

Détermination des temps de réverbération souhaitables dans les églises par corrélation entre appréciations subjectives et mesures objectives.

M. Victor Desarnaulds, Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), Dépt. Architecture, Institut Technique du Bâtiment, CH-1015 Lausanne, Suisse (victor.desarnaulds@epfl.ch),

M. Philipp Bulushek, EPFL, Dépt. Physique CH-1015 Lausanne Suisse

Résumé : Pour déterminer scientifiquement les valeurs de temps de réverbération souhaitables dans les églises, nous avons corrélé, par une approche statistique sur 112 églises, l'appréciation subjective de l'acoustique par les utilisateurs de ces églises (étude sur 702 questionnaires) avec le temps de réverbération mesuré dans celles-ci. Les valeurs souhaitables du temps de réverbération pour obtenir une acoustique jugée satisfaisante ($Tr = 1.37 \log(V) - 2.1 \pm 0.8$) représente un compromis moyen entre une intelligibilité satisfaisante de la parole (qui apparaît comme la principale priorité) et une certaine « ambiance », propre à l'architecture sacrée.

Introduction

Les églises, de par leurs exigences contradictoires, présentent toujours un défi pour l'acousticien. En effet l'orgue demande passablement de réverbération pour des raisons esthétiques, le chant en demande modérément pour des raisons liturgiques et la parole (lecture, prédication) en demande peu pour une question d'intelligibilité [Raes]. Pour obtenir une « bonne » acoustique dans une église, il faut donc établir le compromis le moins mauvais entre ces diverses exigences d'après les priorités qu'on leur donne.

De nombreux ouvrages traitant de l'acoustique des salles proposent des valeurs optimales pour le temps de réverbération des églises mais ces valeurs varient très largement selon les auteurs [Zeller; Hartmann]. L'origine et les conditions d'application des valeurs de temps de réverbération optimum sont par ailleurs très rarement documentées.

Pour déterminer scientifiquement les valeurs de temps de réverbération souhaitables dans les églises (i. e. jugée bonne subjectivement par les utilisateurs), nous avons tenté de corréler, par une approche statistique, l'appréciation subjective de l'acoustique d'un grand nombre d'églises avec des grandeurs objectives (en particulier le temps de réverbération, noté Tr dans la suite du texte) mesurées dans celles-ci.

Méthodologie

Une première étude sur les conditions acoustiques des églises en Suisse [Desarnaulds] nous a permis de recenser les paramètres objectifs (style architectural, confession actuelle, grandeurs géométriques, nombre de places, temps de réverbération (église vide) et bruit de fond par octave, STI) dans 185 églises.

Pour obtenir les appréciations subjectives de ces églises, nous avons réalisé un questionnaire à choix multiple (échelle 1-3) comportant vingt questions sur:

- les qualités acoustiques de l'église (impression générale, résonance et adéquation avec la parole, la musique d'orgue, le chant de l'assemblée et les concerts)

- l'intelligibilité de la parole (sonorisation, répartition du niveau sonore et intelligibilité sans et avec sonorisation, bruits de fond)
- l'orgue (position et niveau sonore comme accompagnement des chants de l'assemblée)
- la position des sièges, le volume de l'église par rapport à sa fréquentation
- compétences des personnes interrogées

Ce questionnaire a été préalablement testé dans 4 églises sur une trentaine de fidèles par église. Nous avons ainsi pu d'une part reformuler certaines questions visiblement mal comprises, et d'autre part étudier la distribution statistique des réponses obtenues afin de déterminer le nombre de questionnaires minimum à distribuer dans chaque paroisse.

Nous avons alors envoyé aux ministres (pasteurs ou prêtres) de chaque paroisse 7 questionnaires, dont 1 devait être rempli par le ministre lui-même (vu son rôle d'orateur et d'utilisateur principal) et les 6 autres devaient être distribués à des paroissiens fidèles.

Tableau 1: Nombre de questionnaires envoyés et reçus

Nombre	Envoyés	Reçus	%
Eglises	185	112	61
Questionnaires. envoyés par église (n)	7.9	6.3	79

Le taux de réponse élevé (cf. tableau 1) nous a permis de réunir 702 questionnaires (dont 113 pour le test sur les 4 premières églises).

