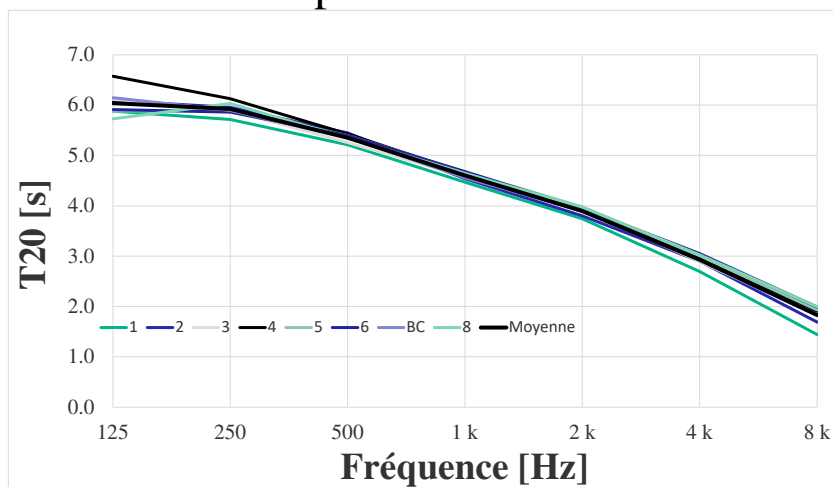
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



5

5

Cathédrale de Lausanne Temps de réverbération



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



6

6

Cathédrale de Lausanne

Mauvaise acoustique

- En 1902, le célèbre organiste et compositeur français Charles-Marie Widor refuse d'inaugurer le nouvel orgue Kuhn, du fait de la mauvaise qualité acoustique de l'instrument et de l'édifice.
- Mauvaise acoustique pour les concerts lorsqu'on s'éloigne de la source (perte de définition et d'enveloppement après le 1^{er} tiers de la nef). En particulier pour les chorales qui sont situées le plus loin des auditeurs.



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



7

7

2) Assistance électroacoustique

Amélioration du confort d'écoute par création de pseudo réflexions précoces

Mario Rossi

*Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique LEMA - Institut de Transmissions, Ondes et Photonique TOP
Faculté des Sciences et Techniques de l'Ingénieur STI - Ecole Polytechnique Fédérale, CH - 1015 Lausanne, Suisse*

RESUME

Comme tous les édifices religieux, la Cathédrale de Lausanne accueille des concerts, principalement de musique chorale, avec ou sans solistes, accompagnés ou non par une formation musicale. Ainsi que l'on peut s'y attendre la « réverbérance » est excellente alors que « clarté » et « présence » sont déficientes. En vue de les améliorer, sachant que toute intervention sur l'édifice lui-même était exclue, une assistance électroacoustique a été étudiée et testée, conjointement à une estrade démontable, avec réflecteurs, pour les chœurs. Le but de cette assistance est de créer des contributions similaires à des réflexions précoces. Cet article décrit le concept de cette installation, sa conception, son expérimentation et les réactions des interprètes et des auditeurs lors de concerts.

Congrès Français d'Acoustique CFA 2000 + SSA-SGA, EPFL Lausanne, 3-6 septembre 2000



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



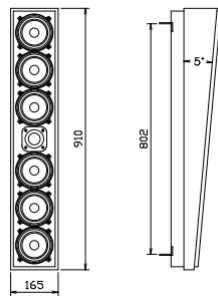
8

8

Assistance électroacoustique

Ce système utilise les haut-parleurs distribués dans la cathédrale pour créer des pseudo-réflexions, afin d'augmenter la clarté musicale et rapprocher virtuellement les musiciens sans toutefois être perçu comme une sonorisation par l'auditeur.

Une diffusion par les hauts parleurs existants destinés à la sonorisation de la parole (Audioperformance SB-CH sur chaque colonne de la nef)



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts

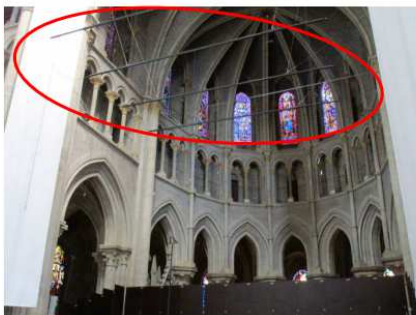
ECOACOUSTIQUE

9

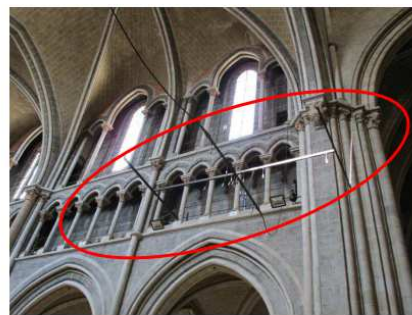
9

Assistance électroacoustique Rossi

- Pour le chœur, un système de 4 perches suspendues au-dessus de l'estrade avec 12 microphones
- Pour les solistes, une antenne microphonique à directivité variable
- Un système de traitement des signaux (gains et retards)



