

DE L'ACOUSTIQUE DES EGLISES EN SUISSE - UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE

THÈSE N° 2597 (2002)

PRÉSENTÉE À LA FACULTÉ ENVIRONNEMENT NATUREL, ARCHITECTURAL ET CONSTRUIT

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES

DANS LE DOMAINE DE L' ARCHITECTURE

PAR

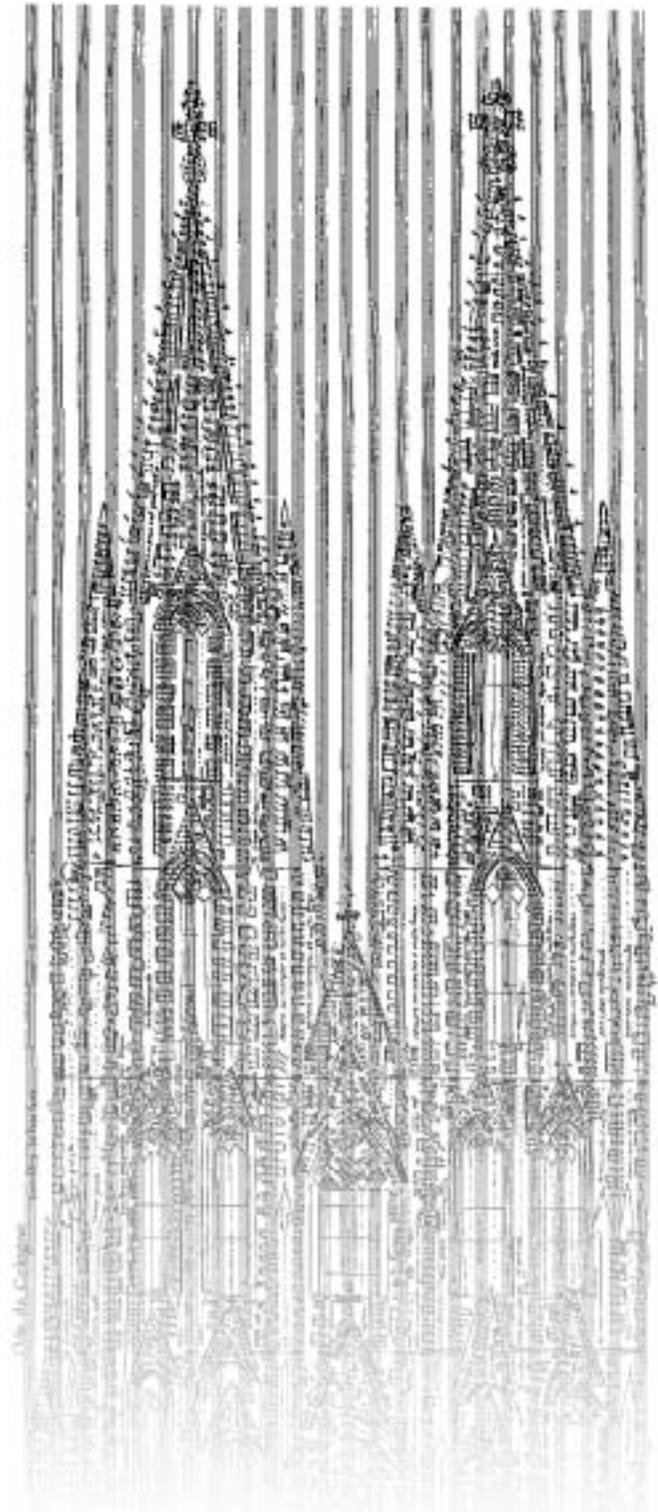
Victor DESARNAULDS

ingénieur physicien diplômé EPF
de nationalité suisse et originaire de Thônex (GE)

acceptée sur proposition du jury:

Prof. C. Morel, directeur de thèse
Prof. A. Carvalho, rapporteur
Prof. G. Cassina, rapporteur
Prof. M. A. Luy, rapporteur
Prof. S. Malfroy, rapporteur
Prof. B. Reymond, rapporteur

Lausanne, EPFL
2002



De l'acoustique des églises en Suisse Une approche pluridisciplinaire

Thèse de doctorat
Victor Desarnaulds

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, 2002

Résumé

Le rappel du conflit fondamental dans les églises entre les conditions acoustiques souhaitables pour la musique et pour l'intelligibilité de la parole introduit cette thèse qui aborde le sujet non seulement sous l'aspect acoustique mais aussi historique, théologique, musicologique et architectural.

Cette recherche étudie, en premier lieu, comment, au cours de l'histoire, la liturgie et les caractéristiques acoustiques et organisationnelles des églises ont favorisé l'un ou l'autre de ces pôles. Le deuxième chapitre présente aussi les résultats de l'analyse objective de plusieurs cultes réformés et messe catholiques qui permettent de dégager les conditions et exigences actuelles des célébrations en Suisse.

L'analyse des paramètres géométriques (volume, hauteur, etc.) et des résultats de mesurages acoustiques (réverbération, bruit de fond et intelligibilité) d'environ deux cents églises en Suisse permet d'en décrire statistiquement les caractéristiques et de vérifier objectivement les hypothèses émises au chapitre précédent. Le chapitre 3 étudie également la portée locale ou globale des conclusions par la confrontation des résultats obtenus en Suisse avec ceux publiés dans d'autres pays (synthèse de 400 églises).

L'étude de l'interaction entre la liturgie et l'acoustique passe notamment par l'examen de l'histoire de la musique sacrée mais surtout par l'analyse des principaux moyens mis en œuvre pour améliorer l'acoustique des églises. Le chapitre 4 présente ainsi l'étude de l'évolution historique et de l'efficacité de deux types de dispositifs acoustiques utilisés dans les églises, d'une part les vases acoustiques, et d'autre part les chaires et abat-voix.

La position des divers intervenants n'influence pas seulement les conditions d'écoute mais elle révèle également l'importance accordée à leur participation. Le chapitre 5 se penche alors sur l'évolution historique et l'analyse statistique des conditions actuelles de la position de l'orgue et de la disposition de l'assemblée dans les églises, ainsi que l'effet de l'occupation sur la réverbération et l'intelligibilité.

Le chapitre 6 conclut par l'analyse des conditions acoustiques souhaitables dans les églises actuelles, notamment en ce qui concerne les options architecturales, organisationnelles (sonorisation, disposition de l'assemblée et position de l'orgue) et les grandeurs acoustiques (temps de réverbération, bruit de fond et intelligibilité). Cette dernière analyse se base d'une part sur une importante synthèse bibliographique et d'autre part sur la mise en relation, pour les églises recensées, des résultats de mesurages avec les évaluations subjectives, obtenues sur la base d'une large enquête auprès des paroissiens.

Zusammenfassung

Einleitend wird der fundamentale Gegensatz zwischen den für die Musik auf der einen und für eine gute Sprachverständlichkeit auf der andern Seite wünschbaren akustischen Eigenschaften in Erinnerung gerufen. In dieser Dissertation wird das Thema aber nicht nur aus akustischer Sicht angegangen, sondern auch unter historischen, theologischen, musikwissenschaftlichen sowie architektonischen Aspekten.

Die Forschungsarbeit untersucht in erster Linie, wie die Liturgie sowie die akustischen Eigenschaften und die Einrichtung der Kirchen im Lauf der Geschichte den einen oder andern Pol - Musik oder gesprochene Sprache - begünstigten. Im zweiten Kapitel werden auch die Resultate objektiver Analysen von protestantischen Gottesdiensten und katholischen Messen vorgestellt, aus denen die heutigen Anforderungen und Bedingungen von Gottesdiensten in der Schweiz hervorgehen.

Die Analyse der geometrischen Parameter (Volumen, Höhe, etc.) und der Resultate von akustischen Messungen (Nachhallzeit, Grundgeräusch und Verständlichkeit) von etwa 200 Kirchen in der Schweiz erlaubte es, deren Eigenschaften statistisch zu beschreiben und die im vorangehenden Kapitel aufgestellten Thesen objektiv zu verifizieren. Kapitel 3 untersucht dann die lokale oder globale Anwendbarkeit dieser Resultate, wobei Studien, die in anderen Ländern publiziert wurden und die auf insgesamt über 400 Kirchen basieren, zum Vergleich herangezogen werden.

Das Studium der Interaktion zwischen Liturgie und Akustik führt über die Beschäftigung mit der Geschichte der geistlichen Musik und vor allem über die Analyse der wichtigsten Massnahmen, welche zur Verbesserung der Akustik in Kirchen angewendet wurden. Kapitel 4 präsentiert deshalb die Untersuchungen zur historischen Entwicklung und zur Wirksamkeit von zwei in Kirchen verbreitet eingesetzten akustischen Vorrichtungen, nämlich von Schalltöpfen sowie von Kanzeln und Kanzeldeckeln.

Der Ort und die mehr oder weniger prominente Anordnung der verschiedenen Akteure beeinflusst nicht nur die Hörbedingungen, sondern gibt auch einen Hinweis auf die Bedeutung, die ihrer Mitwirkung im Gottesdienst beigemessen wurde. Das Kapitel 5 befasst sich deshalb mit der historischen Entwicklung und der statistischen Analyse der heutigen Bedingungen bei der Position der Orgel und der Anordnung der Gemeinde in den Kirchen, sowie mit den Auswirkungen der Belegung auf die Nachhallzeit und die Sprachverständlichkeit.

Kapitel 6 analysiert die für heutige Kirchen wünschbaren akustischen Eigenschaften, vor allem in Bezug auf die architektonischen Optionen und die mögliche Auslegung (Beschallung, Anordnung der Gemeinde und Position der Orgel) sowie die akustischen Grössen (Nachhallzeit, Grundgeräuschpegel und Verständlichkeit). Diese Analyse stützt sich nicht nur auf eine umfassende Literaturstudie, sondern vor allem auf die in den untersuchten Kirchen gefundenen Zusammenhänge zwischen den Messresultaten und der subjektiven Beurteilung durch die Kirchgänger, wie sie aus einer umfangreichen Befragung entnommen werden konnte.

Abstract

The existence of the fundamental conflict in churches between the desirable acoustic conditions for music and for speech intelligibility prompted this dissertation. It tackles the subject not only under the acoustical perspective but also in the historical, theological, musicological and architectural aspects.

This research studies, initially, how during the past, the liturgy, the acoustical and organizational characteristics of churches supported one or the other of these attributes. The second chapter presents the objective analyses of many Reformed worships and Catholic masses which make it possible to show the conditions and requirements for the current Christian celebrations in Switzerland.

The analysis of the church geometrical parameters (volume, height, etc.) and of the results of objective acoustical measurements (reverberation time, background noise and speech intelligibility) of approximately two hundred churches in Switzerland allows to statistically describe their characteristics and to objectively verify the assumptions made in the preceding chapter. Chapter 3 also studies the local or global range of conclusions by the comparison of the results obtained in Switzerland with those published for other countries (synthesis of about 400 churches).

The study of the origin and the interaction between Liturgy and Acoustics passes in particular by the analysis of the history of sacred music but especially by the examination of the main methods implemented to improve the acoustics of churches. Chapter 4 presents the historical evolution and the acoustical effectiveness of two types of devices used in churches: acoustic pots and pulpits with their canopies.

The position of the various participants does not influence only the listening conditions but also reveals the importance attached to their participation. Chapter 5 examines then the historical evolution and statistical analysis of the current conditions regarding the position of the organ, the spatial arrangements for the seated congregation in churches, as well as the effect of the occupation on reverberation time and speech intelligibility.

Chapter 6 concludes with the analysis of the desirable acoustical conditions in current churches, particularly with regard to the architectural, organizational (sound system, assembly arrangement and organ location) and the acoustical parameters (reverberation time, background noise and speech intelligibility). This last analysis is based on a significant bibliographical synthesis and on the comparison, for the sampled churches, of the results for objective measurements with the subjective evaluations obtained by a parishioner's sample survey.

Table des matières

1.	INTRODUCTION.....	1
1.1	INTELLIGIBILITÉ ET AFFECTIVITÉ DANS LE CULTÉ	1
1.2	L'ÉGLISE COMME REFLET DE LA COMMUNAUTÉ.....	2
1.3	DIVERGENCES DE BESOINS ACOUSTIQUES ENTRE PAROLE ET MUSIQUE ..	2
1.4	NÉCESSITÉ D'UNE APPROCHE PLURIDISCIPLINAIRE	4
1.5	PLAN DE L'ANALYSE	4
1.5.1	Evolution de la conception théologique du culte	4
1.5.2	Analyse statistique des résultats de mesurages acoustiques	5
1.5.3	Dispositifs acoustiques	5
1.5.4	Occupation de l'espace.....	5
1.5.5	Conditions acoustiques souhaitables.....	6
1.6	BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 1	7
2.	SURVOL HISTORIQUE	8
2.1	INTRODUCTION.....	8
2.2	ORIGINE ET FONDEMENT THÉOLOGIQUE DU CULTÉ	8
2.2.1	Le culte païen	8
2.2.2	Le judaïsme des temps bibliques.....	9
2.2.3	L'Église chrétienne primitive	11
2.3	SURVOL HISTORIQUE DE LA LITURGIE CHRÉTIENNE.....	12
2.3.1	Les trois premiers siècles	12
2.3.2	L'église triomphante, de la paix constantinienne au Moyen Âge	14
2.3.3	Renaissance, Réforme et Contre-Réforme.....	23
2.3.4	Du siècle des Lumières au néoclassicisme	34
2.3.5	L'époque contemporaine (seconde moitié du XXe siècle)	42
2.3.6	Synthèse du survol historique	50
2.4	ANALYSE DES LITURGIES ACTUELLES	52
2.4.1	Introduction	52
2.4.2	Méthodologie	52
2.4.3	Analyse	53
2.4.4	Conclusion	59
2.5	BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 2.....	61
3.	ANALYSE STATISTIQUE	65
3.1	INTRODUCTION.....	65
3.1.1	Vérification objective des hypothèses.....	65
3.1.2	Analyse bibliographique.....	65
3.2	SITUATION EN SUISSE	65
3.2.1	Exposé de la démarche	65
3.2.2	Méthodologie	66

3.2.3	Caractéristiques géométriques	68
3.2.4	Temps de réverbération.....	72
3.2.5	Bruit de fond	85
3.2.6	Intelligibilité de la parole.....	87
3.2.7	Synthèse de l'analyse statistique des églises en Suisse	93
3.3	COMPARAISON INTERNATIONALE	95
3.3.1	Introduction	95
3.3.2	Méthodologie	95
3.3.3	Analyse	96
3.3.4	synthèse de la comparaison internationale.....	104
3.4	BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 3.....	105
4.	DISPOSITIFS ACOUSTIQUES DANS LES EGLISES.....	107
4.1	INTRODUCTION.....	107
4.1.1	Une liturgie adaptée à l'acoustique ?	107
4.1.2	Influence de l'acoustique sur la musique sacrée	107
4.1.3	Une acoustique adaptée à la liturgie?.....	110
4.2	VASES ACOUSTIQUES	111
4.2.1	Aspect historique	111
4.2.2	Analyse théorique	119
4.2.3	Résultats expérimentaux	131
4.2.4	Mesurages in situ.....	153
4.2.5	Conclusion sur les vases acoustiques	161
4.3	CHAIRES ET ABAT-VOIX.....	163
4.3.1	Introduction	163
4.3.2	Evolution historique	163
4.3.3	Analyse statistique des chaires en Suisse	175
4.3.4	Efficacité	177
4.3.5	Conclusion de l'étude des chaires	193
4.4	BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 4.....	194
5.	OCCUPATION DE L'ESPACE	199
5.1	INTRODUCTION.....	199
5.2	LA POSITION DE L'ORGUE COMME RÉVÉLATEUR DE LA PLACE DE LA MUSIQUE	199
5.2.1	Introduction.....	199
5.2.2	Survol historique	200
5.2.3	Analyse statistique de la position des orgues	210
5.3	LES SIÈGES COMME RÉVÉLATEURS DE LA LITURGIE.....	211
5.3.1	Introduction	211
5.3.2	Evolution historique	212
5.3.3	Analyse statistique de la disposition des fidèles	221
5.4	INFLUENCE DE L'OCCUPATION SUR L'INTELLIGIBILITE	225

5.4.1	Introduction	225
5.4.2	Les divers effets de l'occupation sur l'intelligibilité	225
5.4.3	Mesurages	226
5.4.4	Analyse	227
5.4.5	Modèles de calcul	236
5.4.6	Synthèse sur l'effet de l'occupation	240
5.5	BIBLIOGRAPHIE CHAPITRE 5	241
6	CONDITIONS ACOUSTIQUES SOUHAITABLES	243
6.1	INTRODUCTION.....	243
6.2	MÉTHODOLOGIE	244
6.2.1	Etude historique et bibliographique.....	244
6.2.2	Enquête	244
6.3	APPRÉCIATION GLOBALE DE L'ACOUSTIQUE.....	247
6.4	SPÉCIFICATIONS ARCHITECTURALES.....	248
6.4.1	Volume et volume spécifique	248
6.4.2	Forme et matérialisation	250
6.5	TEMPS DE RÉVERBÉRATION	258
6.5.1	Etude bibliographique	258
6.5.2	Enquête	262
6.6	AUTRES PARAMÈTRES ACOUSTIQUES	270
6.6.1	Bruit de fond	270
6.6.2	Intelligibilité	273
6.6.3	Sonorisation.....	278
6.7	DISPOSITION DE L'ASSEMBLÉE	282
6.7.1	Approche pluridisciplinaire.....	282
6.7.2	Résultats de l'enquête	286
6.8	POSITION ET ACOUSTIQUE POUR L'ORGUE.....	287
6.8.1	Position de l'orgue	287
6.8.2	Conditions acoustiques souhaitables pour l'orgue.....	300
6.9	CONCLUSION	309
6.9.1	Conditions souhaitables.....	309
6.9.2	Une nécessaire collaboration.....	310
6.10	BIBLIOGRAPHIE DU CHAPITRE 6.....	312

REMERCIEMENTS

ANNEXES

- A) Liste des publications, conférences et interviews de l'auteur dans le domaine de l'acoustique des églises
- B) Vases acoustiques dans les églises en Suisse
- C) Liste des symboles utilisés
- D) Questionnaire pour l'appréciation subjective de l'acoustique des églises

CURRICULUM VITAE DE L'AUTEUR

1. INTRODUCTION

Les églises représentent un patrimoine architectural unique, témoin, laissé dans la pierre, de l'art de bâtir des croyants au cours des siècles. De la classique croix latine à la forme en éventail des temps modernes, de la petite chapelle à la grande cathédrale, de l'abbaye romane au centre œcuménique, les églises présentent d'innombrables variations de formes, de volumes, et d'utilisations différentes. Le témoignage de ces édifices n'est cependant pas uniquement architectural, il représente également l'évolution de la foi et du culte chrétien au cours des âges.

L'audition est assurément un des sens principaux pour la perception et la communication dans le culte chrétien¹. Elle permet non seulement de comprendre la Parole, lue et commentée, qui est don du Dieu révélé, mais également de célébrer en musique ce Dieu transcendant. L'approche de la foi partagée, du culte célébré, peut donc se faire de diverses façons qui peuvent être complémentaires et non exclusives. Le culte chrétien, comme les célébrations d'autres religions, peut solliciter l'être tout entier et en particulier l'intelligence et l'affectivité, ou plus schématiquement la tête et le cœur.

1.1 Intelligibilité et affectivité dans le culte

L'approche intellectuelle de la foi en général, et du culte en particulier, nécessite essentiellement de comprendre un message et approfondir sa connaissance du Dieu révélé dans le Verbe fait chair. L'outil en est la théologie et le moyen, le travail de l'esprit. Dans cette approche, la participation au culte est centrée sur des contenus intelligibles, et la compréhension de la parole est assurément l'élément essentiel. Le christianisme est en effet une religion du Verbe, ce qui fait dire à Leenhard [1] que "l'église est le lieu de la Parole" qui y est proclamée, commentée et écoutée. Cette dimension verbale du culte culmine dans la prédication, lieu par excellence de l'enseignement, de la transmission, de l'explication intelligible de la Parole écoutée, et de l'exhortation à affermir sa foi dans le Dieu révélé. Elle est le reflet d'une ecclésiologie de l'adhésion au Christ par l'écoute de la Parole.

La Parole de Dieu peut cependant être également chantée et illustrée musicalement. Par opposition (ou complémentarité) à l'approche intellectuelle, on peut aborder le culte par une approche plus sensitive, où Dieu est perçu, expérimenté, dans la célébration, de façon privilégiée à travers le spectacle, la musique, l'ambiance que dégage la cérémonie. En effet "la musique est peut-être l'exemple unique de ce qu'aurait pu être - s'il n'y avait pas eu l'invention du langage, la formation des mots, l'analyse des idées - la communication des âmes" [2]. C'est ainsi que la musique se révèle tout à fait adaptée pour porter la louange et plus généralement la prière. Non seulement l'audition, mais tous les sens et particulièrement la vue contribuent à ce type d'approche qui privilégie la communion mystérieuse avec ce Dieu qui ne peut être pleinement cerné par les mots et par notre simple intelligence. Cette dimension affective et sensorielle, surtout centrée autour du mystère, culmine dans la célébration eucharistique. Elle est le reflet d'une ecclésiologie sacralisante.

¹ Selon la règle de Saint Benoît, pour bien voir, il faut d'abord écouter.