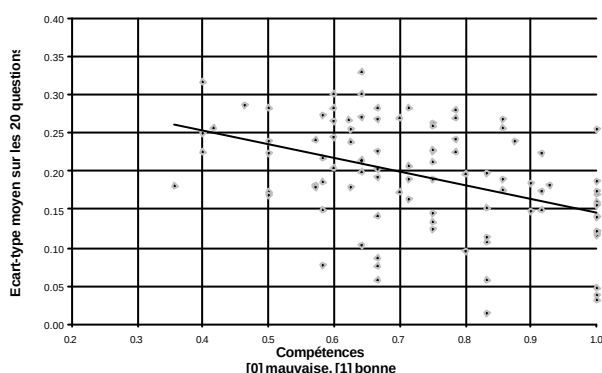
Compétence

Le choix délibéré de notre étude était de se baser sur l'avis des utilisateurs qui ne possèdent généralement pas de connaissances particulières dans le domaine de l'acoustique (en fait dans presque toutes les églises le directeur du chœur paroissial et/ou l'organiste font partie des réponses reçues). L'utilisation d'un groupe fixe de personnes formées en acoustique pour apprécier les diverses églises nous semble en effet non seulement partial (avis préconçu d'une bonne acoustique pour une

église) mais également artificiel (méconnaissance des pratiques spécifiques à chaque église) et impraticable sur un grand nombre d'églises.

En fait les fidèles interrogés se jugent généralement compétents pour répondre aux questions posées (l'auto-jugement des compétences est de 0.74 ± 0.18 sur une échelle de 0 (incompétent) à 1 (très compétent)). Nous avons vérifié cette affirmation en constatant que l'écart-type moyen des réponses aux questions diminue si la compétence moyenne par église augmente (cf. graphique 1)

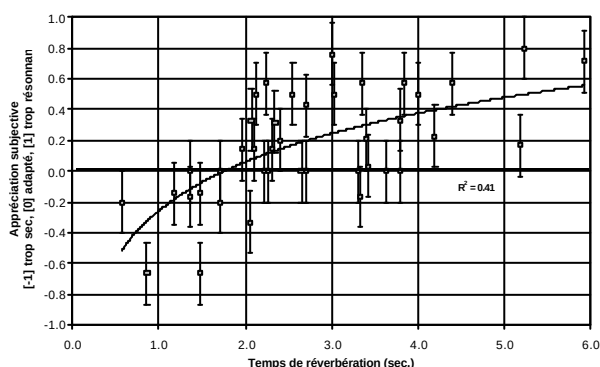
Graphique 1: Moyenne des écarts-types sur les 20 questions en fonction de la compétence subjective moyenne pour chaque église.



Appréciation subjective de la réverbération

Le temps de réverbération est assurément la grandeur physique la plus importante pour caractériser l'acoustique d'une salle. Nous avons ainsi interrogé les paroissiens sur leur perception subjective de la "résonance" de leur église.

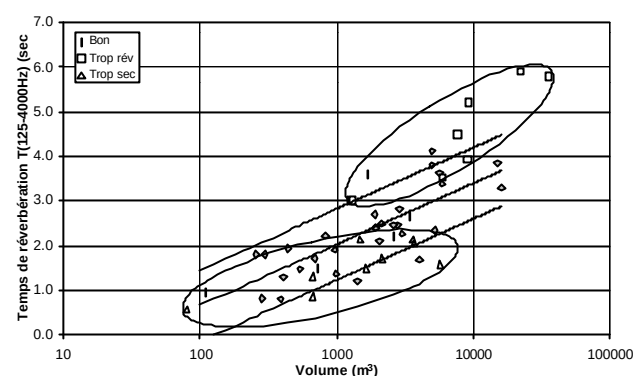
Graphique 2: Résonance subjective en fonction du temps de réverbération (église vide) Tr (125 – 4kHz). Les barres d'erreurs (ici pour $n > 6$) correspondent à un intervalle de confiance de 60%.



Le graphique 2 met en évidence que les églises sont jugées trop réverbérantes dès 2 sec. et que les églises sont rarement jugées trop sèches.

Les églises sont généralement perçues comme trop réverbérantes lorsqu'elles ont un Tr de plus de 2.8 sec. et que leur volume dépasse 2000 m³ (cf. graphique 3).

Graphique 3: Appréciation subjective du temps de réverbération (église vide) en fonction du volume



Elles sont parfois ressenties comme trop sèches lorsque $Tr < 2.8$ sec. L'évolution de la zone considérée comme "bonne" suit l'équation suivante (église vide):

$$(1) \quad Tr_{(vide)} = 1.37 \log(V) - 2.1 \pm 0.8 \quad R^2 = 0.61$$

$$(1b) \quad Tr_{(plein)} = 1.24 \log(V) - 2.5 \pm 0.6 \quad R^2 = 0.71$$

L'expression du Tr souhaitable selon une fonction en puissance du volume [Hartmann] ne permet pas d'augmenter significativement le coefficient de détermination (R^2):

$$(2) \quad Tr_{(Bon)} = 0.25 V^{0.29} \pm 0.8 \quad R^2 = 0.61$$

La plage de ± 0.8 autour de la valeur optimum moyenne pour un volume donné correspond à l'écart de temps de réverbération qui englobe la majorité des églises dont la «résonance» est jugée subjectivement comme «bonne». Notons cependant que cette plage englobe également plusieurs églises jugées trop sèches et 2 églises trop réverbérantes.