Système Rossi : perches avec microphones sur le chœur



Système Rossi : antenne microphonique sur les solistes

V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts

ECOACOUSTIQUE

11

11

Assistance électroacoustique Rossi

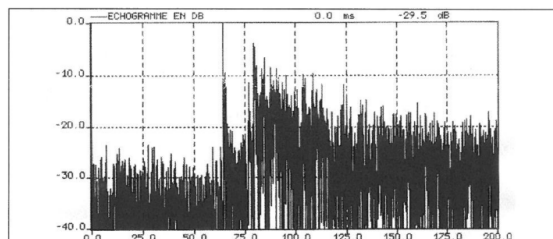


Figure 1. Echogramme avec retard et gain exagéré de 10 dB

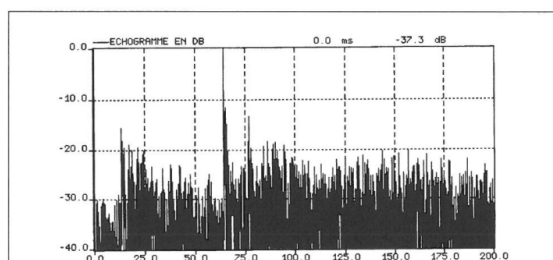


Figure 2. Echogramme sans retard et gain nominal max.



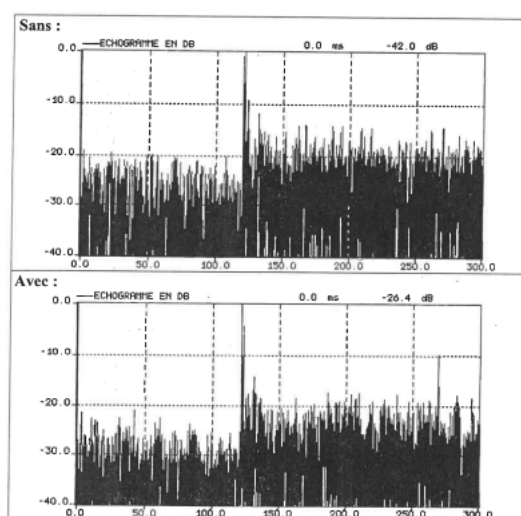
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



12

12

Assistance électroacoustique Rossi



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



13

13

Assistance électroacoustique Rossi

- Difficulté de réglage (+ pannes) antenne microphonique
- Système de traitement des signaux complexe et obsolète
- Nécessite un ingénieur son pour les répétitions (réglage) et le concert
- Coût trop élevé (environ 10'000.-/concert avec estrade)
- Presque jamais utilisé ☹



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts

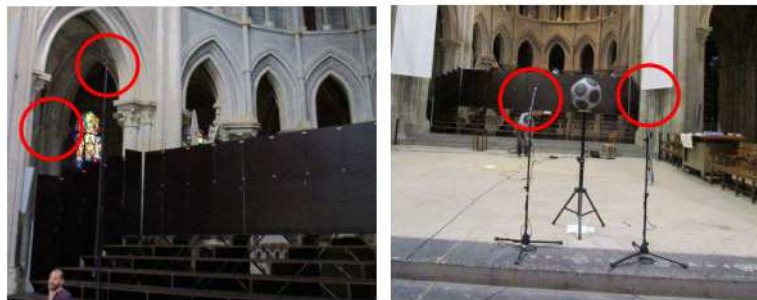


15

15

Variante assistance électroacoustique

- Pour le chœur, 2 micros latéraux sur pieds (1 de chaque côté) et 2 micros ORTF à l'avant de l'estrade (cf. photo ci-dessous)
- Pour les solistes, 2 micros sur pieds (cf. photo ci-dessous)
- Un système de traitement performant (delay, gains, égalisation)



Système Auditech (variante) : micros pour le chœur (à gauche) et les solistes (à droite)