1.2 L'église comme reflet de la communauté

Le lieu de rassemblement de la communauté reflète non seulement l'organisation de cette communauté, mais également ses préoccupations. Le mot utilisé pour désigner ce lieu est déjà révélateur d'une certaine ecclésiologie². La liturgie³ (et les lieux où elle se déroule) est l'expression pratique de la théologie vécue en communauté (but du rassemblement), mais également de la composition même de la communauté (en particulier les distinctions et fonctions des ministères en son sein [3]. Nous pouvons ainsi affirmer avec Biéler que "l'édification du sanctuaire fait partie des œuvres par lesquelles la communauté rend visible et clair aux yeux de tous ce dont elle témoigne. Le soin que l'Église accorde donc à cette forme de son témoignage rend compte de façon parlante de la foi qui l'anime (...). Il faut que cet édifice, par sa disposition architecturale autant que par la force de l'art qui l'anime, soit une aide et une figure expressive des actes caractéristiques du culte qui y est célébré" [4]. En effet, "poser la question: comment faut-il bâtir, c'est poser la question de la liturgie et finalement du message même de l'Église" [5]. Une des contraintes ou caractéristiques du sanctuaire est sa capacité à propager un son. A la notion d'église est associée, consciemment ou non, l'idée d'une acoustique spécifique. L'acoustique est en effet très importante pour inciter (ou dissuader) à l'écoute attentive, à la concentration, au chant communautaire, ou au recueillement, à l'adoration.

1.3 Divergences de besoins acoustiques entre parole et musique

Or, du point de vue acoustique, il y a une divergence fondamentale entre les conditions souhaitables pour favoriser l'intelligibilité d'une part et l'affectivité d'autre part. La parole et la musique nécessitent en effet des durées de réverbération très différentes. Rappelons que la réverbération⁴, qui correspond à la prolongation d'un phénomène sonore après la fin de son émission, constitue l'élément principal pour caractériser l'acoustique d'une salle. La réverbération augmente principalement avec le volume et diminue avec la surface totale d'absorption⁵. Cette différence de besoins acoustiques entre parole et musique a été remarquée de longue date, ainsi Lachèz [6] affirmait en 1879, "Pour être facilement perçue, la parole doit arriver à l'organe de l'ouïe, simple et sans accompagnement, tandis que la voix chantée, les

² L'appellation du lieu de culte chrétien vient généralement de deux racines grecques, qui sont opposées du point de vue ecclésiologique. On trouve d'un côté le terme *ecclesia* (d'où viennent les mots église, *chiesa* en italien, *iglesia* en espagnol et *igreja* en portugais) qui veut dire assemblée convoquée, de l'autre *Kurios* (d'où viennent les mots *Kirche* en allemand, *church* en anglais ou *Kerk* en flamand) qui veut dire le seigneur, le chef.

³ Le mot liturgie vient du grec *leitourgia*, qui signifie service public puis service du culte. Par liturgie, on entend ainsi les divers actes et rites qui constitue le culte chrétien.

⁴ Le temps de réverbération d'un local est défini par la durée, exprimée en secondes, que met l'intensité d'un son, brusquement interrompu, pour diminuer de 60 dB (et devenir ainsi généralement inaudible).

⁵ La surface totale d'absorption correspond à la somme des surfaces de la salle multipliée par le coefficient d'absorption moyen de celles-ci.

sons musicaux, sont, la plupart du temps, plus agréables à entendre avec des accords et des accompagnements harmoniques provenant des résonances locales". En effet, pour obtenir une bonne compréhension de la parole, il faut une réverbération suffisamment courte pour éviter que la prolongation des sons, par de nombreuses réflexions faiblement atténuées, n'entraîne un chevauchement de ceux-ci et donc une difficulté de les distinguer⁶. Dans une acoustique réverbérante, les voyelles, qui possèdent une énergie importante, ont tendance à couvrir et masquer les consonnes, plus courtes et à des fréquences plus élevées. L'orateur devra alors parler lentement en posant sa voix et en évitant les trop grandes modulations vocales. Une acoustique assez sèche (avec une faible réverbération et donc une décroissance rapide des sons) permet au contraire d'obtenir une très bonne distinction entre les divers sons qui constituent la parole, qui sonnera alors de façon claire et intelligible. Cependant, si l'acoustique devient trop sèche, le niveau sonore peut devenir insuffisant et cela peut réduire la qualité de la voix⁷.

Au contraire, la musique nécessite une certaine réverbération pour s'exprimer pleinement. Celle-ci constitue la prolongation naturelle du son issu de l'instrument (voix, orgue ou instruments) et permet son épanouissement. Cette remarque s'applique tout particulièrement à l'orgue, qui ne possède pas de pédale permettant de prolonger le son comme dans le cas d'un piano, et dont l'émission du son s'arrête rapidement après le relâchement des touches. La réverbération, qui diminue également la localisation précise des sources sonores, peut contribuer à donner une ambiance plus enveloppante, plus émotionnelle, voire plus méditative à la célébration [9], en particulier si l'on ne voit pas la source musicale. Lorsque la réverbération est suffisante, l'auditeur se sent enveloppé par la musique qui peut s'épanouir dans tout le volume. Si la réverbération est trop courte, la musique apparaîtra comme sèche, étouffée, manquant de patine et de vie [10]. Le chant de l'assemblée sera également fortement préterité, car étouffé; chacun entendant surtout sa propre voix qui semblera pourtant disparaître aussitôt émise. La problématique devient cependant plus difficile encore lorsqu'on réalise que chaque type de musique demande une réverbération plus ou moins importante⁸. Ainsi dans une acoustique trop réverbérante, la musique, surtout si elle est rapide et complexe, peut manquer de clarté, et les paroles des chants chorals peuvent devenir inintelligibles.

Comme le résume très bien Raes, l'acousticien est confronté, dans le cas des églises, à trois exigences contradictoires. "L'orgue demande beaucoup de réverbération (pour des raisons esthétiques), le chant en demande modérément (pour des questions liturgiques), la prédication en demande peu (pour des raisons didactiques)" [12]. C'est donc une utopie de croire qu'un lieu conviendra aussi bien à la parole qu'à la musique. L'acoustique d'une église sera toujours le fruit d'un compromis entre ces conditions contradictoires.

⁶ Radau remarquait en 1867 [7] que "dans les églises, une résonance trop forte nuit beaucoup à la perception distincte de la parole; elle couvre la voix de l'orateur et la rend inintelligible. Dans une salle de concert, on ne s'en plaint pas; là, on cherche au contraire à augmenter la sonorité des murs".

⁷ Selon Jouhaneau [8], une acoustique trop sèche altère le rendu du timbre, l'ampleur, l'équilibre tonal et rend la voix dure et agressive.

⁸ Sur la base de tests psychoacoustiques, Kuhl [11] a déterminé par exemple que le temps de réverbération souhaitable pour la musique romantique ($Tr_{opt} = 2.1$ s pour la 4^e symphonie de Brahms) était nettement plus haut que celui adapté à la musique classique ($Tr_{opt} = 1.55$ s pour la 41^e symphonie de Mozart) ou moderne ($Tr_{opt} = 1.45$ s pour le Sacre de Stravinsky).

1.4 Nécessité d'une approche pluridisciplinaire

L'analyse acoustique des églises apparaît alors comme un moyen pertinent pour étudier indirectement et objectivement les approches du culte et les choix pratiques des chrétiens au cours des âges. Pratiquement, cela revient à se poser la question de savoir comment les préoccupations ecclésiologiques et liturgiques des chrétiens se sont traduites du point de vue acoustique dans les constructions qu'ils ont édifiées pour célébrer leurs cultes.

La réponse à cette question, qui passe par une évaluation technique au niveau acoustique mais également architectural, ne peut faire l'économie d'une réflexion plus large sur la liturgie, et sur son évolution au niveau de sa forme et de son contenu. Cela implique en particulier d'analyser le statut, sous toutes leurs formes, de la parole (lecture, prédication, liturgie parlée, etc.) et de la musique (liturgie chantée, chant de la schola, de l'assemblée, musique d'orgue et d'autres instruments, etc.). Enfin, l'histoire de l'art se révèle indispensable à l'étude des dispositifs utilisés pour améliorer les conditions acoustiques des églises (notamment les vases acoustiques, les chaires et leur abat-voix) ainsi qu'à l'analyse de l'organisation de l'espace (notamment au travers de l'étude des caractéristiques et de la position des sièges et de l'orgue).

La présentation de cette problématique montre alors clairement que la démarche se doit impérativement d'être pluridisciplinaire. L'étude de l'acoustique des églises concerne en effet non seulement des domaines techniques comme l'acoustique et l'architecture, mais également les sciences humaines avec la théologie, la musicologie et l'histoire de l'art. Cette large transdisciplinarité rend particulièrement difficile la rédaction d'un document cohérent, qui aborde, sans trop les cloisonner, les divers domaines concernés par cette thématique, sans toutefois tomber dans l'extrême vulgarisation. Afin de satisfaire les spécialistes de chacun des domaines concernés par notre étude, les résultats détaillés de nos recherches ont été présentés sous formes de nombreuses publications et conférences dans les domaines spécialisés (cf. annexe A). Ce rapport a pour objectif de rassembler ces diverses contributions, pour obtenir une vision plus large du sujet. Sa présentation relativement structurée vise à permettre au lecteur d'accéder à la fois à une information relativement précise dans les divers pôles d'intérêt, tout en ayant une ouverture sur les autres domaines connexes. Un effort de vulgarisation pour un large public a enfin été entrepris sous la forme de contributions dans les divers types de média (articles, interviews et reportages; cf. annexe A).

1.5 Plan de l'analyse

1.5.1 Evolution de la conception théologique du culte

Avant d'analyser et comprendre les différences entre les lieux de cultes chrétiens actuels (principalement issus du passé), il faut d'abord se demander quelle est l'origine et les enjeux théologiques des deux principaux types d'approches du culte chrétien (par l'intellect ou par les sens) et étudier comment, au cours de l'histoire, les théologiens d'une part, et les bâtisseurs d'églises d'autre part, ont privilégié l'un ou l'autre de ces pôles. Nous nous proposons donc d'étudier d'abord les origines du culte chrétien à partir de ses sources (paganisme, judaïsme et christianisme primitif) pour en comprendre la nature et les composantes, puis de faire un survol historique

de l'évolution de la conception théologique du culte et des contraintes acoustiques induites qui apparaissent dans la construction des édifices chrétiens au cours de l'histoire. Nous présenterons également les résultats d'une analyse objective de plusieurs cultes réformés et messe catholiques qui permettent de dégager les conditions et exigences actuelles des célébrations en Suisse.

1.5.2 Analyse statistique des résultats de mesurages acoustiques

Profitant de la richesse et de la variété, en Suisse, des églises (catholiques) et des temples (réformés) de diverses périodes de construction, nous confronterons ensuite les hypothèses et constatations formulées lors du survol historique à une analyse statistique des mesurages acoustiques effectués dans environ deux cents églises, telles que les transformations nous les font apparaître (et résonner) aujourd'hui. Cette analyse, qui portera en particulier sur les grandeurs géométriques (volume, hauteur, etc.) et les notions acoustiques fondamentales (réverbération, bruit de fond et intelligibilité), nous permettra de peser objectivement notre héritage historique. Les conclusions de cette analyse seront confrontées aux résultats de mesurages d'églises situées dans d'autres pays, afin d'étudier la portée locale ou globale de ces conclusions.

1.5.3 Dispositifs acoustiques

Il reste cependant souvent difficile, à partir de mesurages objectifs des conditions acoustiques actuelles des églises, de trancher sur l'origine et l'interaction des évolutions observées dans le domaine de la liturgie et de l'acoustique. L'évolution de la liturgie a-t-elle suivi celle de l'acoustique des églises ou au contraire l'acoustique s'est-elle adaptée à la liturgie ? La question peut porter non seulement sur la liturgie en général et son évolution entre les pôles d'intelligibilité et d'affectivité, mais également de façon plus particulière sur l'influence mutuelle entre l'acoustique et l'évolution du style de la musique sacrée. L'église n'est-elle cependant pas d'abord un lieu au service de la liturgie ? Quels ont été alors les moyens utilisés au cours des siècles pour modifier et améliorer l'acoustique d'une église ? Ces moyens sont-ils réellement efficaces ?

Pour donner des éléments de réponse à ces questions, nous étudierons les efforts délibérés des fidèles et des constructeurs pour améliorer l'acoustique de leurs églises. Nous analyserons ainsi l'histoire mais surtout l'efficacité des principaux dispositifs acoustiques utilisés dans les églises pour en améliorer les conditions acoustiques. L'étude portera d'une part sur les vases acoustiques, utilisés pour améliorer les conditions musicales, et d'autre part sur les chaires et abat-voix, mis en place pour améliorer l'intelligibilité de la parole.

1.5.4 Occupation de l'espace

La position et la mise en valeur des divers intervenants n'influencent pas seulement fortement les conditions d'écoute mais elles révèlent également l'importance qui leur est accordée. La position de l'orgue est ainsi révélatrice de la place et la fonction laissée dans une église à la musique. L'étude de l'évolution historique de la position de l'orgue sera complétée par une analyse statistique de leur nombre et de leur position actuelle dans les églises [13].

D'autre part, les sièges sont particulièrement révélateurs de choix ecclésiologiques. Les diverses positions des sièges dans les églises seront ainsi analysées du point de vue acoustique mais également et surtout au niveau liturgique [14]. L'étude de l'évolution historique de leur organisation et l'analyse statistique de leur disposition aujourd'hui nous permettra d'obtenir de précieuses indications sur les changements liturgiques et les tendances actuelles.

Pour des raisons pratiques, les mesurages acoustiques sont généralement effectués dans des églises vides. Or chacun a expérimenté les changements importants qu'entraîne l'occupation sur les conditions acoustiques. Il nous a apparu dès lors nécessaire d'étudier objectivement, sur la base de mesurages dans quelques églises occupées, l'influence de la présence de fidèles sur la réverbération et sur l'intelligibilité.

1.5.5 Conditions acoustiques souhaitables

Cette étude ne peut aborder le sujet de l'acoustique des églises sans se pencher sur la question concrète et capitale du point de vue du praticien des conditions acoustiques souhaitables dans les églises. La pluridisciplinarité qui a traversé cette étude se retrouve nécessairement dans les intervenants qui président à la définition des conditions souhaitables et à leur mise en œuvre.

Les conditions acoustiques souhaitables dans les églises font l'objet de diverses publications dont on a tenté de synthétiser les principaux résultats. Au vu de la diversité de ces recommandations et de leur manque généralisé de fondements scientifiques, nous avons entrepris de définir des conditions souhaitables sur la base de nos résultats de mesurages et d'évaluations subjectives de l'acoustique des églises recensées. Cette appréciation subjective a été évaluée en effectuant une enquête auprès des utilisateurs des églises ayant fait l'objet de mesurages acoustiques. La comparaison entre les appréciations subjectives et les résultats de mesurages objectifs permet de déterminer les conditions acoustiques souhaitables, notamment en ce qui concerne les options architecturales (volume, volume spécifique et hauteur), acoustiques (temps de réverbération en fonction de l'utilisation, bruit de fond et intelligibilité) et d'utilisation (sonorisation, disposition de l'assemblée et position de l'orgue). Les critères les plus pertinents, comme le temps de réverbération, et les plus discutés, comme la position de l'orgue, ont fait l'objet d'une analyse plus détaillée.

1.6 Bibliographie du chapitre 1

- [1] **Leenhardt, F. J.** (1978). *L'Eglise : questions aux protestants et aux catholiques*. Labor et Fides, Genève.
- [2] **Proust, M.** (1918). *A la recherche du temps perdu. A l'ombre des jeunes filles en fleurs*. Gallimard.
- [3] **Blaser, K.** (1990). *Une Eglise, des confessions*. Labor et Fides, Genève.
- [4] **Bieler, A.** (1961). *Liturgie et architecture. Le temple des chrétiens*. Labor et Fides, Genève.
- [5] **Senn, O.** (1958). *La construction d'églises contemporaines*. Cahier Protestant, pp. 3-11.
- [6] **Lachèz, T.** (1879). *Acoustique et optique des salles de réunions. Principes, observations et documents à considérer pour la disposition des salles de théâtres, amphithéâtres, concerts, temples et oratoires*. Chez L'auteur, Paris.
- [7] **Radau, R.** (1867). *L'acoustique ou les phénomènes du son*. Librairie Hachette et Cie, Paris.
- [8] **Jouhaneau, J.** (1997). *Acoustique des salles et sonorisation*. Lavoisier, Paris.
- [9] **Joyner, J. E.** (1993). *The impact of architecture on acoustical settings for sacred music in the Episcopal parish churches of Georgia*. Thesis in Architecture, Georgia Institute of Technology, USA.
- [10] **Bartholomew, W. T.** (1957). *Is your church dead or live?* Church management, Vol. March 57, pp. 19-20.
- [11] **Kuhl, W.** (1954). *Über versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit grosser Musikstudios*. Acustica, Vol. 4, pp. 618.
- [12] **Raes, A. C.** (1964). *Isolation sonore et acoustique architecturale*. Chiron, Paris.
- [13] **Desarnaulds, V.** (2000). *De la position des orgues dans les églises. Partie 1 : Survol historique*. La Tribune de l'Orgue, Vol. 52(1), pp. 18-26.
- [14] **Desarnaulds, V.** (1999). *Les sièges, empreintes de l'Eglise, révélateurs de la liturgie*. Bulletin du Séminaire de Culture Théologique, Vol. 11(1), pp. 15-22.

2. SURVOL HISTORIQUE

2.1 Introduction

L'acoustique d'une église ne peut être jugée bonne ou mauvaise de façon absolue. En effet, l'acoustique d'un lieu doit être essentiellement en adéquation avec son utilisation. Nous avons vu qu'une liturgie centrée sur la musique nécessite de préférence une acoustique généreuse et donc assez réverbérante pour se développer pleinement. En revanche, un culte principalement basé sur la parole demande, pour favoriser l'intelligibilité, une acoustique plutôt sèche. La place que la liturgie donne respectivement à la musique ou à la parole change ainsi fondamentalement les conditions acoustiques souhaitables de l'édifice dans lequel elle se déroule. La relation entre les conditions acoustiques très variables des lieux de culte que nous connaissons aujourd'hui en Suisse, mais qui sont issus de diverses périodes, et les besoins liturgiques de leur époque de construction, constitue l'analyse fondamentale de cette étude. Il apparaît dès lors comme central d'étudier, dans le cadre de cette analyse sur l'acoustique des lieux de culte, les changements, au cours des siècles, des besoins acoustiques de la liturgie chrétienne. Il s'agit donc de repérer, au fil des siècles, d'une part l'importance relative que la liturgie accorde à la parole et à la musique, et d'autre part la position qu'elle assigne aux intervenants. Parallèlement, l'étude des caractéristiques architecturales des églises au cours de l'histoire permet d'en définir les conditions acoustiques. Dans cette première partie, nous nous proposons donc d'effectuer un survol historique en tentant de mettre en relation l'évolution de la liturgie, les besoins acoustiques qui en résultent et les dispositions architecturales adoptées. Par souci de simplification, nous nous concentrerons sur l'origine et les enjeux théologiques de deux types d'approches du culte chrétien (par l'intellect ou par les sens) en étudiant comment, au cours de l'histoire, les théologiens d'une part, et les bâtisseurs d'églises d'autre part, ont privilégié l'un ou l'autre de ces aspects. Après avoir analysé les sources du culte chrétien (paganisme, judaïsme et christianisme primitif) pour en comprendre la nature et les composantes, nous étudierons les changements des conditions liturgiques et acoustiques durant 5 grandes périodes de l'histoire des Eglises chrétiennes. Les conditions liturgiques actuelles lors d'un culte réformé et lors d'une messe catholique feront enfin l'objet d'une étude particulière sur la base de l'analyse statistique de 16 célébrations.

2.2 Origine et fondement théologique du culte

2.2.1 *Le culte païen*

Comme le culte païen¹ (notamment oriental et gréco-romain) a influencé de manière ininterrompue la chrétienté, il est important d'en comprendre les principales caractéristiques.

¹ Nous nous limiterons ici aux religions pratiquées dans le bassin méditerranéen à la naissance de notre ère.

Dans ce type de piété, que l'on peut assimiler à une "religiosité naturelle", la communication des fidèles avec le dieu vénéré, représenté par une statue ou image située dans un lieu saint, demande la médiation d'une caste privilégiée et initiée, le clergé. Celui-ci effectue des rites et des sacrifices, qui "s'accompagnent d'une certaine pompe liturgique qui offre aux arts locaux visuels et auditifs de multiples occasions d'expression et de développement" [1]. Les particularités acoustiques de certains théâtres, utilisés parfois comme lieu de cérémonie, pouvaient encore accentuer cette mise en scène².

Le temple contient un lieu saint (sanctuaire où se trouve la représentation du dieu), un lieu rituel, où n'est admis que le clergé, et un lieu public. Comme les fidèles viennent *voir* les actes sacrés effectués par les prêtres, la principale contrainte du temple est d'ordre plutôt visuel. Les conditions acoustiques du temple doivent seulement contribuer à favoriser une certaine "ambiance liturgique". L'approche de la célébration religieuse païenne est donc essentiellement sensitive. Par ailleurs, les cultes à mystère [3], par exemple celui de Mythra, qui eurent un succès énorme dans le monde romain au début de notre ère, influencèrent également profondément les célébrations chrétiennes des premiers siècles.

2.2.2 *Le judaïsme des temps bibliques*

Pour comprendre certaines caractéristiques du christianisme, il faut connaître le milieu que fréquentait son fondateur, le juif Jésus, et en particulier les éléments principaux du culte juif à cette époque.

Le culte juif se différencie de celui des païens par le fait que leur Dieu, qui est unique, ne peut être représenté sous aucune forme³. Le Dieu à la parole créatrice⁴ ne peut être vu⁵, mais il se donne plutôt à entendre, "par l'intermédiaire d'êtres humains ordinaires⁶, à qui il adresse une parole immédiate et irrésistible" [1]. La présence de Dieu n'est cependant pas limitée en un lieu⁷, elle se manifeste et se révèle aussi à la communauté par le témoignage de sa parole (livres saints) et de la prière.