Ces équations peuvent être utilisées (avec une certaine prudence) pour déterminer le temps de réverbération souhaitable pour une église.

Tableau 2: Temps de réverbération optimum en fonction de V

Vol. (m ³)	Tr selon Zeller (église pleine)	Tr selon Hartmann (église vide)	Tr selon formule (1) (église vide)
1'000	1.3 ± 0.3	1.5 ± 0.2	2.0 ± 0.8
5'000	1.7 ± 0.5	3.1 ± 0.5	3.0 ± 0.8
10'000	1.9 ± 0.6	4.2 ± 0.6	3.4 ± 0.8

La comparaison de nos résultats avec diverses études similaires (cf. tableau 2) montre que Hartmann (étude sur 16 églises [Hartmann]) préconise un Tr plus faible que notre étude pour de petits volumes mais plus grand pour de grands volumes. Les conclusions sont sensiblement équivalentes pour les églises de taille moyenne (4800 m³ selon [Desarnaulds]).

L'étude de Zeller (étude sur 37 églises [Zeller]) donne des valeurs de Tr pour des églises pleines légèrement inférieures à celles de notre étude ($Tr=1.2$; 2.1 et 2.5 s. pour les volumes de 1000, 5000 et 10000 m³, cf. (1b)). Pour mieux comprendre l'appréciation subjective globale de la «résonance» d'une église, il faut effectuer une distinction selon les différentes utilisations.

Distinction selon l'utilisation

Les quatre sources sonores les plus utilisées dans les églises en Suisses sont:

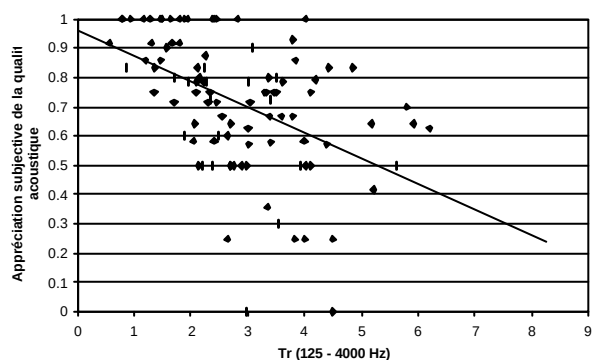
- la parole (lecture, prédication, prières, liturgie)
- l'orgue (prélude, interlude, postlude, concerts)
- le chant (de l'assemblée et/ou du chœur, concerts)
- les concerts (instrumentaux)

Comme nous l'avons vu en introduction, chaque utilisation pose des contraintes spécifiques sur le choix du temps de réverbération, mais aussi sur d'autres paramètres comme la disposition des sièges. Une acoustique parfaitement adaptée à la musique d'orgue ne pourra pas être bonne simultanément pour la voix parlée et réciproquement. Il s'agit donc de trouver un compromis qui tienne compte le mieux possible de l'utilisation de l'église (par exemple type de liturgie, nombre de concerts).

Nous avons étudié en premier lieu l'adéquation du temps de réverbération et de l'acoustique en général des églises par rapport à la parole:

On vérifie bien (cf. graphe 4) que l'adéquation de l'acoustique pour la parole décroît lorsque le temps de réverbération augmente. On constate cependant que qu'un même temps de réverbération peut entraîner une large dispersion des réponses. A côté de la réverbération, d'autres facteurs (comme la distance à la source, échos, bruit de fond) influencent l'intelligibilité de la parole.

Graphe 4: Appréciation subjective de la qualité acoustique pour la parole en fonction du temps de réverbération ([0] = mauvais, [1] = bon)



Ainsi lorsque l'on tient compte du volume, la distinction entre églises satisfaisantes et insatisfaisantes pour la parole devient plus claire (cf. graphe 5). Une acoustique est toujours jugée satisfaisante pour la parole lorsque le temps de réverbération est inférieur à 2 sec. et que le volume est inférieur à 1000m3. Si l'une de ces conditions n'est pas respectée l'acoustique est généralement considérée comme insatisfaisante pour la parole.