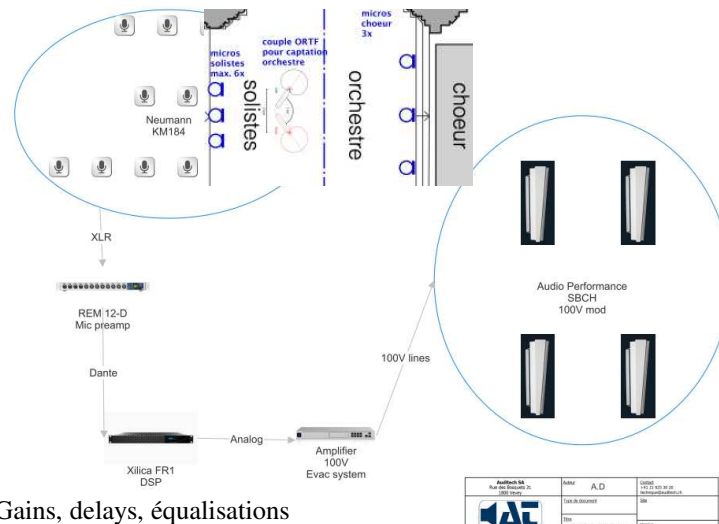
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



16

16

Variante assistance électroacoustique



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts

ECOACOUSTIQUE

17

17

Variante assistance électroacoustique

- Micro Neumann KM184 pour leur précision (prise de son entre 60 et 90 cm), orchestre avec prise ORTF.
- Chaque front de hp a été réglé (niveau, delay, égalisation) de façon à reproduire une écoute similaire aux premiers rangs.
- Environ 10% du son arrive des HP pour ne pas altérer le naturel de l'écoute (localisation de la source, cohérence visuelle/auditive et timbre).
- Après de nombreuses heures de calibration, les paramètres du DSP (Xilica FR1) ont été fixes pour les diverses configurations possibles de la jauge (estrade et public)
- L'utilisation d'un système 100V avec transformateurs pour les haut-parleurs utilisés comme système d'évacuation a en outre complexifié l'égalisation (coupure en dessous de 120 Hz).

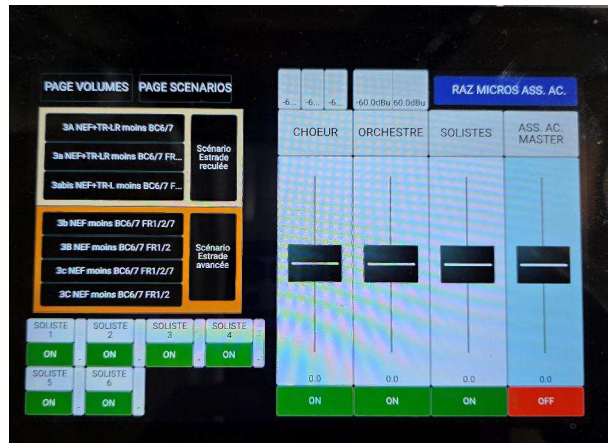
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts

ECOACOUSTIQUE

18

18

Variante assistance électroacoustique



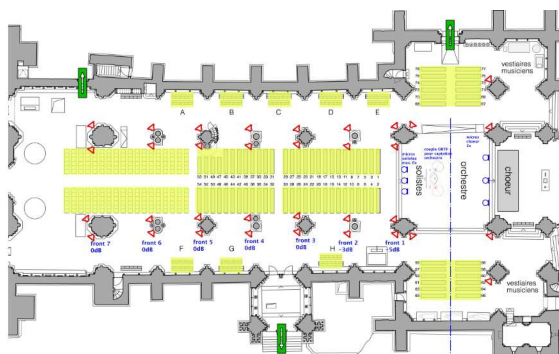
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



19

19

Variante assistance électroacoustique



Scénario estrade reculée:

delay front 1: 26ms
delay front 2: 46ms
delay front 3: 66ms
delay front 4: 86ms
delay front 5: 106ms
delay front 6: 126ms
delay front 7: 152ms

Scénario estrade avancée:

delay front 1: non activé
delay front 2: non activé
delay front 3: 40ms
delay front 4: 60ms
delay front 5: 80ms
delay front 6: 100ms
delay front 7: 126ms