Le culte juif se déroule dans deux types d'édifice:

D'une part, **le Temple** de Jérusalem, unique lieu des sacrifices, qui garde cependant les caractéristiques du sanctuaire païen. On y distingue un lieu très saint (un cube vide⁸), un lieu saint⁹ pour le clergé et un parvis pour les fidèles (cf. Figure 1).

² Selon Liénard [2], la voix du prêtre positionné au centre géométrique du théâtre, revenait avec de nombreux retards issus des réflexions sur les contremarches circulaires, et était ainsi renforcée et prolongée dans le temps avec une accentuation particulière (augmentation aux harmoniques paires de 106 Hz et diminution aux harmoniques impaires de la même fréquence pour une profondeur usuelle des gradins de 80 cm). Pour les fidèles qui assistaient au "miracle", seul le prêtre, interrogeant les dieux depuis cette place, était à même d'interpréter leurs "réponses".

³ Cf. Ex 20,4; Dt 4, 15 et ss

⁴ Cf. Gn 1 et 2

⁵ Cf. Ex 33,20; ITim 6,16.

⁶ Cf. Dt 4,12 et 36; ISam 3,4; IRois 19,8-18; Ex 33,11

⁷ Cf. Jr 7:1-15

⁸ Cf. IRois 6,20. Le sanctuaire faisait 20 coudées (environ 10 m) de côté. Du point de vue acoustique, cette forme, qui induit des modes propres importants, amplifie de ce fait certaines fréquences.

⁹ Le lieu saint est décoré de nombreuses bandes d'étoffe en lin ou en laine (cf. Ex. 26) dont la longueur (mesurée horizontalement) dépasse largement le périmètre de telle façon qu'elles devaient pendre largement. Cet agencement, qui ne se justifie sûrement pas uniquement pour des raisons

Comme les temples païens, les contraintes de ce pôle sacrificiel sont plus visuelles qu'acoustiques. Les caractéristiques du Temple doivent favoriser une "ambiance sacrificielle", véritable symphonie des sens. A côté du spectacle odorant¹⁰ du sacrifice, on trouve une gestique particulière¹¹, des chants accompagnés par quelques instruments de musique¹² puis on mange dans certains cas une partie du sacrifice. Comme dans le temple païen, ce sanctuaire requiert une approche sensitive de la foi.

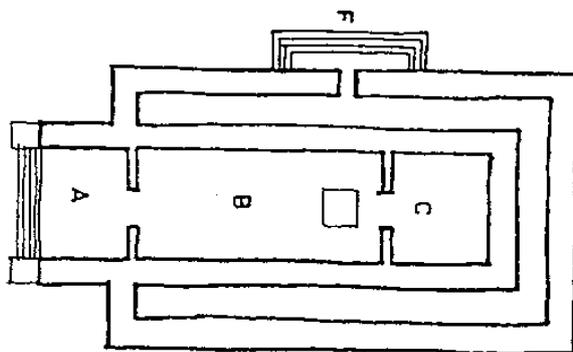


Figure 1 Plan du Temple de Jérusalem avec le vestibule (A), le lieu saint (B) et le lieu très saint (C) [1]

D'autre part, on trouve de nombreuses **synagogues**, où tout homme, y compris Jésus¹³, peut prendre la parole pour lire et interpréter la Torah. Ce lieu de la parole lue et discutée, où se développe un aspect plus intellectuel et réfléchi de la foi, doit, contrairement au Temple répondre à des exigences essentiellement acoustiques. Loin d'être réductible à un lieu d'enseignement de type académique [5], la synagogue doit non seulement favoriser l'intelligibilité de la parole mais également éviter que les disputes verbales¹⁴ ne se transforment en brouhaha. Les contraintes acoustiques sont satisfaites par les caractéristiques du lieu utilisé (espace de petite taille, adapté à la taille de la communauté¹⁵) et de la liturgie. Les membres de la communauté, tous égaux spirituellement, sont rassemblés, assis¹⁶, autour d'un pupitre surélevé (appelé *bèma* ou "chaire de Moïse"), situé au milieu de la nef (cf. Figure 2). Ce pupitre, déjà utilisé par Salomon et Esdras¹⁷, permet en effet par sa position (plan centré) d'être au milieu de l'assemblée et, par son élévation, de ne pas être étouffé par elle. Ces deux aménagements permettent alors une compréhension optimale de la parole. Ce sanctuaire est l'illustration parfaite de l'approche intellectuelle de la célébration communautaire.

acoustiques, constitue un moyen efficace pour contrôler la résonance du volume. Cet aménagement fait penser de façon frappante à celui des premiers studios d'enregistrement [4].

¹⁰ Cf. Lev. 3,5; Nb 16,47; 1Rois 12,33; 1 Chr 23,13

¹¹ Cf. Lev 5,26; 7,30b; 14, 14-18 etc.

¹² Cf. 2 Chr 7,6; 23,18; Ps 150

¹³ Cf. Lc 4,16; Mc 6,2; Mt 4,23; 9:35; Jn 18,20

¹⁴ Cf. Ac 13,15

¹⁵ Le temps de réverbération d'une synagogue pleine devait être relativement faible, l'assemblée dense des fidèles constituant un élément d'absorption important.

¹⁶ Cf. Mt 23,6. et 26,55. Notons que le fait d'être assis permet à la personne debout sur le pupitre d'être bien au dessus des fidèles de l'assemblée.

¹⁷ "Salomon fit une tribune d'airain, la plaça au milieu du temple, et se tenant debout dessus et étendant la main, il parlait au peuple" (cf. Eccles. III, 2 Par VI,2) et Es. 8

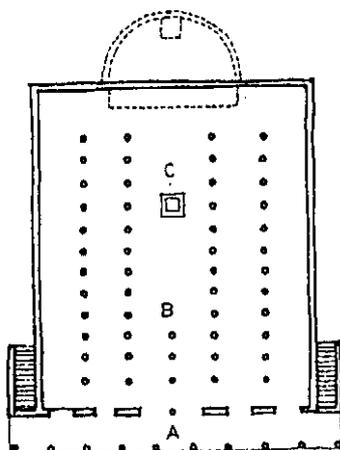


Figure 2 Plan de synagogue avec l'entrée (A) sans fonction liturgique, la nef (B) avec la chaire au milieu (C) [1]

Remarquons que Jésus n'a pas enseigné que dans les synagogues. La plupart des autres lieux, mentionnés dans les évangiles (une barque¹⁸, la montagne¹⁹, une maison²⁰, le Temple²¹, etc.), où il s'est adressé à la foule, sont cependant généralement favorables, du point de vue acoustique, à l'intelligibilité de la parole.

2.2.3 L'Église chrétienne primitive

Par la venue de Jésus Christ, parole faite chair²², Dieu s'est rendu présent aux hommes. Jésus étant aussi bien "la victime expiatoire, que le Sacrificateur, le grand Prêtre et le Prophète" [1], c'est, pour les fidèles, la fin de l'exclusion hors de tout lieu saint²³ et de tout rite sacré et le refus de tout clergé médiateur. Jésus récapitule et accomplit ainsi en sa personne toutes les fonctions du sanctuaire, du temple et de la synagogue [1]. Après sa mort et sa résurrection, le Christ devient présent par son Saint-Esprit dans la personne de ses disciples. Non seulement le clergé, mais toute la communauté des croyants, réunis au nom du Christ, est donc en elle-même le nouveau temple²⁴, fait de pierres vivantes²⁵.

Le culte de la Nouvelle Alliance se distingue alors radicalement de ceux des religions païennes et juives dans le fait qu'il n'y a donc plus besoin de temple. En

¹⁸ Cf. Mc 4,1 : "Jésus se mit de nouveau à enseigner au bord de la mer. Une grande foule s'étant assemblée auprès de lui, il monta et s'assit dans une barque, sur la mer. Toute la foule était à terre sur le rivage." Jésus utilise la pente du rivage comme gradin et le lac comme réflecteur acoustique. Cette situation, particulièrement favorable du point de vue acoustique, peut s'apparenter à celle d'un amphithéâtre gréco-romain.

¹⁹ Cf. Mt 5,1

²⁰ Cf. Mt 9:28; Mc 2,1-2

²¹ Cf. Mc 12,35; Mt 21,23 et 26,55; Jn 7,14 et 28; Jn 8,20. Il s'agit en fait souvent en fait du parvis du Temple.

²² Cf. Jn 1,14; Mt 1,18-25

²³ La fin de cette exclusion est symbolisée par le voile du Temple qui se déchire à la mort du Christ (cf. Lc 23,45).

²⁴ Cf. ICo 3,16 et 6,19; IICo 6,16-117; Ep 2,19-22

²⁵ Cf. 1Pi 2,4-10

effet, Dieu vit désormais par le Saint-Esprit dans le cœur des hommes, rassemblés par sa Parole et dans la communion fraternelle et joyeuse de la Cène, dans l'attente du retour du Christ. Comme le lieu sacré de la présence divine n'est plus le local du rassemblement mais la communauté elle-même²⁶, l'Eglise²⁷ primitive pouvait se rassembler et célébrer son culte n'importe où. Les premiers chrétiens, tous d'origine juive, continuent alors à fréquenter le Temple et les synagogues²⁸. Mais des cultes et des enseignements²⁹ se déroulent également, et de plus en plus souvent (à cause des expulsions des synagogues) en plein air, dans des lieux publics (notamment aréopage³⁰ et classes d'école³¹) et surtout des maisons privées³².

Comme le note Biéler [1] "le culte des premiers chrétiens est bien l'accomplissement et la fusion (en même temps que l'abolition) de deux traditions: celle de la synagogue et celle du Temple. De la synagogue, l'Église chrétienne hérite la lecture et la méditation de la Parole de Dieu, ainsi que l'habitude des prières en commun, libres et liturgiques³³. Mais tout le rituel du Temple étant accompli dans la personne, la mort et la résurrection du Christ Jésus, l'assemblée se réunit dans la communion et dans la présence du Ressuscité, autour de la table sainte pour le repas pascal répété chaque dimanche. Elle se retrouve dans une grande allégresse provoquée par l'attente du retour du Seigneur et entretenue par le chant des psaumes, de cantiques antiphonés, d'hymnes³⁴ et par des discours spontanés³⁵".

Du point de vue acoustique, cette fusion entre les deux traditions juives aux exigences contradictoires (ambiance, musique du Temple / intelligibilité de la parole dans la synagogue) entraîne un problème: le choix du lieu favorisera incontestablement l'un ou l'autre pôle.

Pour répondre à cette question nous allons étudier l'évolution historique des lieux de culte chrétiens des premiers siècles à nos jours³⁶.

2.3 Survol historique de la liturgie chrétienne

2.3.1 Les trois premiers siècles

Dans les premiers siècles, les lieux choisis par les assemblées chrétiennes s'inspirent des bâtiments (généralement profanes) antérieurs au christianisme, dont

²⁶ Clément d'Alexandrie dira ainsi "Ce à quoi je donne le nom de temple, ce n'est pas à l'édifice, mais à l'assemblée des élus" (selon [6])

²⁷ du grec ecclesia, assemblée

²⁸ Cf. Ac 9,20

²⁹ Cf. Ac 11,26

³⁰ Cf. Ac 17,17 sq.

³¹ Cf. Ac 19,9

³² Cf. Ac 20,7-8 "Le premier jour de la semaine, nous étions réunis pour rompre le pain. Paul, qui devait partir le lendemain, s'entretenait avec les disciples, et il prolongea son discours jusqu'à minuit. Il y avait beaucoup de lampes dans la chambre haute où nous étions assemblés". Cf. également Ac 2,46; 16,5 et 21,18; 1Co 16,19; Ph 4,22; Co 4,15; Ph 1,2.

³³ Cf. Ac 2, 42 et 46; Ac 20,7

³⁴ Cf. 1Co 14,26; Co 3,16; Eph 5,19

³⁵ Dans l'interprétation protestante du christianisme naissant (en faisant souvent abstraction de l'influence des cultes à mystère [3]), les deux pôles indissociables du culte chrétien sont donc la prédication de la Parole de Dieu et le sacrement de la Cène (Cf. 1Co 14,26 sq; 1Th 5,19 sq).

³⁶ Curieusement très peu de personnes se sont intéressées à l'évolution des conditions acoustiques des églises au cours de l'histoire [7; 8].

principalement des maisons d'habitations³⁷ (cf. Figure 3) ou des synagogues qui favorisent plutôt l'intelligibilité de la parole et la communion de l'assemblée.

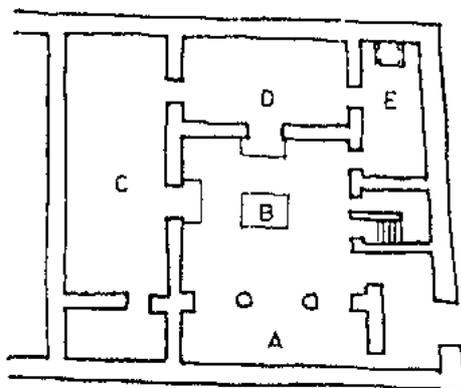


Figure 3 Plan de l'église domestique de Doura Europos (Syrie, 232) avec le vestibule (A), l'atrium (B), d'où l'on accède à la salle de l'assemblée (C), à la salle à manger (D) et au baptistère (E) [1]

Il faut cependant noter que dans les lieux habituels de réunion que deviennent les églises domestiques, inspirées de l'architecture hellénique ou romaine, et les catacombes³⁸, des lieux différents sont affectés pour les diverses activités liturgiques (baptême, Cène et enseignement). Cette diversification des lieux conduit d'une part à la possibilité d'adapter les locaux (et en particulier leur acoustique) aux activités qui s'y déroulent et d'autre part à n'utiliser que de petits volumes, ce qui est favorable du point de vue acoustique. En effet la taille réduite des pièces conduit à une proximité bénéfique aussi bien pour le chant que pour l'intelligibilité de la parole.

Rapidement cependant, le choix du modèle architectural païen (qui disposait de lieux particuliers pour la figure de la divinité et pour la caste sacerdotale) fera resurgir les anciennes habitudes liturgiques et les conceptions théologiques des cultes païens et juifs. En adoptant en particulier de plus en plus souvent pour lieu de célébration le tombeau d'un martyr³⁹ dont ils vénèrent les reliques, les chrétiens retournent à une sacralisation du lieu (localisation matérielle de la présence divine) plutôt que de l'assemblée. Parallèlement, on observe rapidement l'émergence d'un clergé qui se différencie (théologiquement et spatialement⁴⁰) de la communauté.

A côté de la différenciation des locaux au sein d'une église, on constate également une différenciation des types d'église. Comme le remarque Biéler [1], "avant la paix de l'Église (313), les constructions religieuses suivent nettement deux orientations,

³⁷ Les maisons particulières, sont plus ou moins adaptées aux besoins du culte [3].

³⁸ Les cimetières souterrains contenaient, comme les maisons domestiques, plusieurs locaux destinés aux diverses activités (atrium, triclinium pour les agapes funéraires, fontaines pour ablutions, etc.),

³⁹ Selon Biéler [1], en construisant un autel sur les restes d'un martyr, on est assuré de la présence du Seigneur qui vivait en lui, puisque le Saint Esprit lui a donné la force de confesser Jésus-Christ jusqu'à la mort. La présence du Christ dans ces reliques se combine, dans la croyance populaire, avec la présence eucharistique.

⁴⁰ Progressivement l'ancien triclinium (où la Cène était célébrée communautairement) deviendra la place réservée au clergé alors que dans l'atrium prenait place le reste de la communauté.

correspondant à deux conceptions du culte: une conception synagogale⁴¹, la plus ancienne, dont le plan carré centré convient au rassemblement naturel d'une communauté sans ségrégation cléricale, et une conception rituelle, d'abord centrée, puis dont le plan s'allonge et se diversifie au fur et à mesure que la sacralisation d'un lieu saint et d'un clergé le desservant s'intensifie, rejetant à distance les fidèles". Contrairement au premier type, qui garde l'agencement permettant une bonne intelligibilité de la parole dans les synagogues (cf. §. précédent), le deuxième type d'église crée de plus en plus de difficultés au niveau acoustique. En effet l'agrandissement progressif des églises post-constantiniennes, lié à l'éloignement des prêtres du reste de l'assemblée, réduit les possibilités de communication verbale entre les deux groupes et la participation active de l'assemblée.

2.3.2 L'église triomphante, de la paix constantinienne au Moyen Âge

La cléricalisation de l'église s'accroît au moment de la paix constantinienne, qui donne un statut officiel à la foi chrétienne et permet un développement intense de la liturgie et des constructions d'églises. C'est initialement pour des raisons essentiellement pratiques⁴² et pour affirmer le statut officiel et prestigieux de l'Eglise que le modèle de la basilique civile fut le plus adopté après la paix constantinienne. Avec sa forme d'un rectangle allongé, divisé en trois ailes (nef de grande hauteur et bas-côtés moins hauts) et une abside semi-circulaire en son extrémité (cf. Figure 4), elle permet d'accueillir de nombreux fidèles⁴³ et elle présente des qualités acoustiques surtout pour la musique.

En effet, diverses études [10-12] ont montré que cette forme permettait d'obtenir d'importantes réflexions latérales et des temps de réverbération relativement élevés. Le plafond des premières basiliques romaines, de même que les églises préromanes, en bois, était constitué de pans inclinés symétriques et d'une charpente composée, créant une diffusion acoustique également favorable pour la musique [2]. Les conditions de diffusion sont encore améliorées par les nombreuses anfractuosités dans les murs très épais. Dans ce modèle architectural, l'évêque et ses prêtres prenaient place dans l'abside à la place du juge et de ses assesseurs [13], alors que l'espace réservé aux membres du barreau se transforme en chœur à l'usage des clercs et des chantres. Pour des raisons pratiques⁴⁴ (et en particulier acoustiques et visuelles) mais également symboliques, le sol de l'abside est généralement surélevé par rapport à celui de l'assemblée qui se concentre dans la "nef". C'est au contraire au détriment de la communication auditive et visuelle que s'élève progressivement une clôture (qui deviendra jubé) séparant les prêtres des laïcs. On s'éloigne ainsi progressivement du plan centré, autrefois utilisé pour les martyria, les synagogues, les baptistères et les basiliques profanes.

⁴¹ Selon Boespflug [5], "le plus ancien type d'église chrétienne est celui des églises syriennes, qui sont une réplique christianisée de la synagogue".

⁴² Ce type de construction, utilisé dans diverses applications profanes (tribunal, bourse de commerce, etc.), est facile, bien maîtrisé, rapide et économique à édifier.

⁴³ Selon Reymond [9], "cette exigence est d'autant plus primordiale que, à la différence des anciennes religions grecques ou romaines, la célébration du culte chrétien suppose la présence des fidèles à l'intérieur même du sanctuaire".

⁴⁴ Le fait de surélever l'abside permet, comme le podium du pupitre de la synagogue, de mieux entendre (et de mieux voir) ceux qui s'y trouvent.

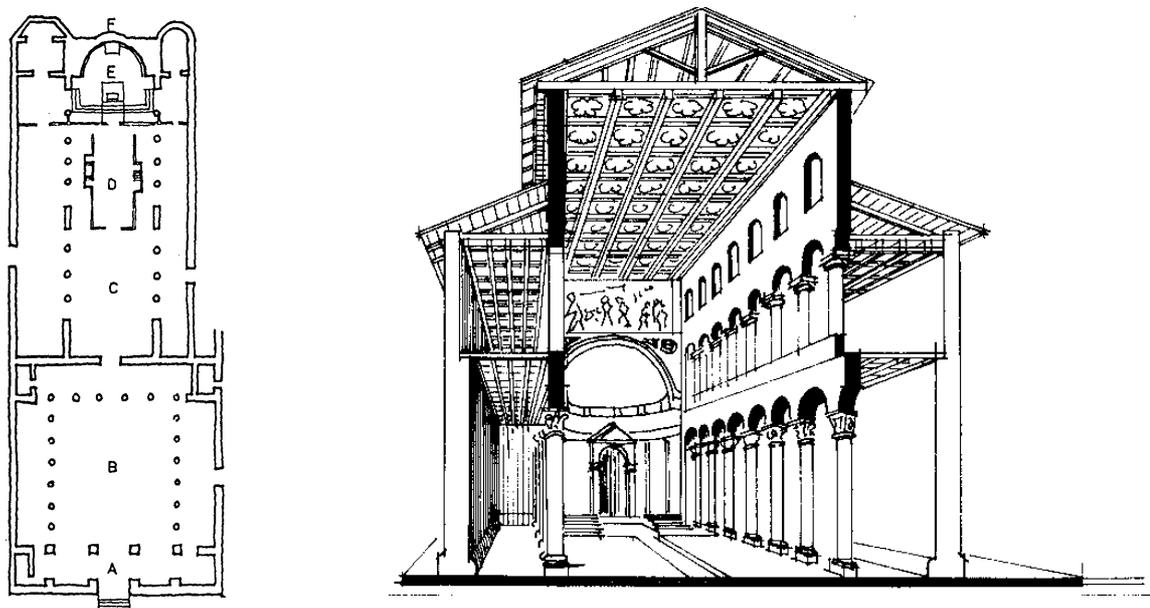


Figure 4 Plan [1].et perspective [14] d'une basilique romaine avec le vestibule (A), le narthex (B), la nef (C), le chœur des clercs (D) et l'abside (E) où prend place l'évêque (F) (plan de la basilique St-Clément de Rome, 392)

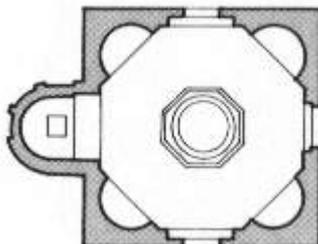


Figure 5 Plan centré du baptistère de Riva St-Vitale (début du VI^e siècle) [15]

La tradition du plan centré reste cependant utilisée pour des baptistères (cf. Figure 5) ou des martyriums. Sous le pape Grégoire le Grand (590-604), l'érection d'un autel sur la tombe de saint Pierre renforce encore le lien entre la liturgie et la vénération des reliques des martyrs et des saints [16], parce que la passion du martyr est comprise comme une actualisation de la passion du Christ. La multiplication des messes votives et des offices de requiem⁴⁵ conduit à multiplier le nombre de chapelles rayonnantes et parallèlement le nombre d'autels. Avec le développement du culte des reliques, les églises évoluent pour permettre aux fidèles et aux pèlerins de circuler parmi les autels et les reliquaires contenus dans des chapelles latérales dédiées aux saints, qui se multiplient⁴⁶ dans les églises de pèlerinage. Le plan des églises se soumet aux besoins de cette liturgie qui donne aux fidèles la possibilité de circuler par des collatéraux et le déambulatoire (cf. Figure 6). Les contraintes

⁴⁵ C'est à partir du XII^e siècle que ce type de liturgie se multiplie dans les églises.