Les églises satisfaisantes (pour $V < 1000 \text{ m}^3$) suivent la courbe (en gras) donnée par:

$$(3) \quad Tr = 1.49 \log(V) - 2.55 \quad \text{avec } R^2 = 0.8$$

Sur le graphe 5 les lignes en trait fin sont les Tr maximum et Tr minimum déterminé par la formule (1). Une comparaison numérique (cf. tableau 2) montre que

les valeurs optimales pour la parole sont très proches (légèrement inférieures) à celles trouvées pour l'appréciation générale.

Graphe 5: Adéquation du temps de réverbération par rapport à la parole en fonction du volume

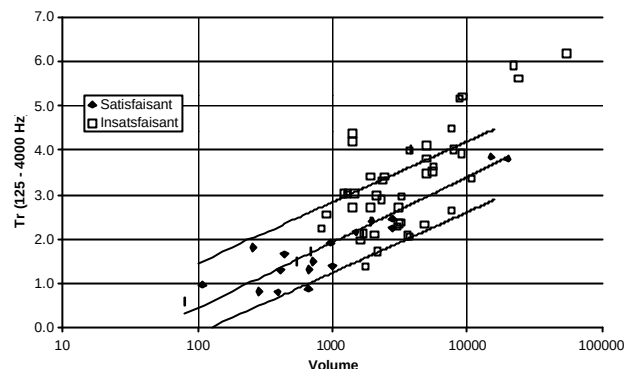


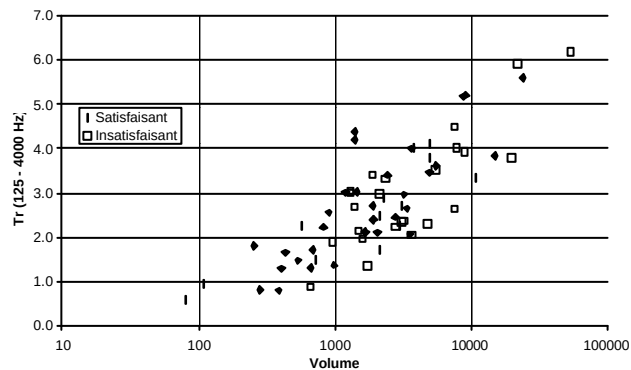
Tableau 2: Tr optimal (église vide) en fonction du volume

Volume (m^3)	Tr optimal pour la parole (3) (sec.)	Tr optimal en général (1) (sec.)
1000	1.9	2.0
5000	(2.9)	3.0
10000	(3.4)	3.4

Le fait que les paroissiens aient tendance à trouver l'acoustique d'une église insatisfaisante pour la parole lorsque le volume est grand, et ce indépendamment du Tr , peut s'expliquer par une distance à la source qui devient importante à quoi s'ajoute parfois la présence d'écho tardif par un plafond. On constate ainsi souvent l'existence, dans les grandes églises, d'une chaire au milieu de la nef et d'une incontournable sonorisation.

Du point de vue acoustique, si l'on veut donner la priorité à l'intelligibilité de la parole (comme cela semble être la tendance dans les églises paroissiales depuis le concile Vatican II), nous pouvons conclure qu'il faut disposer d'une église de faible dimension ($< 1000 \text{ m}^3$) dont le Tr se situe sous la barre des 2 sec.

Graphe 6: Adéquation du temps de réverbération par rapport au chant en fonction du volume



On peut tirer des conclusions analogue lorsque l'on veut favoriser le chant, cette fois le temps de réverbération limite est d'environ 2.6 s. Au dessus on

ne peut distinguer entre conditions satisfaisantes et insatisfaisantes (cf. graphe 6). En ce qui concerne les résultats pour la musique d'orgue et les concerts, les églises jugées satisfaisantes ne peuvent être isolées de celles jugées insatisfaisantes (cf. graphe 7). Une méthodologie différente semble préférable pour l'évaluation de la musique dans les églises [Carvalho]. D'après ce qui précède, il semble que l'appréciation subjective de la résonance d'une église est essentiellement influencée par le jugement de l'adéquation du lieu pour la parole.

Pour vérifier cette hypothèse, nous avons étudié les corrélations entre l'appréciation générale de l'acoustique d'une église et les diverses appréciations subjectives spécifiques ainsi qu'avec les grandeurs objectives mesurées.