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



20

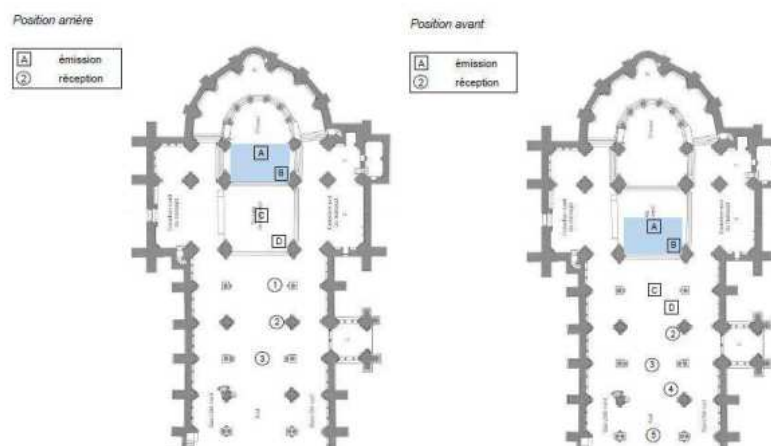
20

3) Evaluation objective - Mesurages

- ◆ Mesurages acoustiques avec/sans assistance selon ISO 3382-1
- ◆ Source HP dodecaèdre avec 2 positions sur estrade (chœur) + avant (solistes)
- ◆ Configuration avec estrade avancée /reculée
- ◆ 5 positions de mesures dans la nef
- ◆ Critères acoustiques spatiaux (Latéral Energy Fraction [%]), niveau (Force sonore G [dB]), temporels (temps de réverbération T20 et EDT [s]), définition (Clarté musicale C80 [dB])
- ◆ Analyse qualitative avec rose de directivité (IRIS)



Evaluation objective - Mesurages



Evaluation objective - Mesurages

	Average	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Decay Range (dB)	-	37	52	57	58	55	56	51	40
EDT (s)	5.15	5.18	5.77	6.38	5.61	4.68	3.83	2.71	1.58
T20 (s)	5.23	6.14	6.19	6.42	5.59	4.86	3.88	2.85	1.62
T30 (s)	5.25	6.10	6.22	6.27	5.59	4.90	3.94	2.92	1.72
G (dB)	7.0	1.8	12.3	10.7	7.1	6.8	7.4	3.7	-2.4
G [0, 80] (dB)	-1.9	-5.0	6.4	4.6	-2.0	-1.9	-0.6	-2.6	-6.1
G [80, ∞) (dB)	6.4	1.1	11.0	9.5	6.6	6.2	6.6	2.5	-4.8
LF	0.13	0.25	0.07	0.06	0.17	0.23	0.28	0.30	0.29
LFC	0.18	0.44	0.15	0.12	0.22	0.24	0.36	0.33	0.30
GLL (dB)	3.3	-3.9	4.4	4.5	1.7	1.6	2.4	-1.8	-9.2
C80 (dB)	-8.3	-6.1	-4.6	-5.0	-8.6	-8.0	-7.2	-5.1	-1.3
C50 (dB)	-10.9	-8.5	-5.5	-6.1	-11.7	-10.2	-10.9	-8.8	-3.9
D50	0.08	0.12	0.22	0.20	0.06	0.09	0.07	0.12	0.29
Tr (ms)	414	425	384	436	453	376	305	224	122
ST Early (dB)	6.2	-2.8	3.0	-0.3	6.6	3.8	14.9	7.5	4.9
ST Late (dB)	13.1	6.3	8.4	6.5	14.6	11.6	19.8	11.9	5.6

Critères acoustiques mesurés pour chaque configuration (source, réception, fonctionnement)



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts

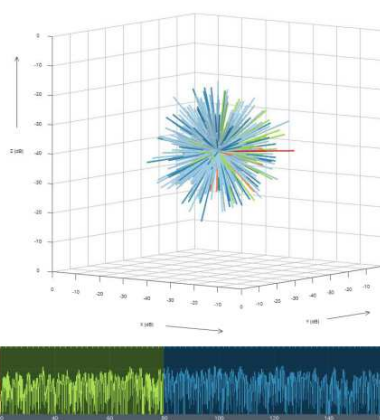


23

23

Evaluation objective - Mesurages

3-D Sound intensity Vectors
Normalized to broadband direct sound wave



Analyse spatiales (3d plot, figure du haut) et temporelle (en bas) de la réponse impulsionnelle