⁴⁶ Comme beaucoup d'autres grandes églises, la cathédrale de Lausanne crée même un déambulatoire autour du chœur pour augmenter le nombre de chapelles et faciliter les processions.

acoustiques sont peu importantes dans ces églises⁴⁷ où la piété individuelle des fidèles se pratique en parallèle avec l'office des clercs, qui deviennent de plus en plus nombreux. L'autel, qui est alors le point de convergence de la messe, est encore tourné vers l'assemblée, mais il devient rapidement inaccessible et invisibles aux fidèles.

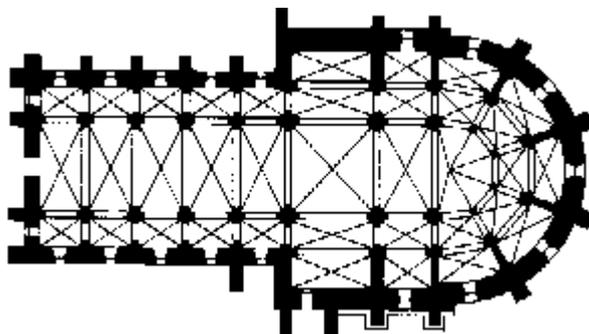


Figure 6 Plan de l'église conventuelle d'Abondance (XIII^e siècle) avec déambulatoire et chapelles rayonnantes [17]

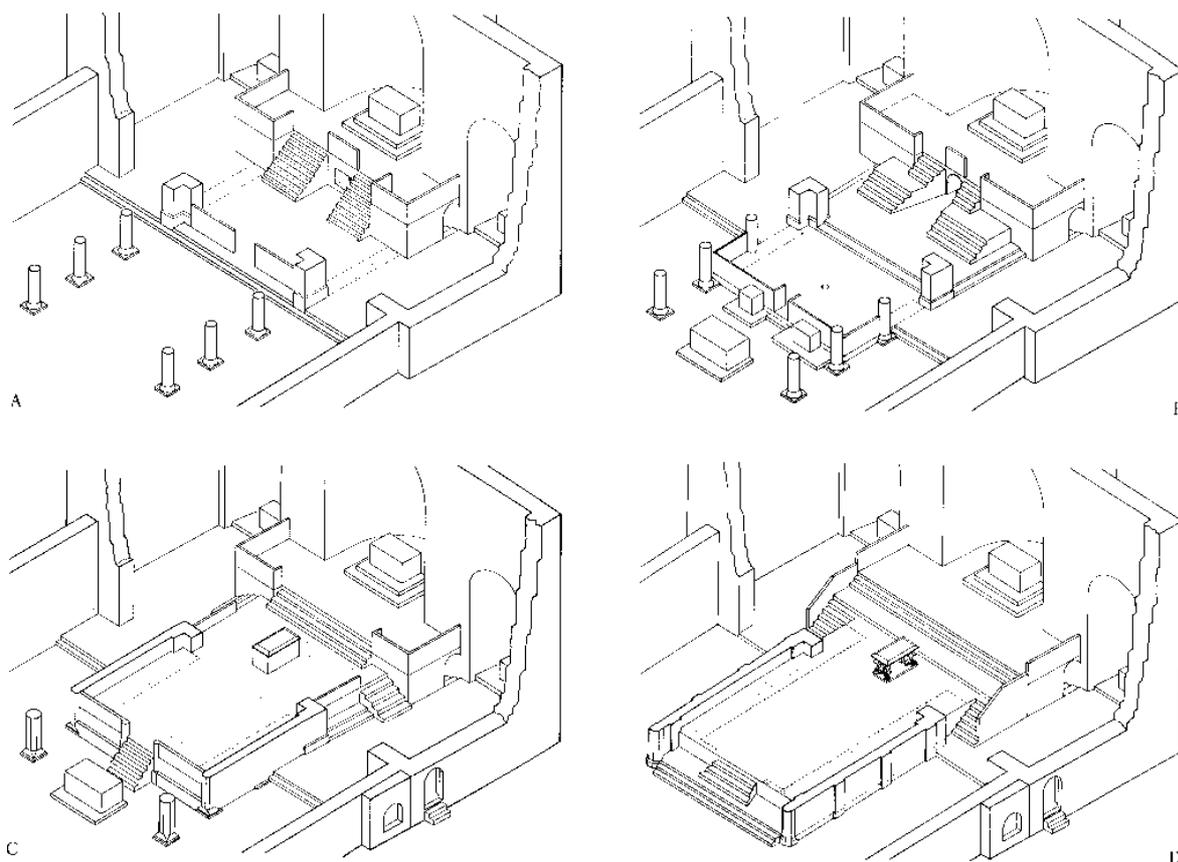


Figure 7 Développement du chœur de l'église collégiale de Beromünster (A au X-XI^e siècle, B au XIII^e siècle, C au XV^e siècle, D au début du XVII^e siècle) [17]

⁴⁷ Comme nous le verrons par la suite, les contraintes acoustiques ne concernent alors réellement que l'espace du chœur où les clercs prennent place.

C'est également dans la partie réservée aux clercs, image du Paradis, que se déroule la lecture de la Parole de Dieu qui se ritualise⁴⁸ et devient aussi leur exclusivité. C'est enfin dans le chœur, qui se développe comme élément liturgique s'avancant dans la nef (cf. Figure 7), que les chantres ou les moines, vêtus de blanc comme des anges célestes, exécutent seuls⁴⁹ les chants liturgiques. L'usage du latin, qui n'est pas compris par la grande majorité des fidèles, conduit finalement les clercs à officier à voix basse et n'être qu'à peine entendus par les fidèles qui ne perçoivent plus que le "murmure de la messe" [18]. L'importance du rôle des clercs dans la liturgie et leur séparation avec les laïcs prend concrètement forme par l'agrandissement du lieu qui leur est réservé (chœur et abside). L'assemblée, qui autrefois participait activement à l'ensemble de la célébration par ses chants, ses prières, ses lectures suivies de discussions et par la participation à la Communion, se retrouve alors cantonnée dans ses dévotions personnelles (rosaire) et dans un rôle facultatif d'observateur au moment de l'Élévation⁵⁰ (renforcement de l'aspect visuel) et accessoirement d'auditeur.

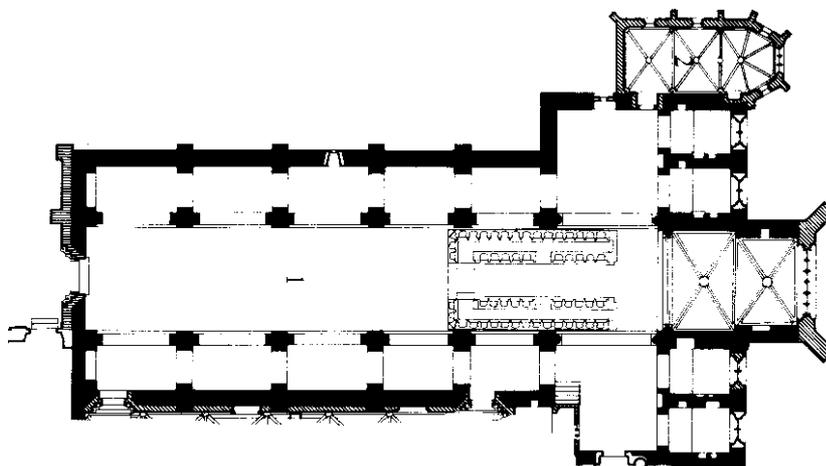


Figure 8 Plan typiquement cistercien de l'abbaye de Hauterive (env. 1150) [19]

Le développement des courants monastiques, aux besoins liturgiques bien distincts, conduit à l'émergence d'une architecture spécifique qui va profondément influencer les constructions paroissiales urbaines⁵¹. Le style roman se caractérise par une grande clarté fonctionnelle (cf. Figure 8). Les églises paroissiales romanes avaient bien souvent un plafond en bois relativement bas, plan ou à charpente apparente, favorable du point de vue acoustique, dont il nous reste encore de magnifiques exemples en Suisse (cf. Figure 9).

⁴⁸ A gauche du chœur se trouve le lutrin de l'Évangile, alors que la lecture des Épîtres se fait sur un autre lutrin, situé à droite.

⁴⁹ La complexification des offices ne permet plus aux laïcs d'y prendre part.

⁵⁰ La cloche indiquant la consécration, conduit le fidèle à interrompre ses dévotions personnelles pour voir (lorsque cela est possible) l'élévation de l'hostie.

⁵¹ Les abbayes, au cœur de fermes modèles, vont influencer aussi bien les constructions villageoises, qu'urbaines (les cathédrales vont s'en inspirer pour les sièges épiscopaux avec les baptistères séparés).

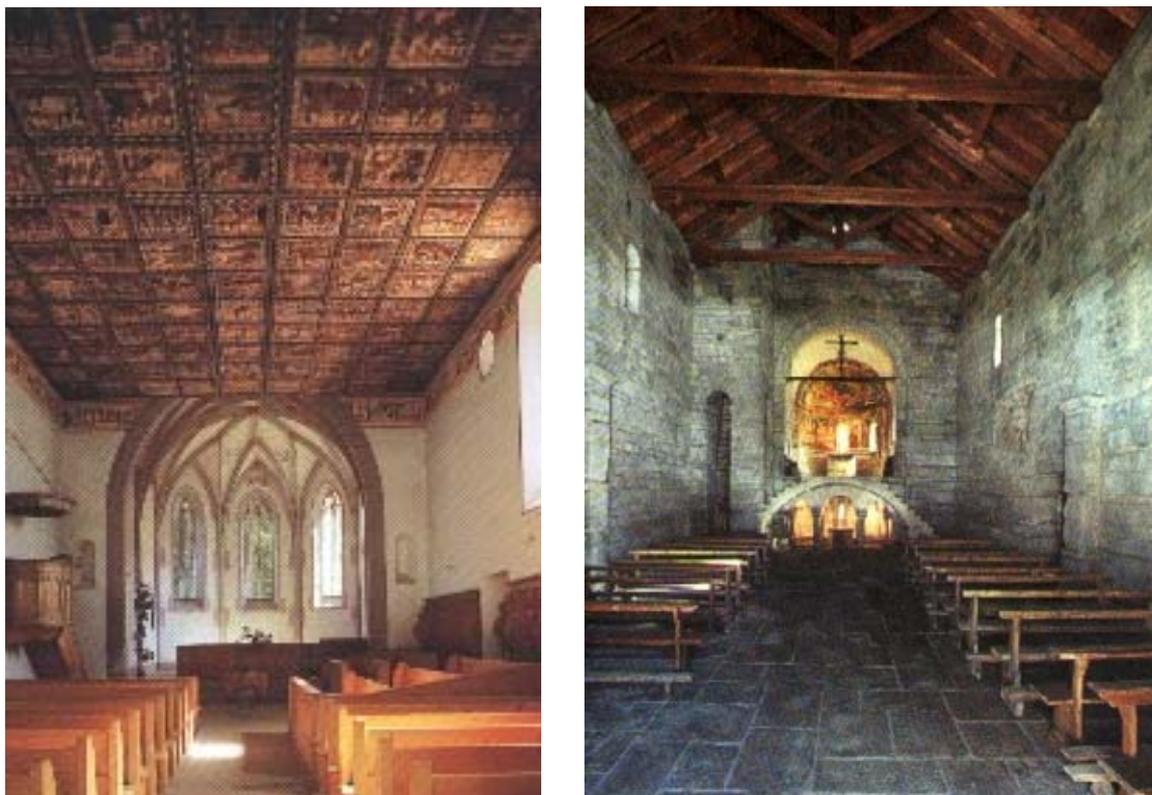


Figure 9 Plafonds romans en bois à Zillis (1130), St-Nicolao à Giornico (XII^e) [15]

On assiste alors à la mise au point de voûtes en pierre (arêtes, berceaux, coupole) pour réduire le risque d'incendie des plafonds en bois avec leurs imposantes charpentes et peut-être également mieux souligner le caractère sacré de l'édifice [13]. Les plus grandes églises ou abbayes de cette époque sont généralement dotées de voûtes en berceau, présentant toutefois des faibles rayons de courbures permettant d'éviter des phénomènes de focalisation (cf. Figure 10).

C'est à partir du XI^e siècle que l'on trouve, dans certains cas, des vases acoustiques en terre cuite (cf. §4.2) dans les voûtes pour en améliorer l'acoustique et notamment diminuer les effets de focalisation [20]. Dans d'autres cas particuliers, on a tiré parti des phénomènes de focalisation. Ainsi, la mise en place d'une estrade dans l'abside en cul-de-four (plafond en 1/4 de sphère) de l'église de Giarsun (XIII^e siècle) permet à l'officiant de se situer à une hauteur (correspondant à la moitié du rayon du plafond, soit la focale de l'approximation parabolique de celui-ci) où le plafond joue le rôle d'amplificateur naturel pour l'ensemble de l'assemblée.

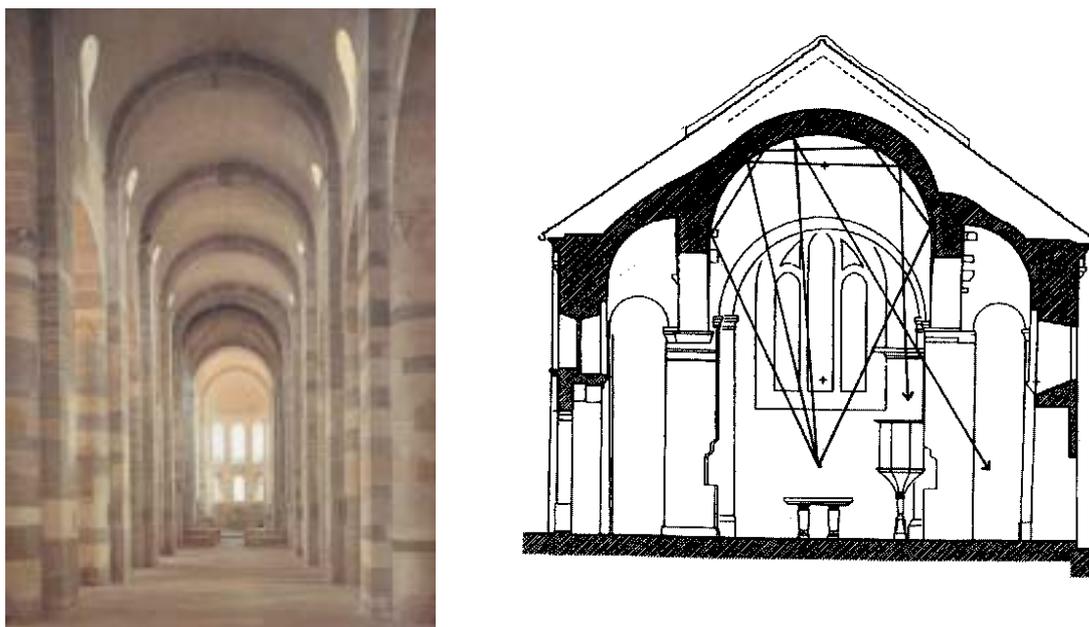


Figure 10 Voûte romanes dans l'église abbatiale de Payerne et de l'église de St-Jean à Grandson [15]

L'utilisation de voûtes en berceau brisé convenablement dimensionnées confère à certains édifices (comme les abbayes provençales de Silvacane, Sénanque et Thoronet) une sonorité exceptionnelle, en particulier pour le plain-chant [21]. Elle permet d'acheminer l'essentiel des réflexions sonores d'une manière cohérente, de renforcer le son dans la nef ou dans les stalles suivant la position de la source (cf. Figure 11). Cependant, le besoin de voir fait, qu'en 1153, "à la mort de saint Bernard, le parti-pris de l'ouïe meurt et tombe dans l'oubli" [22]. On s'éloigne alors du triple parti adopté par la réforme cistercienne, de la rectangularité, de la réduction et de la simplification des formes [5].

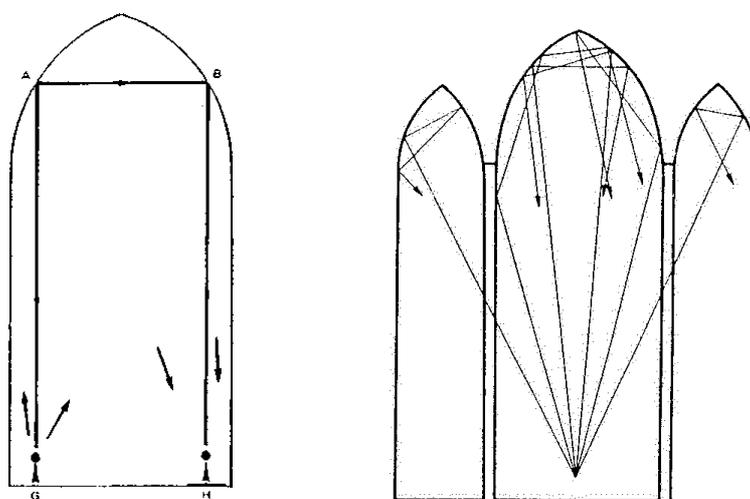


Figure 11 Réflexions sonores sur des voûtes en berceau brisé, favorisant le chant antiphoné des moines situés de part et d'autre du chœur (schéma de gauche) [21]. Les voûtes d'ogive améliorent la diffusion sonore dans l'ensemble de l'église (à droite) [23]

Les contraintes acoustiques des églises s'amenuisent au profit d'une valorisation des aspects visuels⁵² et symboliques⁵³. Le besoin de voir et l'enseignement des fidèles, pour la plupart illettrés, passe par la réalisation de nombreuses représentations (sculptures, peintures, vitraux). L'église devient alors parfois une véritable "bible de pierre"⁵⁴. Au Moyen Âge, les relations entre l'acoustique et l'architecture des églises sont plus d'ordre philosophique et mathématique (cf. Figure 12) que pratique⁵⁵.

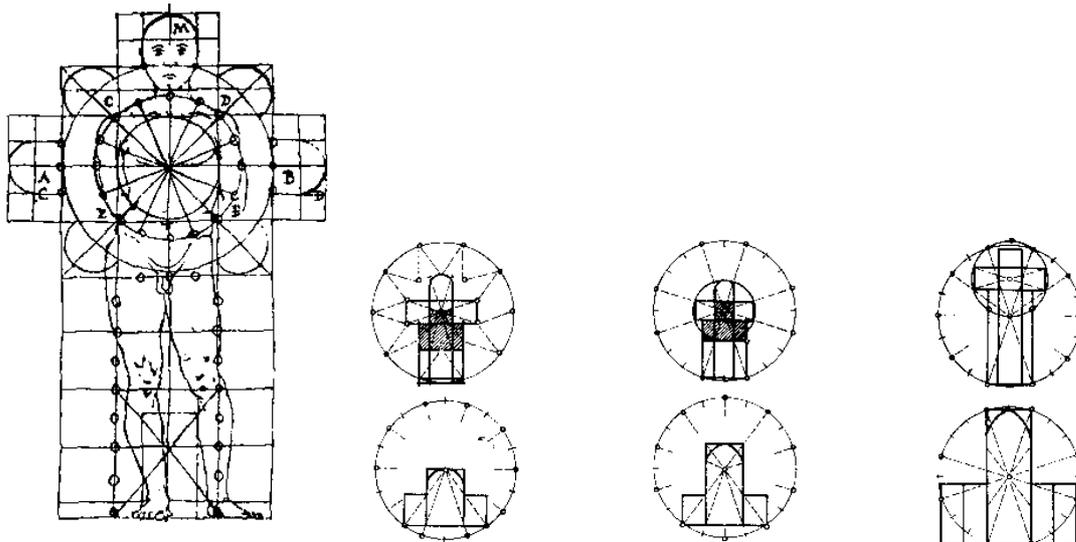


Figure 12 Exemples de tracés régulateurs d'églises au Moyen Âge, fondés sur une conception de la perfection (des rapports symboliques, musicaux ou numériques) [14; 28].