Corrélations

Cette analyse confirme (cf. tableau 3) que l'appréciation générale de l'acoustique est fortement liée au jugement de l'adéquation pour la parole puis dans une moindre mesure pour le chant. Ces deux utilisations, les plus importantes dans le déroulement d'un office religieux, sont logiquement privilégiées par les fidèles. Les autres corrélations (orgue, concert) sont un peu plus faibles. Notons enfin que l'appréciation générale de l'acoustique est corrélée négativement à l'appréciation de la résonance de l'église. Ceci s'explique par le fait que lorsque le Tr augmente, l'intelligibilité de la parole diminue. L'intelligibilité de la parole est plus facile à apprécier que les autres utilisations pour lesquelles les paroissiens ont moins de points de référence.

Table 3 : Corrélation entre appréciation spécifique et générale

Appréciation subjective spécifique pour	Appréciation générale de l'acoustique
la parole	0.75
le chant	0.56
la musique d'orgue	0.34
les concerts	0.42
la résonance	-0.55

Si on réalise une analyse combinée entre les différentes appréciations subjectives spécifiques (nommées S_{parole} , S_{chant} etc. ci-dessous) qui maximise la corrélation (0.87) avec l'appréciation générale ($S_{\text{général}}$), on trouve:

$$(4) \quad S_{\text{général combiné}} = 1.113 \times S_{\text{parole}} + 0.301 \times S_{\text{chant}} + 0.480 \times S_{\text{orgue}} + 0.122 \times S_{\text{concert}}$$

Là encore, la parole se révèle être le facteur déterminant pour l'obtention d'une bonne acoustique.

Les corrélations entre l'appréciation générale de l'acoustique et les grandeurs objectives mesurées sont étonnamment faibles (-0.25 pour Tr, -0.35 pour la hauteur et -0.14 seulement pour le volume). Les corrélations les plus fortes sont avec la hauteur et le Tr (en particulier sa valeur à 2 kHz). Si l'on admet, sur la base de ce qui précède, que la parole est le facteur principal qui influence la perception subjective de la

qualité acoustique d'une église, il n'est pas étonnant que les fréquences les plus importantes pour l'intelligibilité soit celles qui influence le plus l'appréciation subjective.

Bien qu'il soit reconnu que la qualité acoustique d'une église ne dépende pas uniquement de son temps de réverbération, les analyses combinées basées sur les paramètres objectifs (volume, hauteur, Tr et volume spécifique) ne permettent pas d'augmenter significativement la détermination (R^2).

Rappelons finalement que l'appréciation générale est plus fortement corrélée à la hauteur de l'église qu'à son volume. La hauteur semble être un paramètre très important pour l'appréciation subjective de diverses grandeurs acoustiques (cf. tableau 4). Elle devrait être limitée pour ne pas affaiblir l'intelligibilité de la parole (écho tardif, augmentation de la réverbération).

Table 4 : Corrélation entre appréciation spécifique et hauteur

Résonance	0.51
Acoustique parole	-0.50
Niveau sonore	-0.47
Intelligibilité	-0.65
Echos gênants	-0.42

Conclusion

Notre étude a montré que l'appréciation subjective de la résonance d'une église et de sa qualité acoustique en général dépendait essentiellement, pour des paroissiens, de son adéquation pour la parole (devenue la préoccupation prioritaire des fidèles conformément à l'évolution de la liturgie) et le chant. Les conditions souhaitables pour ces utilisations sont de faibles valeurs pour la hauteur, le volume (<1000m³) et le temps de réverbération (<2 s parole, <2.6 s. pour le chant).

Cette étude nous a amenés à déterminer en fonction du volume des valeurs de temps de réverbération souhaitable dans les églises actuelles (formules (1) et (2)) afin que l'acoustique soit considérée comme bonne par une majorité des paroissiens. Les valeurs calculées représentent un compromis moyen entre une intelligibilité satisfaisante de la parole et une ambiance liturgique.

Entre la salle de conférence et un lieu pour le chant grégorien, chaque église doit trouver le meilleur compromis en fonction de ses utilisations spécifiques.

Références

- Raes, A. C.** (1964). *Isolation sonore et acoustique architecturale*. Ed. Chiron, Paris.
- Zeller, W.** (1960). *Zur raumakustischen Gestaltung von Kirchen*. *Lärmbekämpfung* Vol 4(4), pp. 80-84.
- Hartmann, G.** (1982). *Über den optimalen Nachhall in kleinen bis mittelgrossen Kirchen*. *Applied acoustics* Vol.15, pp. 41-48.
- Desarnaulds, V., S. Bossoney, et al.** (1998). *Studie zur Raumakustik von schweizer Kirchen*. DAGA 1998, Zürich, pp. 710-711.
- Carvalho, A.P.O. et al** (1997), *Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches*. *Building Acoustics*, 1997. 4(1): p. 1-20.