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



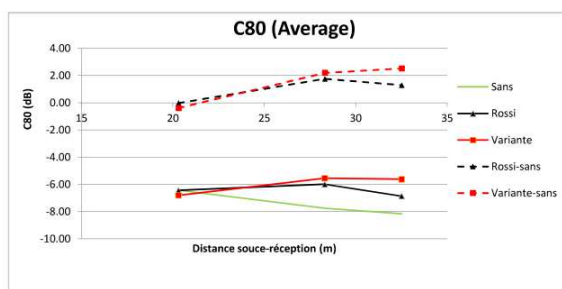
24

24

Evaluation objective - Mesurages

C80(Average frequency)			
Position	1	2	3
d(m)	20.3	28.3	32.5
Sans	-6.43	-7.76	-8.16
Rossi	-6.44	-5.99	-6.86
Variante	-6.81	-5.55	-5.62
Rossi-sans	-0.02	1.77	1.30
Variante-sans	-0.38	2.21	2.53
Variante-Rossi	-0.36	0.44	1.24

C80(1 kHz)			
Position	1	2	3
d(m)	20.3	28.3	32.5
Sans	-5.82	-5.40	-6.64
Rossi	-5.47	-3.86	-4.49
Variante	-5.93	-3.61	-3.30
Rossi-sans	0.35	1.54	2.16
Variante-sans	-0.11	1.78	3.34
Variante-Rossi	-0.46	0.24	1.18



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



25

25

Evaluation objective - Mesurages

Comparaison des résultats bruts avec/Rossi/variante

Pour rendre les résultats plus accessibles aux non-spécialistes, présentation selon leur degré de perceptibilité (normalisation selon la valeur JND), soit :

- 0 = non perceptible,
- 1 = juste perceptible,
- 2 = perceptible,
- ≥ 3 : bien perceptible



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



26

26

Evaluation objective – Résultats

$\Delta T20 > 5\%$ Soit 0.25 s

s

Source	Réception	A (arrière chœur)		B (avant chœur)		C (orchestre)		D (solistes)	
		moy(d)	1kHz (d)	moy(d)	1kHz (d)	moy(d)	1kHz (d)	moy(d)	1kHz (d)
Rossi	2	0	0	1	1	1	0	0	0
	3	0	0	0	0	0	0	0	0
Variante	2	0	0	0	0	1	2	0	0
	3	1	0	0	0			2	2

0 = non perceptible, 1 = juste perceptible, 2 = perceptible, ≥ 3 : bien perceptible

$\Delta C80 > 1\text{dB}$

Source	Réception	A (arrière chœur)		B (avant chœur)		C (orchestre)		D (solistes)	
		moy(d)	1kHz (d)	moy(d)	1kHz (d)	moy(d)	1kHz (d)	moy(d)	1kHz (d)
Rossi	2	2	2	2	2	0	0	0	1
	3	1	2	2	2	0	0	1	0
Variante	2	2	2	2	1	0	0	0	0
	3	3	3	0	1			0	0



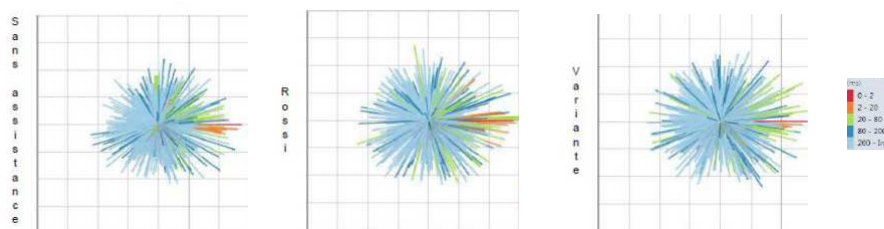
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



27

27

Evaluation objective – plot 3D (Estrade avant, position 5, 1 kHz)



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



29

29

Evaluation objective – Conclusions

Les deux systèmes d'assistance (Rossi; variante simplifiée) améliorent de façon perceptible à très perceptible les critères acoustiques spatiaux (LF), de niveau sonore (G), de clarté musicale (C80) et de définition (D50) :

- Surtout pour le chœur, tant lorsque l'estrade est à l'arrière que lorsqu'elle est à l'avant et dans une moindre mesure pour les solistes (estrade à l'arrière)
- au milieu et au fond de la nef (positions de réception 3 à 5), où la situation est la plus critique (sans système d'assistance)
- aux moyennes fréquences (500 et 1000 Hz) où la perception subjective est la plus importante

Conclusions complétées par l'étude des représentations spatio-temporelles des réponses impulsionnelles (3D-plot).