Seule l'abside sera ornée d'une conque riche de symboles [29], et la croisée du transept sera parfois surmontée d'une majestueuse coupole, symbole du ciel et de la perfection. Il est intéressant de noter qu'acoustiquement, ces coupoles ont pour caractéristique de renvoyer dans le chœur les ondes sonores qui y sont émises. Symboliquement et acoustiquement, l'essentiel de l'énergie (acoustique et liturgique) reste donc prisonnière du chœur, qui représente le temple de la Jérusalem Céleste

⁵² Selon Boespflug [5] (à propos de la messe posttridentine) "La double élévation correspond à l'introduction d'une pratique inconnue de l'antiquité chrétienne, celle de regarder avec curiosité et avidité les espèces eucharistiques au moment de la consécration (...) A force d'ériger en nouvel absolu le critère de la visibilité de l'autel, que deviendra celui de l'audibilité par tous de la Parole de Dieu?".

⁵³ La basilique allongée figure une rue de la Jérusalem céleste ou le Christ en croix, sur lequel se centre une liturgie de plus en plus pénitentielle. C'est cette dernière image qui explique en partie le développement important des plans en "croix latine" (défavorable, selon Raes [24], du point de vue acoustique) où l'abside présente, en plan, une inclinaison pour mieux représenter la tête inclinée du Christ en croix (cf. St.-Vincent de Montreux, cathédrale de Lausanne). Les églises possèdent 5 portes représentant les 5 plaies du Christ. Pour découvrir toute la richesse du symbolisme des églises au Moyen Âge, on consultera avec profit le livre de G. Durans de Mende (évêque du treizième siècle) [25].

⁵⁴ Selon Sorokin [26], "les exemples culminants de l'architecture médiévale sont les grandes cathédrales (...) dont à peu près tous les détails architecturaux et sculpturaux ont une signification symbolique. Ils sont réellement une Bible de pierre".

⁵⁵ Selon Forsyth [27] "les cathédrales gothiques sont dessinées selon les rapports de consonances musicales, afin de constituer un microcosme au sein de l'univers".

[13]. La communication entre prêtres et fidèles se réduit au point que "le clergé sacerdotal n'est plus tourné vers l'assemblée, comme il l'était encore dans l'abside des plus anciennes basiliques, mais il se présente dos aux fidèles, face à l'autel des sacrifices" [1]. La volonté de montrer la majesté de Dieu transparait au travers des constructions qui s'élèvent de plus en plus haut vers le ciel. Le symbolisme architectural qui induit cette montée des voûtes vers le ciel conduit cependant également à réaliser des prouesses techniques pour augmenter la hauteur des édifices. Parmi celles-ci on peut citer notamment à l'époque gothique les arcs-boutants et les voûtes d'ogive (induisant une diffusion favorable, cf. Figure 11). Cela a pour conséquences non seulement une augmentation du volume mais également des choix de matériaux de construction comme la pierre, résistants mais acoustiquement réfléchissants. Ces deux facteurs conduisent inévitablement à augmenter le temps de réverbération, ce qui a pour effet de rendre la parole peu compréhensible, mais le chant enveloppant. Une autre conséquence acoustique perturbant l'intelligibilité de la parole est l'apparition de réflexions tardives issues des voûtes, qui sont acoustiquement néfastes. A partir du XIV^e siècle on assiste alors à la mise en place, à l'intérieur des églises, des chaires [30] munies généralement⁵⁶ d'un abat-voix [31] pour diminuer ces effets. Ces hauteurs importantes seront mises à profit plus tard pour installer des grandes orgues sur une tribune occidentale [32]. La forme des voûtes est aussi parfois utilisée pour ses propriétés particulières de propagation du son d'un espace à l'autre⁵⁷. On assiste également à l'époque gothique à la multiplication du nombre de colonnes et décorations (statues) qui augmentent par contre favorablement la diffusion acoustique. L'allègement des murs permettra de mettre en place de grandes surfaces de vitraux contribuant à absorber les sons aux basses fréquences.

La musique sacrée s'adapte et profite de ces conditions acoustiques⁵⁸ avec le développement du chant grégorien⁵⁹ puis, plus tard, de la polyphonie, qui reste cependant réservé aux chantres, situés dans le chœur. Dans les églises romanes qui possèdent un long temps de réverbération, "les voix semblent ne provenir d'aucun point précis, mais emplir le lieu comme un parfum" [33] et créent une atmosphère mystérieuse et fusionnelle. Dans une telle acoustique, les notes successives du plain-chant, en se superposant, donnent déjà une impression d'harmonie [27]. Comme le relèvent Knudsen et Parkin [34; 35], certaines grandes églises romanes possèdent une résonance particulièrement élevée à une certaine fréquence (appelée note "sympathique"), qui est utilisée pour entonner les mélodies

⁵⁶ Il semble que toutes les chaires n'en étaient pas pourvues (cf. la chaire conservée à Königsfelden, la plus ancienne de toutes celles qui sont parvenues jusqu'à nous).

⁵⁷ Ainsi les voûtes d'arête de la Chapelle des Lépreux à la Chaise-Dieu permettent de propager le son le long des diagonales du volume. Le pénitent lépreux, tourné contre l'un des coins, pouvait ainsi se confesser en toute discrétion, au prêtre tourné contre le coin opposé. Une autre confession pouvait avoir lieu simultanément avec les deux autres coins de la chapelle [2]. On retrouve un phénomène analogue entre les foyers de la salle du chapitre de la cathédrale de Séville, de plan elliptique où prenaient place le doyen et son interlocuteur.

⁵⁸ Les musiques de l'Ecole de Paris, en particulier marquée par Léonin (XII^e) puis Pérotin (XIII^e), sont une des sources importantes de la polyphonie. Ce type de musique est parfaitement adaptées à l'acoustique résonante de la cathédrale Notre-Dame de Paris, pour laquelle elles ont été composées [27].

⁵⁹ Les abbayes de St-Gall, Einsiedeln et Engelberg furent des centres musicaux importants au Moyen Âge. Ces abbayes conservent aujourd'hui encore de précieux manuscrits de plain-chant.

grégoriennes⁶⁰. Le chant permet d'exprimer par les sens ce que les mots ne peuvent traduire ; il devient ainsi, selon l'expression de saint Augustin⁶¹, "jubilation" du cœur. L'unification liturgique décidée par Charlemagne conduit à une liturgie récitée uniquement en latin, langue peu ou pas comprise par le commun des mortels du Moyen Âge. Ce choix met en évidence la baisse de l'aspect cognitif dans la messe médiévale, qui favorise plutôt les sens visuels (statues, peintures, tentures, etc.), olfactifs (encens, cierge, etc.) et auditifs (chants). L'enseignement et l'explication des textes bibliques sont alors souvent donnés lors de célébrations particulières ("prône")⁶². Le nombre réduit des fidèles (généralement debout) qui se rassemblaient autour du prêcheur, situé sur une chaire (cf. Figure 13), n'entraînait pas trop de difficulté du point de vue acoustique (cf. §4.3).



Figure 13 Gravure florentine d'un prône (1491) [40]

La séparation, issue de la tradition juive, entre l'aspect sacré de la messe sacrificielle et le prêche apparaît notamment par la mise en place de certaines chaires hors de l'église⁶³. Les ordres mendiants (franciscains) et prêcheurs (dominicains), prédicateurs itinérants, disposaient ainsi d'une acoustique plus propice à la compréhension de la parole, pour autant que leur voix fut assez puissante et judicieusement réfléchi (par un abat-voix et le mur sur lequel était adossée la chaire). Dans beaucoup de communautés cependant, la prédication, même si elle ne faisait plus partie de la messe, gardait toute son importance et se déroulait à l'intérieur de l'église. Divers artifices furent trouvés pour favoriser l'intelligibilité de la parole, en abaissant quelque peu le temps de réverbération, comme la mise en place de "vases acoustiques" dans les voûtes et face à la chaire

⁶⁰ Les chœurs trouvent plus facile de chanter dans la tonalité de cette note (en général située entre le sol et le si₁, aux alentours de 450 Hz). Cette particularité acoustique a pu être mise en évidence dans une étude précédente sur les cathédrales [36].

⁶¹ D'après saint Augustin (cité par Schwitzguebel [37]), "bien chanter pour Dieu, c'est chanter en jubilant. Qu'est-ce que chanter en jubilant? Comprends que les mots ne peuvent traduire le chant quand c'est le cœur qui chante (...) ! Il y a jubilation quand le cœur laisse échapper ce que la bouche ne peut dire".

⁶² Selon Boespflug [5] "à partir du XII^e siècle, entre la première partie de la messe et l'offrande de l'eucharistie, on introduira le prône, redite en langue vulgaire de la première partie (...) Il donnera naissance à la chaire, dressée au centre de la nef, lieu de célébration d'une sorte d'office parallèle".

⁶³ De nombreuses églises de Toscane et d'Ombrie (par exemple à Pérouse) disposent encore d'une chaire sur le mur extérieur de l'église ou même sur la place publique (cf. peintures représentant saint Bernardin de Sienne).

(cf. §4.2), l'utilisation de tentures⁶⁴ ou de parements en tuf⁶⁵ et enfin la mise en place, avant l'avènement des bancs pour l'assemblée, de paille ou de foin et de fleurs au sol⁶⁶. Cette dernière mesure, qui se justifiait essentiellement pour des questions de confort (dureté de la pierre et isolation thermique), devait abaisser de façon significative le temps de réverbération. Selon Böhringer [39], "il n'apparaît cependant pas que ces installations aient été plus qu'un correctif pour améliorer une acoustique qui ne commandait pas, et devrait pourtant toujours commander un projet architectural d'église".

La liturgie chrétienne abandonne ainsi progressivement sa tradition fondée sur l'enseignement⁶⁷, pour retrouver les divers éléments du paganisme et du judaïsme sacerdotal (cf. § 2.2) et une orientation plus axée sur une piété individuelle, vécue de façon plus sensitive qu'intellectuelle. Contrairement aux rites qui favorisent la parole et impliquent la communauté⁶⁸, ce sont les mélodies des chantres et les déambulations individuelles des fidèles d'une chapelle à l'autre qui seront mieux servies par le type d'église allongée (croix latine⁶⁹) et réverbérante qui s'imposera progressivement en occident. Ce modèle correspond parfaitement à la logique de la liturgie qui favorise plus l'atmosphère que la compréhension et met à part une caste privilégiée qui seule officie.

2.3.3 Renaissance, Réforme et Contre-Réforme

2.3.3.1 La Renaissance

Dès le XIV^e siècle pourtant, les franciscains et les dominicains, qui favorisent autant la prédication de la Parole de Dieu que la liturgie eucharistique⁷⁰, commencent à construire des églises conçues comme salles à prêcher, où la chaire prend une importance nouvelle. Par ailleurs, durant la Renaissance, les modèles d'églises orientales⁷¹, découvertes par les Croisés, va profondément influencer l'architecture occidentale. A cela s'ajoute la réflexion humaniste et le retour aux canons gréco-romain de l'architecture, qui conduisent à la redécouverte du plan centré, présentant un fort axe vertical, plan utilisé par les premiers chrétiens. Ainsi Léonard de Vinci

⁶⁴ Celles de la cathédrale de Lausanne furent enlevées à la Réforme.

⁶⁵ Les églises St.-Jean à Grandson et St.-Paul à Villeneuve possèdent des voûtes ou des parements en tuf, et ont un temps de réverbération particulièrement bas pour leur volume.

⁶⁶ "A l'époque épiscopale, en hiver, quand il faisait froid, on couvrait de paille le sol de la nef pour que le peuple qui s'agenouillait ou stationnait sur les dalles ne fût pas trop incommodé, et parfois dans les grandes fêtes, en été, on jonchait l'église de fleurs et de feuilles" [38].

⁶⁷ Cet aspect intellectuel de la foi trouve sa source dans la tradition synagogale.

⁶⁸ Biéler constate dans son ouvrage [1] que "la mosquée islamique, dont le culte demeurera invariablement celui d'une assemblée sans clergé, réunie pour l'enseignement tiré d'un livre et pour la prière, s'étale en largeur (...), jamais en longueur". Le plan centré est également traditionnellement utilisé dans les synagogues.

⁶⁹ Raes [24], relève ainsi les défauts acoustiques du plan cruciforme "qui ne sont basés sur aucune prescription évangélique (...) Depuis des siècles, les fidèles d'innombrables églises ne voient pas l'autel, n'entendent pas les lectures rituelles et perdent l'essentiel du sermon, s'ils ont le malheur de se placer dans le transept".

⁷⁰ Rappelons que le culte eucharistique de la Fête Dieu est une tradition dominicaine et que la vénération de la Croix trouve sa source chez les franciscains.

⁷¹ On ne rappellera jamais assez l'influence majeure qu'a eu le modèle de Ste Sophie sur l'architecture sacrée occidentale à la Renaissance.

réalise-t-il plusieurs esquisses d'église de type circulaire, dont les plus connues sont "le théâtre pour écouter la messe" et "l'emplacement d'où l'on prêche" (cf. Figure 14). Dans ce dernier modèle, il place la chaire au centre d'une sphère, pour des raisons d'ordre fonctionnel (acoustique) et symbolique. Cette position étrange est en effet retenue afin que les auditeurs, placés sur six galeries en gradins disposés sur la surface de la sphère, soient aussi près que possible (et à égale distance) de l'orateur qui se tient sur une chaire, située au sommet d'une colonne et au centre de la sphère. La justification est également symbolique, pour que la Parole de Dieu, qui a créé le monde, centre de l'univers, soit placée au centre de l'église, qui est une représentation de l'univers [27; 41].

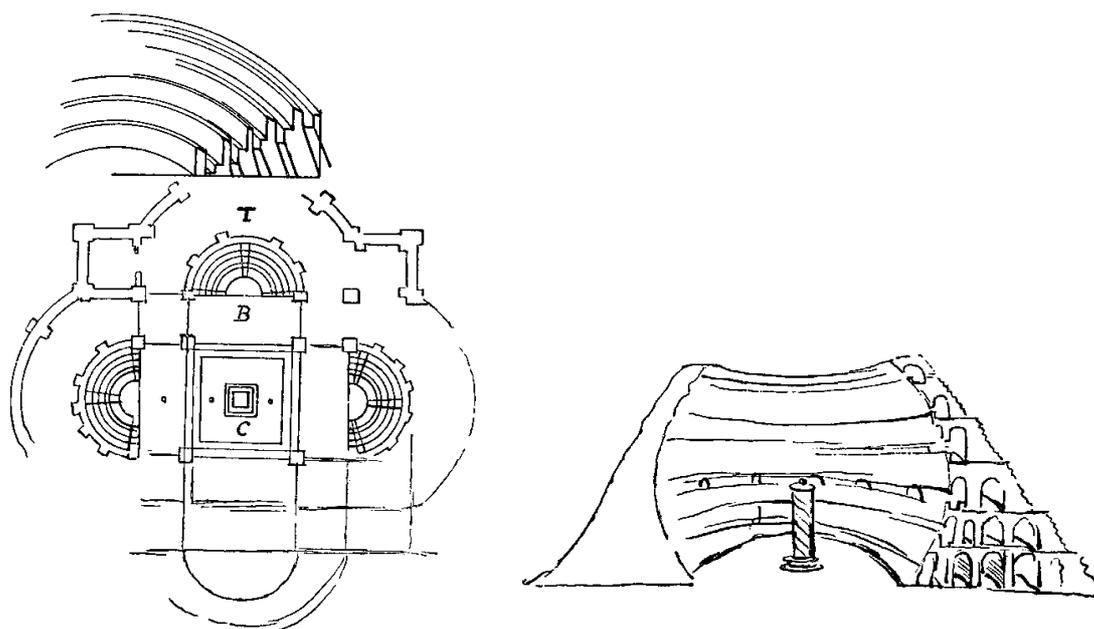


Figure 14 Esquisses de Léonard de Vinci pour un « théâtre pour entendre la messe » et « l'emplacement pour le prêche » [27]

2.3.3.2 La Réforme et l'évolution des exigences liturgiques

Une transformation liturgique s'opère dans certains milieux "progressistes", à mesure que l'on redécouvre les Écritures et la tradition de l'Église primitive⁷². La Réforme est essentiellement issue d'un milieu d'enseignants, qui protestent contre la position prise par le clergé et contre le rite célébré dans l'Église médiévale qui ont éclipsé et les fidèles et la Parole de Dieu. À côté de l'aspect plus intellectuel de l'étude des textes bibliques, les communautés passées à la Réforme expriment la joie pascale redécouverte par le chant communautaire des psaumes et des hymnes⁷³, qui, exécutés avec "poids et majesté", étaient considérés avec respect

⁷² Tous les réformateurs firent constamment référence dans leurs ouvrages à la Parole de Dieu et à "l'ancienne Église".

⁷³ Martin Luther insistera bien sur l'importance du chant dans la liturgie. Il recommande de conserver les mélodies grégoriennes, mais de chanter également des cantiques et des psaumes allemands. Les lectures doivent se faire "tourné vers l'assemblée" et une large place est laissée pour la prédication [42].

comme de véritables prières à Dieu⁷⁴ et "servant de la théologie"⁷⁵. Le côté sensuel du chant fut cependant parfois critiqué et même interdit⁷⁶, et le chant grégorien qui était traditionnellement chanté en latin par des choristes fut le plus souvent abandonné⁷⁷. Calvin et Zwingli désapprouvaient la musique religieuse et seul était d'abord autorisé le chant monophonique des psaumes puis au milieu du XVI^e siècle à quatre voix⁷⁸. Les orgues, qui avaient été détruites ou retirées des temples⁷⁹ ne réapparurent qu'au XVIII^e siècle [46]. De nouveaux répertoires de chant d'église⁸⁰, dont les textes (qui devaient pouvoir être compris) et les mélodies, relativement rythmées⁸¹, étaient en conformité avec les idées nouvelles, virent rapidement le jour dans les divers pays passés à la Réforme [46]. Les compositeurs durent cependant toujours adapter leurs musiques aux conditions acoustiques des églises qu'ils utilisaient⁸². Les réformateurs insisteront particulièrement sur l'importance d'une liturgie entièrement comprise par l'assemblée⁸³. Ainsi les langues vulgaires⁸⁴ remplacèrent le traditionnel latin liturgique, imposé par Charlemagne. La prédication,

⁷⁴ Ainsi Jean Calvin mentionne en 1542 [43] que "des prières publiques, il y en a deux espèces. Les unes se font par simple parole, les autres avec le chant (...) saint Paul ne parle pas seulement de prier de bouche mais aussi de chanter. Et à la vérité nous connaissons par expérience que le chant a grand force et vigueur d'émouvoir et enflammer le cœur des hommes, pour invoquer et louer Dieu d'un zèle plus véhément et ardent. Il y a toujours à regarder que le chant ne soit pas léger et volage mais ait poids et majesté, comme dit saint Augustin et ainsi qu'il y ait une grande différence entre la musique qu'on fait pour retrouver les hommes à table et en leur maison et entre les psaumes, qui se chantent en l'église en la présence de Dieu et de ses anges".

⁷⁵ Cf. M. Luther à Wittenberg, citation d'après E. Weber [44].

⁷⁶ C'était le cas à Zurich où le chant avait été supprimé dans le culte, lors de l'introduction de la Réforme [45].

⁷⁷ La confession helvétique postérieure de 1566 mentionne que "Le chant és temples et saintes assemblées doit estre modéré és lieux où il est en usage: mais le chant qu'on appelle Gregorian contient plusieurs choses sottés et absurdes: à raison de quoy il est à bon droit rejehtë de nos Eglises. S'il y a aussi quelques Eglises qui usent de prières saintes et légitimes sans aucun chant, elles ne doivent pas pour cela estre condamnées: car toutes les Eglises n'ont pas la commodité de chanter" [45].

⁷⁸ Le chant à quatre voix ne fut d'abord autorisé que «ès maisons». Il n'a fait son introduction dans le culte qu'au XVIII^e siècle .

⁷⁹ L'orgue de la cathédrale de Berne fut par exemple vendu à l'église de Sion. "En 1562 on arrête de fondre les orgues de la cathédrale pour en faire des ustensiles de communion et des coupes où l'on offrirait le vin d'honneur aux personnages de marque traversant Genève" [38] .

⁸⁰ Selon E. Weber [44] " Chorals luthériens, Psaumes huguenots, hymnes, Psaumes et anthems anglicans représentent l'identité spirituelle et hymnologique des fidèles depuis la Réforme".

⁸¹ Ces chants dont les paroles sont aussi importantes que la musique furent conçus pour pouvoir être exécutés par toute l'assemblée dans des lieux pas trop réverbérants. Un temps de réverbération élevé ôte tout dynamisme à ces chants relativement rythmés (par rapport au chant grégorien).

⁸² Forsyth mentionne en particulier [27] que H. Schütz a composé des oeuvres expressément pour la chapelle du palais de Dresde, qui avait une "acoustique de grotte" (soit un long temps de réverbération).

⁸³ J. Calvin, mentionne [43] qu'il est "expédient et raisonnable que tous cognoissent et entendent ce qui se dit et se fait au Temple, pour en recevoir fruits et édification (...) Car de dire que nous puissions avoir dévotion, soit à prière, soit à cérémonie, sans rien entendre, c'est une grande moquerie (...) Et de fait, si on pouvoit être édifié des choses qu'on voit , sans connaître ce qu'elles signifient".

⁸⁴ Calvin recommande également [43] "que les oraisons se fassent en langue commune et connue du peuple (...) Ce a été une trop grande impudence à ceux qui ont introduit la langue latine dans les églises, où elle n'était pas communément entendue (...) On profane le Sacrement de Jésus Christ, les administrant tellement, que le peuple ne comprenne point les paroles qui y sont dites".

La confession helvétique postérieure de 1566 mentionne également que "les prières publiques doivent estre faites és Églises Chrestiennes en langue vulgaire ou cogue d'un chacun" [45].

qui explique la Parole de Dieu, et les sacrements (qui ne vont jamais sans un accompagnement de paroles) prennent alors une place prépondérante dans la liturgie réformée⁸⁵.