4) Evaluation subjective

Tests subjectifs avec/sans assistance électroacoustique durant une répétition (chœur, orchestre et solistes)

- 8 auditeurs expérimentés (4 chefs de chœur, 2 musiciens et 2 acousticiens)
- Présentations et explication des paramètres et positions
- Evaluation absolue (trop faible/adapté/trop fort) et relative (amélioration/détérioration)
- Evaluation informée (visualisation assistance) / à l'aveugle
- Discussion et analyse des réponses



Evaluation subjective

Définitions paramètres

1) Le temps de réverbération

Lors de l'émission d'un son bref et puissant, le son décroît en intensité durant un certain temps, jusqu'à son extinction. **Le temps de réverbération (T_r) décrit cette durée de décroissance du son.** Lorsqu'il est adéquat au type d'espace, le son est prolongé avec rondeur, sans provoquer de confusion. S'il est trop long, l'acoustique est confuse, les sons se mélangent et se superposent (p. ex. caverne). S'il est trop court, le son s'estompe trop vite, l'acoustique est sèche (p. ex. dans studio d'enregistrement).

2) La clarté musicale

La clarté musicale ($C80$) décrit la sensation de netteté, de transparence et de définition de la musique. Lorsqu'elle est adaptée au type de musique, les sons fusionnent bien et on peut les discriminer sans difficulté. Les attaques sont nettes et les voix se distinguent clairement. Lorsqu'elle est trop faible, on a de la peine à distinguer les sons entre eux (attaques et instruments), ce qui provoque un manque de précision et une certaine confusion. Lorsqu'elle est trop élevée, la musique devient excessivement précise, elle peut donner une sensation de martèlement et de manque de fusion.



Evaluation subjective

Définitions paramètres

3) La force sonore

La force sonore (G) décrit l'amplification naturelle de la pièce.

Lorsqu'elle est adaptée au type de musique, l'écoute est agréable quelle que soit la dynamique (*pp* à *ff*). Lorsqu'elle est trop faible, le niveau sonore perçu devient trop bas. On peut être gêné par d'autres bruits (en particulier lors de passages *pp*). Lorsqu'elle est trop grande, le niveau sonore perçu devient trop élevé. Les passages *ff* deviennent trop intenses et peuvent provoquer une gêne auditive.

4) Enveloppement

La part d'énergie latérale par rapport au son direct (LEF) correspond à la sensation d'enveloppement de l'auditeur. Elle est aussi liée à la perception subjective de la largeur de la source sonore. Lorsqu'elle est adaptée, on se sent enveloppé par la musique, on perçoit la source sonore comme, large, spacieuse. Lorsqu'elle est trop faible, on a l'impression que la source est étroite et le son essentiellement direct. Lorsqu'elle est trop grande, on perd la bonne localisation de la source.



Questionnaires

Evaluation subjective (absolue)

TESTS SUBJECTIF

Cathédrale de Lausanne- Système d'assistance électroacoustique pour les concerts
12 décembre 2022

Entourez ce qui convient

Test No : A1

Expert : 1 2 3 4 5 6 7 8

Position 1 2 3 4 5 6 7 8 (cf. plan)

Type morceau :

- a) orchestre seul
b) Tutti (chœur+solistes+orchestre)
c) chœur a capella
d) chœur + orchestre
e) solistes seuls (continuo)
f) soliste + orchestre

Evaluation sans système d'assistance

Temps de réverbération (résonnance, ampleur)

Trop sec 1 2 3 adapté 4 réverbérant 5 trop réverbérant

Clarté musicale (définition, netteté, transparence)

Saccadé 1 très net 2 net 3 peu net 4 pas assez net 5

Force sonore (niveau, amplification)

Trop faible 1 faible 2 adapté 3 fort 4 trop fort 5

Enveloppement (largeur de la source)

Trop faible 1 faible 2 adapté 3 fort 4 trop fort 5



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



35

35

Evaluation subjective

Relative (avec/sans assistance)

Evaluation des changements apportés par le système d'assistance

Amélioration (+) / Peu de changement (=) / Dégradation (-)

Temps de réverbération (résonnance, ampleur)

Imperceptible 1 faiblement perc. 2 perceptible 3 bien perceptible 4 trop perceptible 5

Clarté musicale (définition, netteté, transparence)

Imperceptible 1 faiblement perc. 2 perceptible 3 bien perceptible 4 trop perceptible 5

Force sonore (niveau, amplification)

Imperceptible 1 faiblement perc. 2 perceptible 3 bien perceptible 4 trop perceptible 5

Enveloppement (largeur de la source)

Imperceptible 1 faiblement perc. 2 perceptible 3 bien perceptible 4 trop perceptible 5