Or, comme le relève Biéler "pour le protestantisme originel, comme pour l'Église primitive, le culte n'est pas tributaire du local dans lequel il est célébré" [1]. A la question "où est le temple de Dieu", Calvin réaffirme après la Bible [47] que "chaque chrétien est le temple du Saint-Esprit (...), chaque chrétien a ce titre honorable de sacrificateur". Les lieux de culte doivent particulièrement favoriser le rassemblement des fidèles autour de la prédication de la Parole de Dieu et de la célébration communautaire de la sainte Cène et des baptêmes, soutenue par les chants et les prières de toute l'assemblée.

Les lieux de culte, désacralisés mais qui restent des lieux de sanctification, d'où le qualificatif de « saints » qui les caractérise souvent, retrouvent, dans cette évolution, un côté simplement utilitaire mais aussi symbolique, où la satisfaction des contraintes pratiques (en particulier acoustiques) devient essentielle. Les églises héritées du Moyen âge ne conviennent guère aux nouvelles liturgies et théologies; il faut donc les transformer et/ou en construire de nouvelles. Les églises transformées et les nouveaux temples doivent en effet favoriser, au niveau acoustique, l'intelligibilité de la parole mais également la dimension communautaire, qui s'exprime en particulier par le chant de l'assemblée. Lorsque l'on préfère la clarté à la plénitude de la sonorité, le choix d'un local avec une acoustique de plein air s'impose, car le son directement issu de l'exécutant (parfois renforcé par les sons réfléchis par des surfaces proches), ne se trouve pas brouillé par la réverbération [27]. Selon Biéler [1], les temples doivent surtout "réunir de façon convergente (...) ces chrétiens réformés, (...) purgés de la religiosité naturelle, de la piété passive, individuelle et irresponsable, mais se rencontrant au contraire par-dessus le centre de leur communauté où se trouve la table sainte et le prédicateur, tous deux témoignant de la présence de Celui qui les unit et les réunit" (cf. Figure 15).

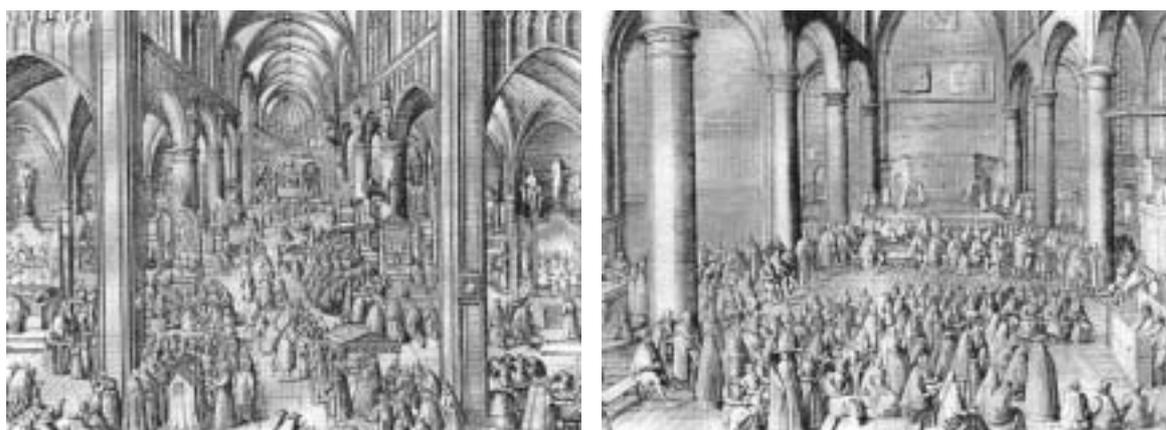


Figure 15 Gravures polémiques (vers 1600) de l'Église « papiste » dispersée (à gauche) et « apostolique » rassemblée (à droite) [28]

⁸⁵ Calvin relève [43] "qu'il ne faut pas qu'il y ait seulement un spectacle extérieur: mais que la doctrine soit conjointe avec pour en donner intelligence".

2.3.3.3 Transformation des anciennes églises après la Réforme

Les transformations des églises héritées du Moyen Âge s'attachent rapidement à réorganiser la communauté dans l'église pour des raisons pratiques et théologiques. La lecture et la prédication de la Parole de Dieu et la Cène communautaire du Seigneur, qui deviennent les éléments essentiels de la nouvelle liturgie, "ne seront plus désormais accomplis dans le chœur, mais au milieu de l'église (...) dans la concorde et l'unité, car en Christ tous sont devenus prêtres."⁸⁶ Les barrières (non seulement visuelles mais également acoustiques) qui séparaient le clergé des laïcs (en particulier le jubé) sont supprimées ou le jubé est complété par un mur allant jusqu'au plafond⁸⁷; la nef, qui rassemble toute la communauté, et devient le véritable chœur de l'église (cf. Figure 16). Outre le bannissement des autels et des images, objets d'adoration des fidèles, la Réforme entreprit de "ramener la multiplicité intérieure des églises médiévales à l'unité d'un seul lieu" [13] (cf. Figure 15). Si le chœur est impropre (par son éloignement) à recevoir des fidèles et perturbe l'intelligibilité par un apport inutile de volume⁸⁸, on préfère le condamner⁸⁹ (cf. Figure 17) et l'utiliser comme salle annexe ou entrepôt⁹⁰ ou alors inverser l'orientation de l'église (cf. Figure 18). Dans la plupart des églises (par exemple la cathédrale de Genève⁹¹), on déplace la chaire à une position plus favorable du point de vue acoustique. L'assemblée prend place sur des bancs (ce qui est alors une innovation⁹²), disposés tout autour de la chaire et de la table de communion, dressée les jours de Cène. L'arrangement adopté généralement est en large ou en étoile⁹³. Pour favoriser l'intelligibilité de la parole, non seulement on concentre au mieux la communauté autour de la chaire, mais on dispose parfois les bancs sur des gradins et on crée, si le nombre de places est insuffisant, des galeries inclinées autour de la chaire⁹⁴. L'ancienne église où l'on déambulait librement est transformée en une sorte d'amphithéâtre (cf. Figure 16). Si ces transformations ont favorisé l'intelligibilité, contrainte essentielle du nouveau culte, il n'en est pas de même de la vague iconoclaste qui a suivi la Réforme. En effet, le dépouillement des ornements visuels, qui par leur composition (peinture sur toile, tentures, etc.) constituaient des éléments non négligeables d'absorption et de diffusion du son, détériora quelque

⁸⁶ Ordonnance de l'Église de Hesse de 1526.

⁸⁷ Par exemple à l'église française de Berne.

⁸⁸ Rappelons que l'intelligibilité diminue lorsque le temps de réverbération augmente, ce qui est le cas avec une augmentation de volume.

⁸⁹ La présence d'un jubé dans la cathédrale de Lausanne conduisit à l'abandon de l'utilisation liturgique du chœur depuis la Réforme jusqu'en 1836.

⁹⁰ Le chœur fut séparé de la nef par une paroi en particulier à St.-Léonard et à St.-Pierre à Bâle.

⁹¹ "Le 29 août 1543, pour des raisons d'acoustique, la chaire fut transférée de l'autre côté de la nef" [38].

⁹² "Auparavant, outre les formes destinées jadis aux prêtres et depuis 1535 aux gens en place, on ne voyait qu'un petit nombre de chaises apportées par des personnes âgées ou infirmes" [38].

⁹³ "A l'époque bernoise, pour mieux remplir son rôle de "temple", l'église Saint-François reçut, après démolition du jubé et des autels, une nouvelle disposition en large, face à la chaire, disposition qui s'est conservée jusqu'à présent et fut complétée au XVII^e et XVIII^e siècle par l'adjonction de galeries tout autour de la nef" [48].

⁹⁴ Dans la cathédrale de Genève, "dès 1560 environ, on établit partout des bancs dont quelques-uns furent assignés à certaines familles notables. Un siècle plus tard, en 1661, pour multiplier le nombre de places, devenues insuffisantes, on dressa une tribune ou galerie, en face de la chaire, au-dessus du banc de Messieurs les pasteurs (...) En 1695 on construisit à l'opposé une troisième galerie qui garnissait en outre, derrière la chaire, le bras septentrional de la croix" [38].

peu les conditions acoustiques des églises. Dans certaines églises, les tentures⁹⁵ furent remplacées, pour ne pas trop détériorer l'acoustique, par de simples draps suspendus⁹⁶ ou des tentures sans images. Les mesures d'organisation (rassemblement du clergé et des fidèles et diminution du volume utilisé) furent alors d'autant plus nécessaires que les églises étaient vidées de leur contenu.

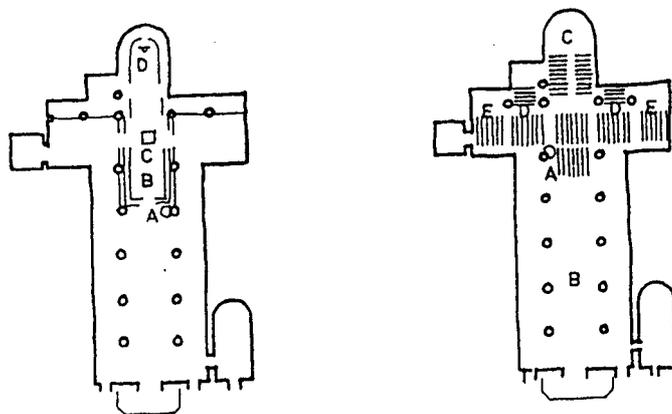


Figure 16 Plan de la cathédrale de Genève avant et après la Réforme, la chaire (A) passe du jubé à un pilier de la nef, le chœur (B) est supprimé, remplacé par des bancs en gradins pour l'assemblée [1]



Figure 17 Plan de la cathédrale de Bâle après la Réforme, avec une chaire (A) au milieu de la nef et un chœur désaffecté (B) [1]

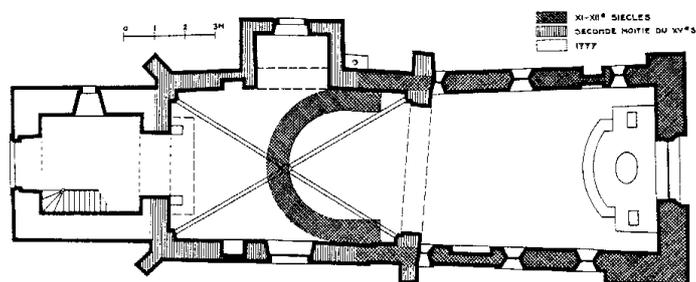


Figure 18 Plans de l'église de Vuflens-la-Ville dans la situation initiale (XI-XII^e siècle) et après retournement (XVIII^e siècle) [49]

⁹⁵ Notons que, depuis le Moyen Age, il était d'usage d'utiliser des tapisseries ornementales pour les jours de fête.

⁹⁶ De tels draps furent utilisés par exemple à St. Thomas de Leipzig où J. S. Bach était *Cantor* [27].

2.3.3.4 Les nouveaux temples réformés

La Réforme ne s'est pas contentée de transformer des anciennes églises, elle a également conduit, d'abord en France, à la construction de nouveaux lieux de culte qu'elle nomme "temples", par allusion biblique au Temple de Jérusalem [50]. "L'ancienne tradition des plans centrés est retrouvée, exprimant le rassemblement de la communauté par la Parole de Dieu autour de la table sainte, dans la joie de la Résurrection. L'héritage de la synagogue et du culte primitif est remis en valeur, dépouillé des influences sacerdotales juives et païennes qu'avait trop facilement laissé triompher dans l'Église chrétienne une piété rituelle et pénitentielle" [1].

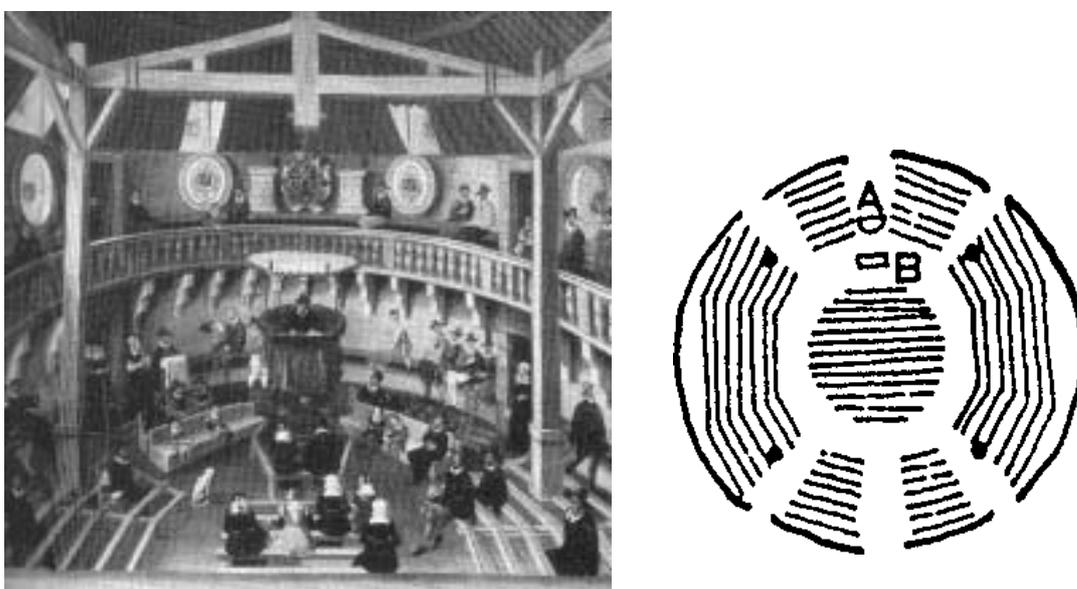


Figure 19 Peinture et plan du Temple du Paradis à Lyon avec la chaire (A) et la table de communion (B) [1; 28]

Les premiers temples réformés furent parfois construits sur la base de la représentation conventionnelle que l'on se faisait alors du Temple de Jérusalem [51], soit une rotonde surmontée d'un lanterneau, puis un plan rectangulaire allongé. Les premières réalisations à Caen, Rouen, Bergerac ou à Lyon (par exemple Paradis, cf. Figure 19) et Charenton, vont influencer profondément toute l'architecture réformée. On observe alors l'émergence d'une architecture relativement fonctionnelle⁹⁷ faite notamment pour favoriser l'intelligibilité, avec des plafonds moins hauts et en bois. L'utilisation de ce matériau entraîne une baisse du temps de réverbération aux basses fréquences [52]. A côté d'une unité d'organisation, une liberté architecturale permettra cependant d'avoir rapidement des plans carrés, rectangulaires⁹⁸, octogonaux, ovales⁹⁹ (cf. Figure 20) ou elliptiques¹⁰⁰ (cf. Figure 21). Les temples protestants se caractérisent par un travail particulier sur le volume architectural tout

⁹⁷ Les premiers temples réformés furent généralement construits sur le modèle des granges ou maisons des régions où ils furent bâtis.

⁹⁸ Par exemple à Charenton (1624), Wädenswil (1764), et Kloten (1785).

⁹⁹ Par exemple à Dieppe, Chêne-Pâquier (1667), Oron-la-Ville, et Chêne-Bougeries (1757).

¹⁰⁰ Par exemple à Horgen (1780).

en conservant une grande sobriété, contrairement aux églises baroques catholiques [9].

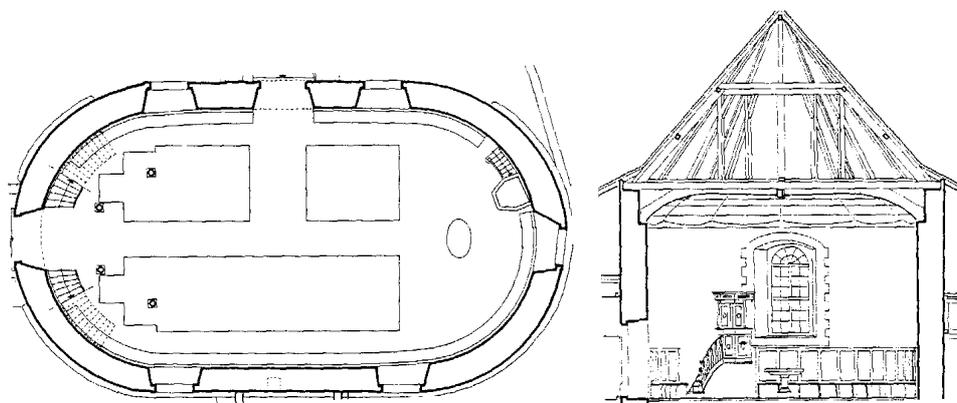


Figure 20 Plan et coupe du temple ovale de Oron-la-Ville (1679) [49]

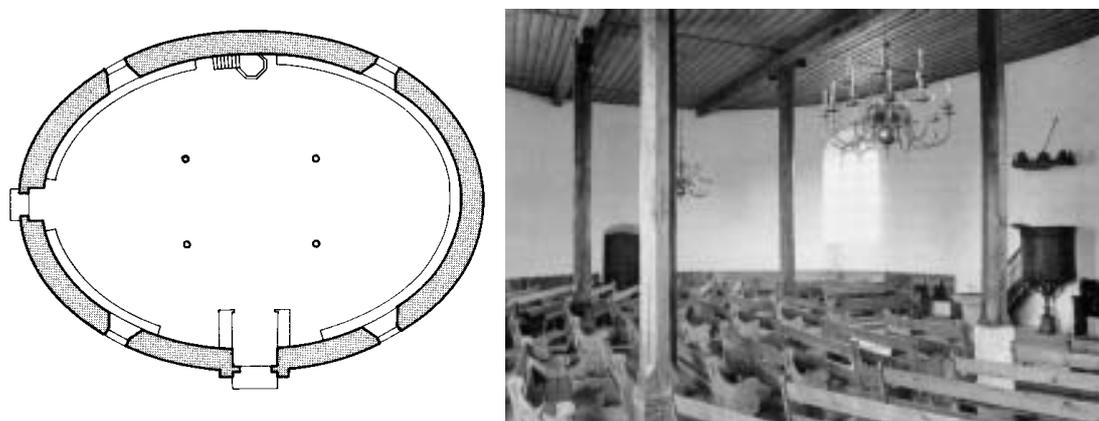


Figure 21 Plan et photo du temple elliptique de Chêne-Pâquier [28]

Les caractéristiques intérieures restent semblables dans tous les premiers temples. Comme dans les transformations d'anciennes églises, l'intelligibilité de la parole¹⁰¹ et l'esprit communautaire devaient être favorisés dans les nouvelles constructions. Selon Biéler [1], "la préoccupation première dans les églises réformées est de constituer une sorte d'anneau de prière autour de la chaire, de l'autel et de l'orgue qui devront être rapprochés le plus possible l'un de l'autre". C'est ainsi que l'on retrouvera, plus pour des raisons de fonctionnalité¹⁰² que de signification [1; 41], une assemblée typiquement orientée vers le centre et des bancs disposés en gradins concentriques autour de la chaire qui est surélevée et avancée en direction du centre. Ces caractéristiques d'occupation de l'espace, qui conduisent les nouveaux temples à ressembler à des amphithéâtres (cf. Figure 22), permettent d'obtenir d'excellentes conditions à la fois pour la compréhension de la parole et pour le chant

¹⁰¹ Selon Senn [53], l'objectif de Salomon de Brosse pour le nouveau temple de Charenton était de "loger une communauté de quatre mille personnes (...), et de disposer l'auditoire de telle sorte que chacun pût entendre commodément le prédicateur." Le modèle du temple de Charenton, détruit en 1686, fut apporté en Suisse par les réfugiés français, et inspira les constructions du Temple de la Fusterie (Genève 1707) et du Saint-Esprit (Berne 1726).

¹⁰² Servettaz [54], qui insiste dans son ouvrage sur la fonctionnalité des temples, remarque que les premiers temples réformés "tentent de se transformer en salles d'audition rationnelles".

et les prières communautaires [28]. En effet, les fidèles sont ainsi tous situés à proximité de la chaire, tout en restant en liaison immédiate avec le reste de l'assemblée, qui, grâce aux gradins, n'affaiblit plus trop les paroles du prédicateur. La proximité des personnes et de l'orgue favorise également le chant communautaire. O. Senn fait remarquer [53] que "l'Édit de Nantes (1598-1685) a imposé aux architectes des normes de construction (...). L'importance considérable donnée aux galeries superposées (généralement en bois), destinées à concentrer le maximum de personnes dans le volume limité¹⁰³, est tributaire des directives de cet Édit".

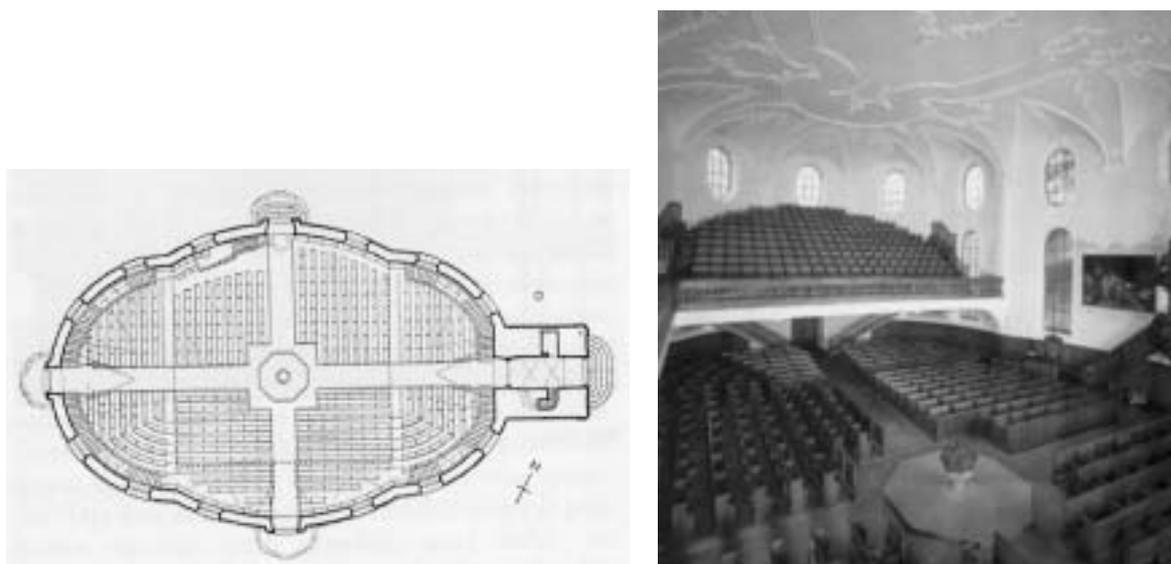


Figure 22 Plan et photo du temple de Horgen (1780) avec la chaire (A) et la table de communion (B) [15; 28]

Dans tous les pays réformés, la taille des temples a généralement été limitée pour que "chacun puisse entendre et voir le prédicateur"¹⁰⁴. Notons que la densité d'occupation du sol est extrême, ce qui conduit à obtenir des temps de réverbération très faibles, et donc une bonne clarté, dans les temples pleins. Les matériaux utilisés, souvent simples (le bois), contribuent par ailleurs à absorber les basses fréquences (qui ne sont que peu absorbées par les fidèles) et à améliorer encore les conditions d'écoute. Ces faibles temps de réverbération permirent aux compositeurs de musique cultuelle réformée d'utiliser des styles d'écriture plus dense que ceux destinés aux églises médiévales¹⁰⁵.

¹⁰³ Selon Servettaz [54], le temple de Charenton pouvait contenir 5000 fidèles et celui de Dieppe 6000 fidèles.

¹⁰⁴ Cf. Wren C., qui dans une lettre de 1708 "concernant un Acte du Parlement voté pour construire 50 nouvelles églises dans la cité de Londres" a proposé en plus de l'adaptation de la taille à la communauté que chaque église possède "une très grande chaire, placée au centre, ainsi que des galeries, tant dans la nef que les bas-côtés".

¹⁰⁵ La plupart des grandes œuvres de J.-S. Bach (fugues ou les passions) ont été écrites pour les églises de St.-Nicolas et St.-Thomas à Leipzig. Cette dernière église, lorsqu'elle était remplie de paroissiens, avait un temps de réverbération d'à peine 1.6 seconde [55], ce qui permettait notamment d'entendre de manière plus claire les traits des instruments à cordes, les phrases denses des fugues

2.3.3.5 La Contre-Réforme

Face à la Réforme, l'Église de Rome prit le parti d'extérioriser avec éclat sa puissance et son prestige. La Contre-Réforme introduit également de profondes modifications dans sa liturgie, qui prolonge cependant la tradition en conservant le latin et en confirmant l'importance centrale et sacramentelle de l'Eucharistie. La Contre-Réforme désire cependant rendre la messe plus accessible aux fidèles. Ceux-ci sont invités à participer plus activement à la célébration de la messe en recevant notamment régulièrement la communion¹⁰⁶. Les jubés en pierre, qui constituaient un écran aussi bien visuel qu'acoustique, sont supprimés. Les églises conservent cependant souvent des grilles, délimitant et protégeant la zone des clercs¹⁰⁷ (toujours séparés des laïcs), mais laissant mieux passer les paroles et les chants des prêtres et surtout, le regard vers le maître-autel, plus grand et magnifique que jamais (cf. Figure 23).



Figure 23 Remplacement du jubé par une grille en fer forgé dans les églises Hofkirche de Lucerne (1633, à gauche) et de Kreuzlingen (1760, à droite) [17; 56]

Les églises, auparavant peu fréquentées par les fidèles mais encombrées par des tombes et le jubé, sont ainsi réaménagées conformément aux directives, parfois ambiguës¹⁰⁸, du Concile de Trente (1545-1563). Le cardinal Carlo Borromeo, et son ouvrage *Instructiones fabricae et suppellectilis ecclesiasticae*, écrit en 1572, influence profondément et durablement la construction et la transformation des églises catholiques après la Contre-Réforme. C'est dans une direction bien différente de la Réforme, que la Contre-Réforme exalte la grandeur de Dieu et de son Église unique par des constructions grandioses aux décorations exubérantes.

et autorisait des *tempi* alertes et des changements d'harmonie plus rapides que ceux qui auraient été acceptables dans une église médiévale [27].

¹⁰⁶ Avant la Contre-Réforme, les fidèles ne communiaient qu'une ou deux fois l'an.

¹⁰⁷ Les grilles, délimitant le périmètre des clercs, apparaissent à la fin du Moyen Age, quand grandit l'insécurité, comme protection contre les pillages.

¹⁰⁸ Selon le Concile de Trente, l'église ne doit, par exemple, pas contenir "d'image ou d'objet suggérant une fausse doctrine pouvant occasionner de dangereuses erreurs aux personnes manquant d'éducation".



Figure 24 *Eglise baroques catholiques N.-D.-de l'Assomption de Soleure (1680-88) et abbaye d'Einsiedeln (début XVIII^e) [56]*

La Contre-Réforme catholique s'oriente ainsi plutôt vers une glorification de Dieu à travers une architecture fastueuse et richement décorée et une disposition en long face à l'autel (cf. Figure 24). Les représentations visuelles (peintures et sculptures) qui visaient la glorification de Dieu deviennent particulièrement présentes jusqu'à l'extravagance dans les églises de la compagnie de Jésus¹⁰⁹. Selon Reymond [9], "le Concile de Trente a délibérément misé sur le visuel, là où la Réforme insistait sur l'écoute de la Parole. L'âge baroque et post-tridentin a vu un développement presque sans précédent de l'imagerie religieuse dans les églises – une imagerie destinée à émouvoir la sensibilité des fidèles". Les célébrations et leur cadre sont particulièrement fastueuses, pour exalter l'Incarnation, mais aussi pour rassembler et émouvoir à nouveau les fidèles. L'acoustique, qui se doit d'être flatteuse et enveloppante, reprend une certaine importance, mais dans une direction opposée à celle imposée par la Réforme. Ainsi s'intensifie le décorum ostentatoire d'une religiosité qui extériorise la divinité, surtout sur la base d'éléments visuels¹¹⁰, mais également par l'ambiance acoustique, majestueusement résonante. Ce genre d'église, souvent très éloigné du temple protestant, "fait penser davantage au salon d'un palais qu'à la maison du Dieu des pauvres" [57]. La croix latine, plus adaptée aux contraintes liturgiques¹¹¹ et à la séparation entre clergé et laïcs, s'impose face à la croix grecque¹¹², qui fut remise au goût du jour à la Renaissance pour sa

¹⁰⁹ L'église du collège St.-Michel à Fribourg est l'une des commandes les plus ambitieuses des jésuites en Suisse.

¹¹⁰ La grandeur de l'Eglise apparaît non seulement au niveau architectural mais aussi par les vêtements somptueux du clergé.

¹¹¹ La Contre-Réforme maintient les processions et l'utilisation de nombreuses chapelles latérales dédiées à divers saints.

¹¹² Contrairement à la Réforme, la Contre-Réforme catholique, désirant rester dans la plus pure tradition, lutte contre les plans centrés, qui était utilisés, selon Borromée, surtout dans les temples païens et plus rarement dans les églises.

perfection géométrique. La forme des plafonds devient souvent défavorable du point de vue acoustique¹¹³ mais elle est généralement compensée par de bonnes qualités de diffusion du son¹¹⁴. En effet, les colonnades et les plafonds chargés de stuc des églises baroques catholiques augmentent les caractéristiques de diffusion acoustique du volume ce qui favorise en particulier les exécutions musicales. A l'image de l'architecture et de son acoustique, la musique sacrée catholique de la Contre-Réforme est marquée par la richesse et le décorum d'une polyphonie sans limite (mais moins rythmée que les œuvres réformées) de compositeurs comme Palestrina, G. Gabrieli ou Monteverdi¹¹⁵. Les faibles évolutions fondamentales de la liturgie conduiront cependant ces églises à conserver l'essentiel des caractéristiques (acoustiques) des églises du Moyen Âge. L'aménagement du lieu de célébration conçu après le Concile de Trente, s'est pratiquement perpétué jusqu'à Vatican II dans les églises catholiques [58].

2.3.4 Du siècle des Lumières au néoclassicisme

2.3.4.1 Le rationalisme du siècle des lumières

Comme le souligne Biéler [1], "les habitudes religieuses inconscientes traversent les plus grandes révolutions (...). Lorsque le souvenir se perd, la tradition la plus ancienne reprend le dessus. C'est pourquoi le protestantisme verra bientôt resurgir dans son architecture la tradition basilicale allongée (...). En effet, l'assemblée, encore convergente, se retire peu à peu devant la chaire, dont l'importance s'accroît"¹¹⁶. Avec le siècle des lumières et sous l'effet du rationalisme et de "l'embourgeoisement du sentiment héroïque des réformateurs" [54], la prédication devient progressivement plus intellectuelle et érudite. La raison l'emporte sur la foi et Fénelon ira même jusqu'à dire que "pour les prédicateurs, ce n'est pas la religion, mais le bel esprit qu'ils ont intérêt de persuader au monde" [59]. Du fait que le sermon, devenu une longue conférence pieuse¹¹⁷, prend une part prépondérante de la liturgie, l'assemblée se transforme en auditoire passif et les temples en anonymes salles de conférences religieuses. Pour favoriser l'intelligibilité et figurer l'importance

¹¹³ Le rayon de courbure des voûtes, étant alors souvent compris entre la moitié de la hauteur et la hauteur, induit des phénomènes d'échos.

¹¹⁴ La diffusion acoustique correspond d'une part à l'homogénéité de la répartition du son dans l'espace (diffusion spatiale) et d'autre part à la régularité de la décroissance du son après l'extinction de la source sonore (diffusion temporelle). Une bonne diffusion acoustique se caractérise donc notamment par l'absence de phénomènes de focalisation ou d'échos.

¹¹⁵ C'est à St. Marc de Venise, qui possède plusieurs galeries pour les chanteurs et musiciens, que se développa la polychoralité.

¹¹⁶ Cette dernière tendance apparaît bien dans le temple de Chêne-Bougeries (Genève 1758). Calandrini, l'architecte mathématicien de ce temple a cependant tout entrepris et calculé pour favoriser les conditions acoustiques (position de la chaire, inclinaison des murs au niveau des galeries pour faire réflecteurs, etc.). Cependant dans les églises de formes arrondies (rond, ovale, ellipse) le fait de reculer (dans les temples existants) ou de placer la chaire accolée au mur, favorise les "échos rampants" qui font "tourner" le son le long des murs. Ce phénomène particulier, s'il renforce le niveau sonore des places situées au dernier rang est préjudiciable pour le reste de l'assemblée.

¹¹⁷ Les chaires réformées étaient munies d'un sablier qui nous permet de connaître la durée moyenne des prédications: quarante minutes marquait couramment le milieu de ce long discours [60].

de la prédication, la chaire, de plus en plus imposante, est disposée de façon de plus en plus dominante¹¹⁸ dans l'axe principal du temple (cf. Figure 25).

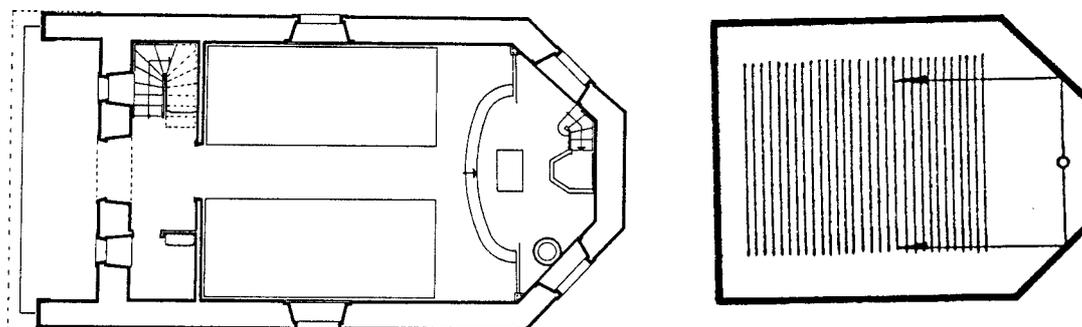


Figure 25 Plan du temple de Montpreveyres (1758) avec son abside à trois pans et sa chaire frontale permettant de mieux renvoyer le son vers l'assemblée [49]

L'assemblée devient un public, "rassemblant une masse d'individus venus entendre un prestigieux orateur juché au haut d'une chaire monumentale et pour assister à un concert religieux" [1], et perd progressivement son aspect communautaire (cf. Figure 26). Les bancs, situés auparavant de façon convergente autour de la chaire, sont maintenant alignés face à elle. Cette nouvelle disposition intérieure, qui met la chaire (et le pasteur) en face (et non plus au milieu) de l'auditoire est défavorable du point de vue acoustique, malgré des temps de réverbération qui demeurent relativement bas, aussi bien pour l'intelligibilité de la parole que pour le chant communautaire. En effet, les auditeurs (surtout en fond de salle) sont de plus en plus éloignés de la principale source sonore (le pasteur), et ils n'entendent, lors des chants, plus que leurs coreligionnaires situés derrière (il n'y a plus personne en face). Avec le recul de la chaire, se crée souvent une sorte d'abside à trois¹¹⁹ (cf. Figure 25) ou cinq¹²⁰ pans. Ces pseudo-chœurs qui renforcent la présence et l'éloignement de la chaire, qui est ainsi en quelque sorte sacralisée, ont un intérêt du point de vue acoustique dans la nouvelle configuration des bancs. En effet, le son de l'orateur, qui, dans une disposition centrale, devait être réfléchi dans toutes les directions (frontales et latérales), doit maintenant se diriger uniquement de façon frontale. Les pans de l'abside servent alors de réflecteurs qui renvoient l'énergie sonore frontalement en direction des bancs¹²¹ (cf. Figure 25). Le rationalisme du siècle des lumières apparaît également dans la construction fonctionnelle des églises. Divers savants commencent à se préoccuper des conditions acoustiques des églises, et donnent quelques fondements scientifiques à la notion de réverbération et à son action sur l'intelligibilité de la parole¹²². Le pasteur Elie Bertrand tente ainsi de faire appel aux

¹¹⁸ C'est à cette époque que seront atteints les records de hauteur des chaires en particulier dans les églises comportant des galeries (par ex. St. Esprit de Berne à plus de 3.5 m du sol, cf. Figure 26).

¹¹⁹ Par exemple les temples vaudois des Croisettes, de Carrouge ou du Mont-sur-Lausanne.

¹²⁰ Par exemple les temples de Bussigny, Essertines-sur-Yverdon, Ballaigues, Vallorbe.

¹²¹ Raes relève [24] "qu'une abside bien tracée peut fonctionner comme un amplificateur sans déformations et ajouter 3 à 6 dB à l'audition. Mal tracée, elle peut faire le même effet qu'un second orateur qui brouille le premier".

¹²² Dans son texte intitulé "Sur la construction et l'aménagement intérieur d'une église destinée à l'usage des protestants" [61], Elie Bertrand affirme que "de chacune de ces parties saillantes, ou en relief, partent à chaque instant des sons réfléchis de chaque syllabe, qui parvenant à l'oreille plus tard que le son direct, se confondent avec le son de la syllabe suivante"

sciences pour calculer des formes idéales d'église et d'aménagement du point de vue acoustique et souhaite [61] que les bancs soient disposés "en amphithéâtre depuis le pied de la chaire" et que, "sous la direction d'un mathématicien, on entreprît quelque part une église, dont le pourtour fût terminé par deux paraboles et l'ordonnée, et qu'on essayât d'en placer la chaire au foyer"¹²³.

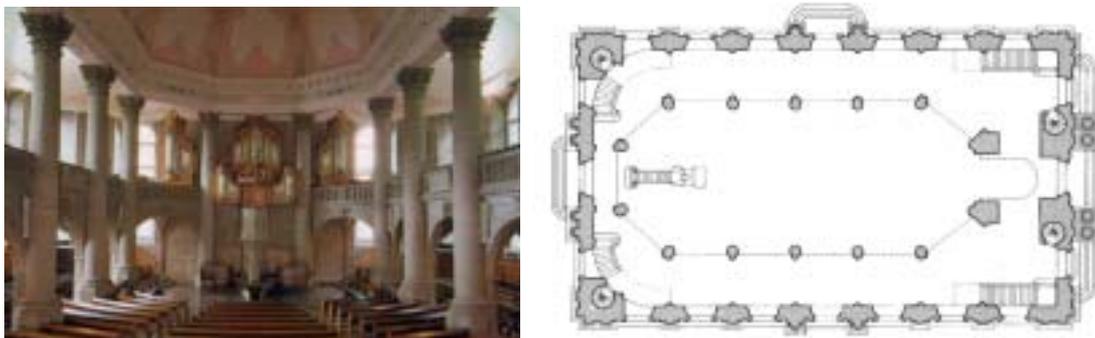


Figure 26 Photo [17] et plan [15] du temple du Saint-Esprit à Bern avec une galerie périphérique et une chaire axiale imposante (XVIII^e)

A cette époque, contrairement à la science, la musique protestante traverse une période critique: "la poésie édifiante se ressent d'un certain nivellement, les textes ne résistent pas au vent de transformation au goût du jour" [44]. La musique de l'ère classique (1750 à 1820), conventionnellement structurée, a pour base également la raison. "Le détail (comme les fioritures qui enjolivent la mélodie de base et donnent le "lustre") et les caractéristiques émotionnelles délicates de la musique du XVIII^e siècle se sont révélées à leur avantage dans les petites salles (ou églises) d'époque souvent bondées (...). Ces lieux étaient souvent lambrissés de bois mince, et la clarté acoustique s'en trouvait accrue, grâce à un temps de réverbération court et une intimité acoustique extrême" [27].

Dans les églises catholiques, la tradition persiste et le rationalisme entre souvent en conflit avec une prise de position plus esthétisante (cf. Figure 27). Ainsi Laugier, qui reconnaît la nécessité fonctionnelle des tribunes, met en garde en affirmant [62] que "rien ne se concilie plus difficilement avec l'ordonnance de l'édifice. On a poussé la chose jusqu'à faire traverser par des tribunes les deux bras de la croisée. Un architecte qui commet pareilles fautes ne se justifie point."

¹²³ Le mathématicien Calandrini s'inspirera peut-être de ce modèle théorique pour réaliser le temple de Chêne-Bougeries.

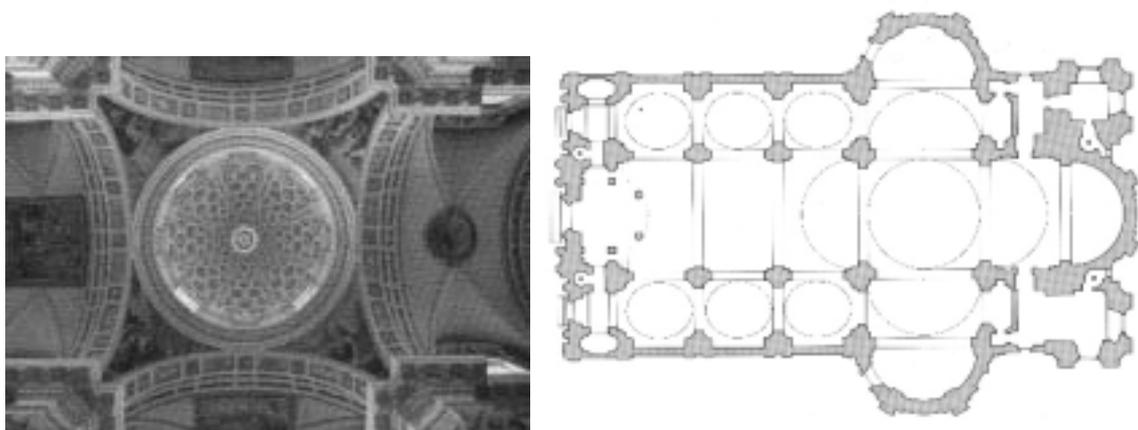


Figure 27 Coupole et plan de la cathédrale de Soleure (1763-1773) [15]

2.3.4.2 Le romantisme et le néomédiévalisme

Dès la fin de la première moitié du XIX^e siècle, certains considèrent que "les considérations d'ordre esthétique et les tentatives de restauration historique l'emportent sur les réflexions théologiques (et pratiques). A cette époque, toute la vie du protestantisme est d'ailleurs marquée par un affaiblissement de la pensée évangélique" [1]. On préféra ainsi, dans les grands temples historiques (comme Genève), supprimer "ces galeries en bois, qui occupaient une si grande place (...) sans rien ajouter (tout au contraire) à la beauté de l'édifice (...) et transporter dans la nef les bancs disposés en amphithéâtre" [38]. Peu nombreux furent ceux qui s'opposèrent à cette tendance qui allait "ôter au temple des galeries qui, tout en le déparant comme objet d'art, lui conservaient le caractère d'un temple protestant" [38].