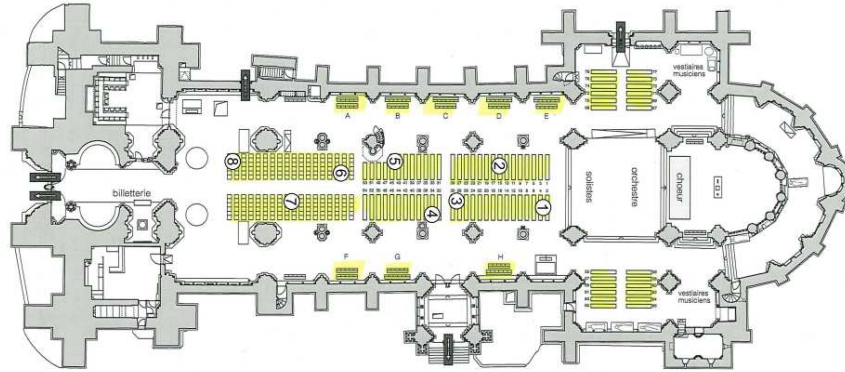
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



36

36

Evaluation subjective Positions d'évaluation



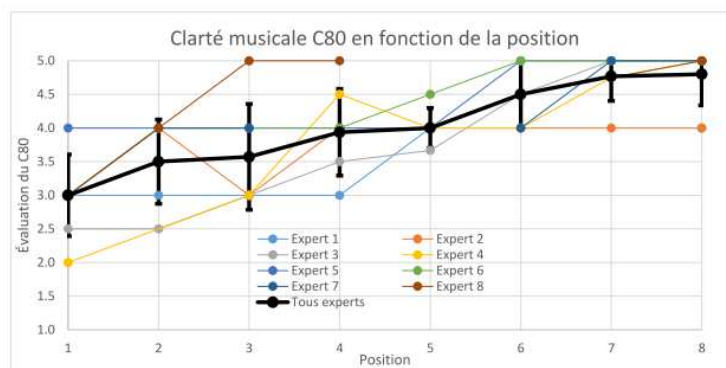
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



37

37

Evaluation subjective Perception absolue (sans assistance)



Clarté musicale (définition, netteté, transparence)

Saccadé 1 très net 2 net 3 peu net 4 pas assez net 5



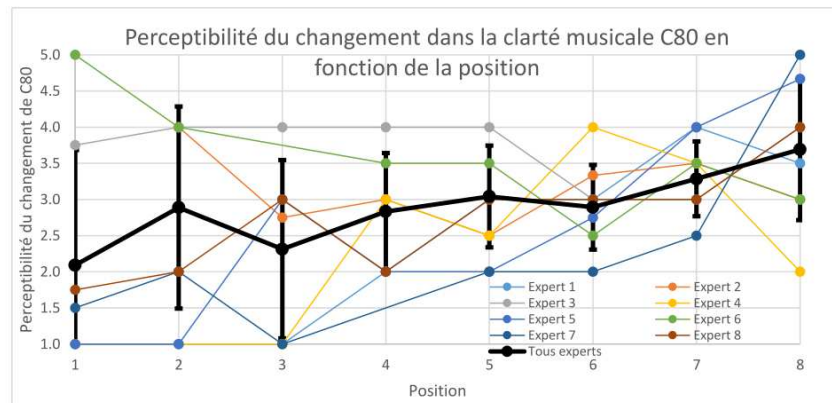
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



38

38

Evaluation subjective Perception assistance



1 : Imperceptible ; 2 : faiblement perceptible ; 3 : perceptible ; 4 : bien perceptible ; 5 : trop perceptible.



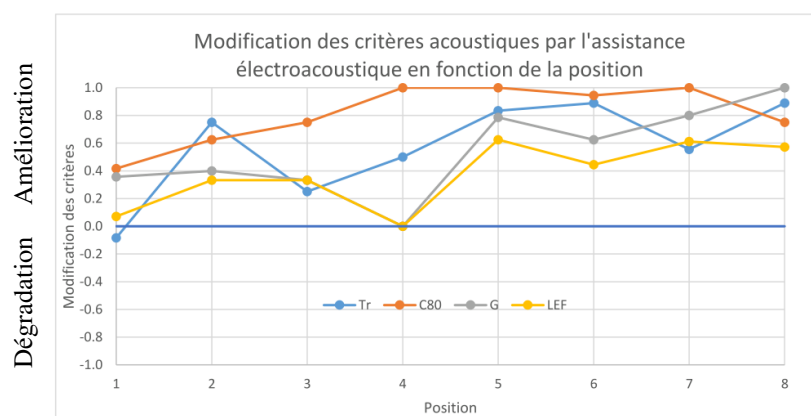
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



39

39

Evaluation subjective - Appréciation Amélioration/Dégradation



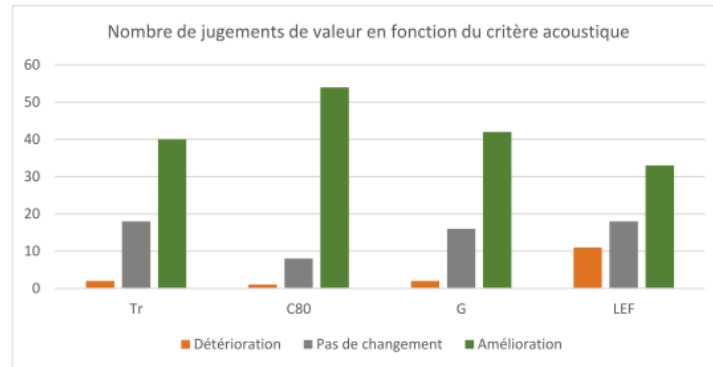
V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



40

40

Evaluation subjective - Appréciation Amélioration/Détérioration



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts



41

41

4) Conclusions

- L'analyse des **résultats de mesurages** nous a permis de constater que la version Rossi et la variante simplifiée de système d'assistance améliorent de façon perceptible à très perceptible les critères acoustiques spatiaux (fraction d'énergie latérale LF), de niveau sonore (force sonore G), de clarté musicale (C80) et de définition (D50). Ces améliorations sont perceptibles essentiellement :
 - pour le chœur, tant lorsque l'estrade est à l'arrière que lorsqu'elle est à l'avant et dans une moindre mesure pour les solistes et l'orchestre
 - au milieu et au fond de la nef (situation est la plus critique sans assistance)
 - aux moyennes fréquences (500 et 1000 Hz) où la perception subjective est la plus importante
- Les conclusions des résultats portant sur des critères acoustiques ont été complétées et confirmées par l'étude plus qualitative de la représentation spatio-temporelle des réponses impulsionnelles (3D plot).



V. Desarnaulds, Assistance électroacoustique pour les concerts

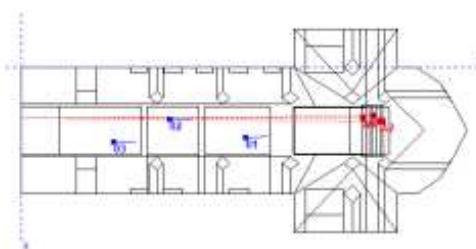
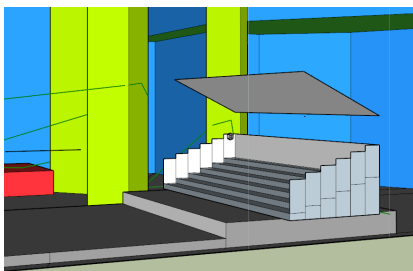


42

42

Conclusions

- L'analyse de **tests subjectifs** a démontré que l'assistance électroacoustique était peu perceptible à perceptible en tant que dispositif externe au concert, ce qui correspond aux objectifs d'une telle installation.
- La grande majorité des résultats montre cependant une amélioration perceptible des conditions d'écoute pour les positions les plus défavorables, dans la seconde moitié de la nef.
- La commission technique de la cathédrale a donc mis en place un système fixe et modulable d'assistance électroacoustique pour les concerts qui est maintenant utilisée régulièrement et avec satisfaction
- Pour les puristes, qui ne souhaitent pas d'assistance électroacoustique, une étude complémentaire a été menée pour améliorer les réflexions locales de l'estrade (cloisons et abat-voix).



Merci de votre attention

Remerciements à

- ◆ Yves Golay, architecte pour le canton de Vaud, président de la commission technique de la cathédrale, qui nous a mandaté pour ces études
- ◆ Gilian Lüthi et Leo Charosky, du bureau EcoAcoustique, qui ont collaboré aux mesurages et à l'analyse subjective
- ◆ Alexander Daum et Vincent Borgnana, de l'entreprise Auditech SA, qui ont mis en œuvre les installations provisoires pour les mesurages objectifs et les tests subjectifs. Cette entreprise a effectué les travaux pour l'installation définitive.