La nostalgie du Moyen Age et de sa supposée ferveur¹²⁴ permet, d'une certaine façon, de s'extraire de l'inhumanité de la révolution industrielle et du monde moderne [10]. Cette tendance médiévalisante va influencer, en particulier dans l'Eglise catholique, non seulement la conception et la réalisation des églises mais également la liturgie. Les styles néoclassiques reprennent pour modèle les églises gothiques (et dans une moindre mesure romanes), avec leurs caractéristiques (acoustiques) peu adaptées à transmettre un message intelligible (cf. Figure 28). Mais les aspects visuels et le signe de grandeur extérieur de ces "affreux pastiches" [54] sont davantage considérés que les contraintes acoustiques et que leurs implications liturgiques¹²⁵. Avec la copie des traditions médiévales (néomédiévalisme) on retrouve des grandes églises présentant des voûtes élevées et l'utilisation de matériaux réfléchissants induisant une réverbération importante [64] [65]. Selon Jounel [58], "on ne saurait attendre aucune innovation d'un siècle qui fut

¹²⁴ Cette nostalgie de l'époque gothique apparaît bien dans le célèbre texte du *Génie du Christianisme* de Chateaubriand: "On aura beau bâtir des temples grecs bien élégants, bien éclairés, pour rassembler le bon peuple de saint Louis, et lui faire adorer un Dieu métaphysique, il regrettera toujours des Notre-Dame de Reims et de Paris, ces basiliques, toutes moussues, toutes remplies des générations des décédés et des âmes de ses pères".

¹²⁵ De nombreux temples vaudois de la fin du XIX^e et du début du XX^e siècle sont décorés de fresques (cf. par exemple les peintures de Rivier à St.-Jean de Cour à Lausanne [63]).

rubriciste entre tous, les yeux des évêques ne quittant guère les fenêtres de la Congrégation des rites". Les protestants imitent alors le mouvement introduit par les catholiques et construisent à leur tour des édifices dont le style traditionnel, souhaité comme plus authentiquement chrétien, tend à imiter celui du XIII^e siècle, perçu comme le "siècle de la foi" (cf. Figure 29).



Figure 28 Eglises néogothiques Ste-Elisabeth de Bâle (1864) et Sts-Pierre-et-Paul de Leuggern (1853) [15]

La musique, et en particulier l'orgue, prend une grande place dans le culte et de nombreux temples se transforment en véritables "salles de concert" (cf. Figure 29). Le chant de l'assemblée permet heureusement à celle-ci de conserver une "part active dans le culte"¹²⁶. Le XIX^e siècle fut marqué par le romantisme, "une sensibilité nouvelle qui se veut personnelle, s'affirme. Le culte de l'Antiquité, qui prévalut lors de la Renaissance, fait place aux légendes du Moyen Âge (...). Le compositeur exprime son sentiment personnel, avec audace, sinon avec quelque inconvenance: toute licence lui est acquise pour amplifier ses émotions et ses passions" [44]. Nietzsche constate à cette époque que "la musique offre aux passions le moyen de jouir d'elles-mêmes" [66]. Ces excès de la musique romantique conduisent pour finir à exalter plus le sentiment de l'homme que la gloire de Dieu. Les rares œuvres religieuses des romantiques¹²⁷, qui accordent donc la prédominance à l'expression de l'émotion, nécessitent pour leur plein épanouissement et la fusion des timbres des acoustiques généreuses. Comme le décrit Forsyth [27], "l'effet de mélange dû à la réverbérance fonctionne comme des coups de brosse d'un peintre impressionniste estompant le sujet, si bien que l'auditeur est invité à projeter ses

¹²⁶ A. Vinet affirma que "le chant est plus essentiel qu'on le croit ordinairement. C'est un langage que Dieu a donné à l'homme pour exprimer des pensées que ne peut exprimer le langage ordinaire (...). C'est l'acte qui réunit la communauté qui donne aux fidèles une part active dans le culte et dans lequel leur liberté est plus entière" [37].

¹²⁷ Par exemple Brahms, Berlioz, Bruckner, Liszt.

sensations et ses émotions dans l'œuvre, afin d'en percevoir l'image". Profitant des possibilités nouvelles offertes par la révolution industrielle, l'orgue se développe en puissance et en complexité. A cette époque, la musique d'orgue devient aussi brillante qu'expressive¹²⁸. Au rationalisme succède donc une piété plus sensitive. Jusqu'à la fin du XIX^e siècle, la modélisation mathématique des phénomènes liés à l'acoustique intérieure était presque inexistante¹²⁹, conduisant, au mieux, à des traditions empiriques, au pire, à de nombreux défauts acoustiques. Radau affirme ainsi déjà en 1867 [67] que "dans la construction de nos églises, on néglige trop souvent les plus simples principes d'acoustique, et on obtient conséquemment des effets détestables. Le défaut le plus ordinaire est une trop grande sonorité qui empêche les paroles d'être distinctement perçues". C'est dans la deuxième moitié du XIX^e que les travaux de Upham (1853, [68]), Henry (1856, [69]), Rayleigh (1876 et 1894, [70]) et surtout Sabine (1890, [71; 72]) donnèrent des fondements scientifiques dans ce domaine [73; 74] et en particulier sur la nature de la réverbération¹³⁰. Avant cette époque, les succès en acoustique étaient dus, selon l'expression de Forsyth [27] "à une combinaison de l'intuition, de l'expérience et du hasard", ce dernier restant le principal ingrédient¹³¹ avec la sélection naturelle qui conduisait à imiter les églises qui correspondaient aux canons acoustiques de l'époque. Au XIX^e siècle, on prend mieux conscience des avantages et inconvénients acoustiques de certaines formes géométriques et en particulier des voûtes¹³².

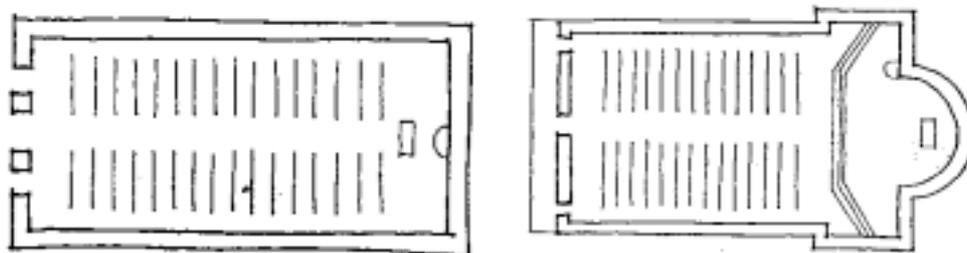


Figure 29 Plans typiques des temples réformés au XIX^e (à gauche) qui s'apparentent à des salles de conférences et de concerts spirituels et au début du XX^e (à droite) avec une scène pour la liturgie [1]

¹²⁸ Par exemple Franck, Widor, Saint-Saëns, Vierne.

¹²⁹ Pour plus de détails sur l'histoire de l'acoustique des salles, on pourra consulter les recherches de Hunt [4] ou Liénard [2].

¹³⁰ On sait, depuis les travaux de Sabine, que le temps de réverbération est proportionnel au volume et inversement proportionnel à la surface totale d'absorption. Cette grandeur détermine principalement l'acoustique d'une salle. Rappelons que l'intelligibilité de la parole comme la qualité musicale en dépendent fortement tout comme la facilité ou la difficulté à s'associer à la célébration.

¹³¹ Le scientifique Chladni affirme en 1809 [75] "qu'il serait très utile de savoir toujours la meilleure manière de construire des salles, pour que le son puisse être entendu partout distinctement. Dans la plupart des salles où l'on y a réussi, cela paraît plutôt être un effet du hasard que d'une théorie exacte".

¹³² Radau relève [67] que "les voûtes circulaires sont en général d'un mauvais effet : elles donnent lieu à une résonance trop forte et trop prolongée. (...) Les voûtes ou salles elliptiques n'ont aucune raison d'être, puisque l'ellipse n'est propre qu'à concentrer en un seul point les rayons partis d'un autre point. La parabole, qui rend parallèles les rayons divergents, se recommande davantage. Chladni propose d'arrondir en parabole le fond d'une salle rectangulaire; cette combinaison se rencontre dans quelques anciennes basiliques. On pourrait compléter l'effet en donnant une courbure parabolique à la voûte du plafond".

2.3.4.3 Le renouveau liturgique du début du XX^e siècle

Au début du XX^e siècle, un renouveau liturgique va exhumer les trésors liturgiques de la tradition médiévale. Ces emprunts aux liturgies anciennes modifient la structure du culte qui s'apparente alors à un rituel romain simplifié et épuré des éléments contraires à la doctrine réformée. L'architecture religieuse est alors marquée d'un côté par le retour aux formes des premiers édifices chrétiens¹³³ (cf. Figure 30) et d'un autre côté par des tendances modernistes et une nouveauté qui consiste à concevoir une église dans un ensemble paroissial (avec des locaux pour toutes sortes d'activités paroissiales autres que la célébration¹³⁴). Ainsi selon Reymond [13], l'architecture des églises tend alors au pittoresque, "le romano-byzantin ou à des combinaisons de plein-cointre et de modern'style, le but étant encore et toujours de faire église, de donner l'impression du religieux".

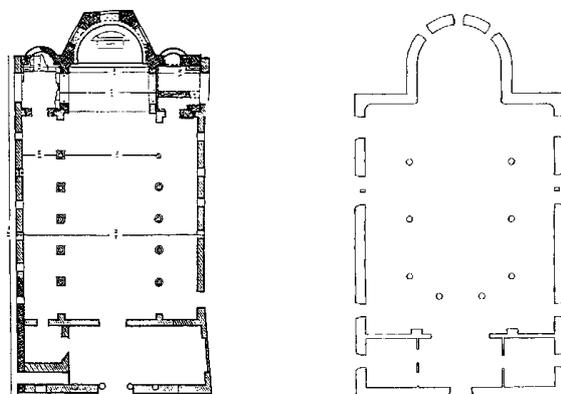


Figure 30 Plan de la basilique San Giovanni a Porta Latina de Rome (IV^e, à gauche) qui sert de modèle à l'église St-Jean de Cour à Lausanne (1913, à droite) [77]

Tant du côté catholique que protestant, les églises se partagent cependant trop souvent entre "les avatars bon marché des pastiches néo-romans ou romano-byzantins et une modernité académique, orgueilleuse, réservée à quelques grands édifices" [78]. Les églises modernes exploitent les possibilités offertes par les nouveaux matériaux (notamment le béton) pour mettre encore l'accent sur le caractère monumental de l'église dont la forme d'ensemble reste relativement traditionnelle¹³⁵. Jusqu'au début des années soixante, la volonté architecturale, centrée sur la primauté de la structure et du matériau, la rigueur du volume et la recherche des formes, l'emporte sur toute autre considération [79]. Par ailleurs, la

¹³³ Pour Thurian [76], tenant d'un courant très liturgisant, "la forme rectangulaire terminée par un chœur en hémicycle est la forme type de toute église chrétienne. C'est celle des basiliques romaines qui furent utilisées par le culte chrétien des premiers siècles".

¹³⁴ Thurian [76] préconise ainsi : "On concevra l'église dans la proximité immédiate du presbytère d'une part et de la maison de paroisse d'autre part, en sorte que toute l'activité ecclésiastique puisse être concentrée en un même lieu".

¹³⁵ L'église catholique St.-Antoine à Bâle (Karl Moser, 1925-27, cf. Figure 31) est un bon exemple de ce type d'édifice qui ouvre une nouvelle voie à l'architecture sacrée moderne en Suisse. Elle se compose ainsi d'une gigantesque ossature en béton armé, dont la voûte nervurée, sensé jouer une fonction acoustique (effective uniquement au niveau de la diffusion), est formée d'une conque prolongée par deux parties latérales horizontales [15]. L'immensité du volume, associée au choix des matériaux réfléchissants, conduit à obtenir une acoustique très réverbérante.

redécouverte de l'héritage du passé va porter également sur les richesses musicales. Ainsi par exemple, après avoir connu une éclipse lors du Réveil, les Psaumes retrouvent progressivement leur place dans les recueils officiels des églises réformées, avec de nouvelles paraphrases¹³⁶. Cette redécouverte du passé s'accompagne également d'une modification des églises. Celles-ci s'adaptent aux exigences de la nouvelle liturgie en créant un espace liturgique surélevé (ce qui est favorable du point de vue acoustique pour la compréhension de la parole, cf. Figure 29 droite), dans lequel prend place la table de communion mais également la chaire et les fonds baptismaux, ainsi "toute l'église s'oriente vers le chœur où tous les éléments de la vie liturgique sont indiqués : la Parole et les Sacrements" [76]. La liturgie devient un peu comparable à l'action dramatique d'un théâtre qui se déroule en dehors ou en face de l'assemblée.



Figure 31 Eglise St-Antoine de Bâle avec sa voûte à caissons en béton, conçue pour des raisons acoustiques (K. Moser 1925-27) [15]

Divers artifices sont utilisés pour créer une ambiance religieuse et évocatrice du mystère de la foi. La mise en scène est essentiellement visuelle, et on constate, comme au Moyen Âge, un affaiblissement des exigences acoustiques (cf. Figure 32). La chaire, qui garde toutefois une certaine importance, est déplacée sur le côté de la "scène", et l'acoustique du temple doit simplement contribuer par sa réverbération élevée à "faire église". Les créations musicales de cette époque, tout en s'imprégnant de la tradition du passé, deviennent plus difficile d'accès (cf. Reichel, Martin et Alain). Cette évolution conduit à retrouver la plupart des éléments du paganisme originel (sanctuaire dans lequel les personnes consacrées exécutent une liturgie qu'observe une l'assemblée mise à l'écart). Le renouveau liturgique apparaît alors plus comme un attachement au passé qu'une nouveauté créatrice.

¹³⁶ Le Psautier romand est adopté par les Églises nationales protestantes de Berne, Jura, Genève, Neuchâtel et Vaud en 1937.

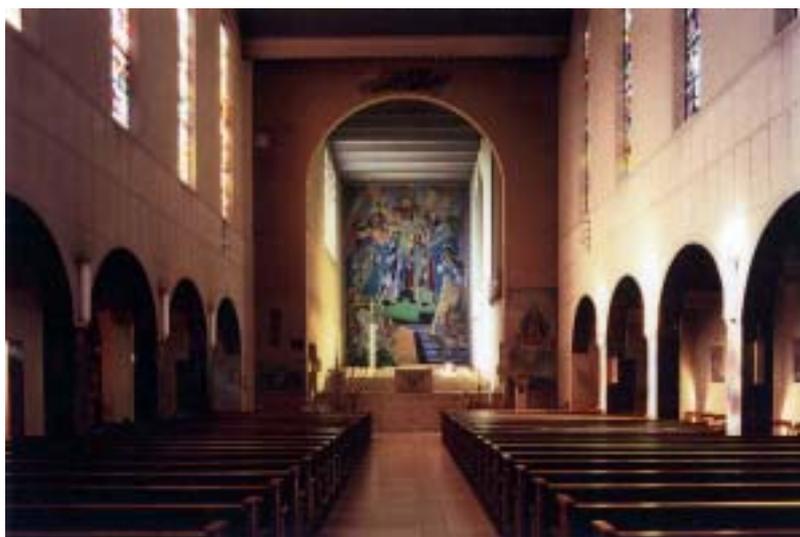


Figure 32 Eglise de St-Pierre de Fribourg avec une disposition en long et un imposant décor pictural (Dumas, 1928-31, photo de Ruffieux)

Après le rationalisme du siècle des lumières et ses temples-auditoires à la chaire dominante, le romantisme, avec son exaltation des sentiments (musicaux) et ses temples salles de concert, a ouvert la période de nostalgie et reproduction du passé "glorieux" de l'Église. Cette période de raidissement et de nostalgie archaïsante fut marquée du point de vue acoustique par de grands changements tant du point de vue de la résonance des églises (après l'intelligibilité de la parole du pasteur on favorise l'ambiance créée par l'orgue), que de son organisation intérieure (en ramenant la communauté au rôle d'auditeurs passifs et individualistes). "Comme le catholicisme au Moyen Âge, et malgré le fait que ses formes religieuses se situent aux antipodes, le protestantisme s'est laissé envahir par l'anonymat de la religiosité païenne individualiste. La religion naturelle triomphe à nouveau au sein du christianisme" [1].

2.3.5 L'époque contemporaine (seconde moitié du XX^e siècle)

Après la deuxième guerre mondiale, on assiste dans l'Église Réformée à l'émergence d'un renouveau théologique, inspiré par Karl Barth. Après un retour nostalgique aux traditions du Moyen Âge, certains théologiens et architectes vont puiser plus loin aux sources de l'Église primitive et de la Parole de Dieu. On redécouvre alors avec force le sens de la communauté, rassemblée par le Christ autour de la Parole de Dieu et de la Cène partagée. La prédication cesse d'être un lieu de culture religieuse individualisante pour retrouver une résonance communautaire et responsabilisante. En se retournant de façon critique vers le passé, on redéfinit la fonction de l'église qui est en effet "de permettre le rassemblement des fidèles appelés non à entendre une conférence ou assister passivement à un mystère, mais à écouter et à rencontrer le Dieu vivant lui-même. Le centre du culte est la parole du Seigneur" [80]. Cette évolution théologique a pour conséquence une transformation des lieux de culte. Au lieu de l'ambiance, c'est la parole qui est à nouveau favorisée ; au lieu du pasteur et des orgues, c'est la communauté rassemblée qui est mise en évidence. Comme au temps de la

Réforme, les croyants, qui assument la responsabilité du culte, sont groupés tout autour de la table sainte et du prédicateur, qui leur sont tous deux à nouveau incorporés¹³⁷. Au niveau acoustique, on favorise non seulement la compréhension de la parole des ministres mais aussi celle des laïcs qui retrouvent une place active dans la liturgie. Ceci est réalisé en partie grâce à l'avènement de la sonorisation mais également par le rapprochement et la convergence des fidèles autour de la chaire. Le chant communautaire retrouve également une importance croissante.

Du côté catholique, une réflexion profonde sur la liturgie de la messe et les contraintes architecturales et acoustiques qui lui sont liées s'amorça dès l'après-guerre. En 1960, Ochse [90] affirmait déjà que "le renouvellement liturgique de ces dernières années correspond au développement du sens communautaire qui fut essentiel dès l'origine du christianisme et que l'individualisme du XIX^e siècle avait de moins en moins pratiqué. L'église paroissiale doit être l'image visible de cette unité des fidèles. La chorale doit redescendre des tribunes et prendre place parmi le peuple afin de l'entraîner aux chants sacrés (...) Il faut que de toutes les places les assistants aient une vue dégagée (et donc une bonne audition) sur l'autel et le chœur, lieu géométrique de convergence de l'édifice (...). Cette nécessité n'apparaît pas aussi nettement dans la composition des églises des siècles passés où les fidèles entendaient la messe plus qu'ils n'y participaient". Pour favoriser la participation des fidèles¹³⁸, le concile de Vatican II (1962-65) a alors introduit la messe en langue vernaculaire comportant obligatoirement une homélie, et célébrée face à l'assemblée et non plus dos à elle. Ces changements, qui sont dans la même ligne que ceux apportés par la Réforme, privilégient la compréhension et l'esprit communautaire. Ils se concrétisent¹³⁹ dans la transformation et la construction de nouvelles églises. Cette révolution dans l'architecture sacrée moderne tente d'exprimer architecturalement la nature communautaire du peuple de Dieu et d'articuler l'espace autour de la célébration eucharistique [10]. Les formes architecturales qui résultent de cette révolution liturgique s'orientent alors vers de nouvelles conceptions qui adoptent des plans centrés¹⁴⁰, par exemple en éventail (cf. Figure 35 à Figure 33). Les églises, alors orientées davantage sur la notion de

¹³⁷ Le concours d'architectes pour la construction du temple de Malagnou (Genève) spécifie explicitement "qu'il est de toute importance que la chaire et la table de communion ne soient pas opposées à la communauté mais lui soient visiblement incorporées (...) et que la table de communion doit être une vraie table tout autour de laquelle la communauté est réunie".

¹³⁸ Dans le chapitre *De arte sacra* de la *Constitution pour la liturgie* (CL) du Concile Vatican II, la participation "pleine et active" (CL 14) de tout le peuple est l'objectif primordial visé par cette réforme liturgique qui définit des normes "pour adapter la liturgie au tempérament et aux traditions des différents peuples" (CL 37-40). La norme suprême dans la construction des nouvelles églises est "qu'elles se prêtent à l'accomplissement des actions liturgiques et favorisent la participation active des fidèles".

¹³⁹ Filthaut [91] affirme en effet que " la réforme de la liturgie introduite par le Concile Vatican II apporte avec elle des conséquences décisives et d'une grande portée sur l'architecture des églises. La nouvelle liturgie appelle nécessairement de nouvelles formes pour les lieux de cultes". L'art. 124 de la Constitution sur la Sainte liturgie du Concile Vatican II mentionne clairement que "lorsque l'on construit des églises, il faut faire très attention à ce qu'elles soient adaptées à la célébration des services liturgiques et à la participation active des fidèles".

¹⁴⁰ Brentini [92] qui mentionne cette évolution, analyse de très nombreux exemples significatifs. Les églises catholiques d'après Vatican II sont ainsi souvent constituées d'un seul volume adoptant un plan centré, ce qui permet d'avoir l'assemblée positionnée autour de l'autel (généralement sur trois cotés de l'autel).

largeur que celle de longueur, favorisent l'intelligibilité de la parole (en réduisant la distance moyenne entre l'orateur et l'auditeur) ainsi que la communion et l'intimité entre les fidèles¹⁴¹ qui peuvent se voir. Les églises à plan centré peuvent cependant présenter des conditions acoustiques peu favorables pour l'écoute de la musique¹⁴² et donner la vision d'une communauté refermée sur elle-même¹⁴³. Le traditionnel lieu saint eucharistique ne se trouve plus devant et hors des fidèles mais au milieu d'eux. A part la proximité des fidèles du lieu de célébration, diverses autres mesures sont prises pour favoriser l'intelligibilité de la parole, comme la baisse du temps de réverbération, l'inclinaison du sol et l'utilisation d'une installation de sonorisation.

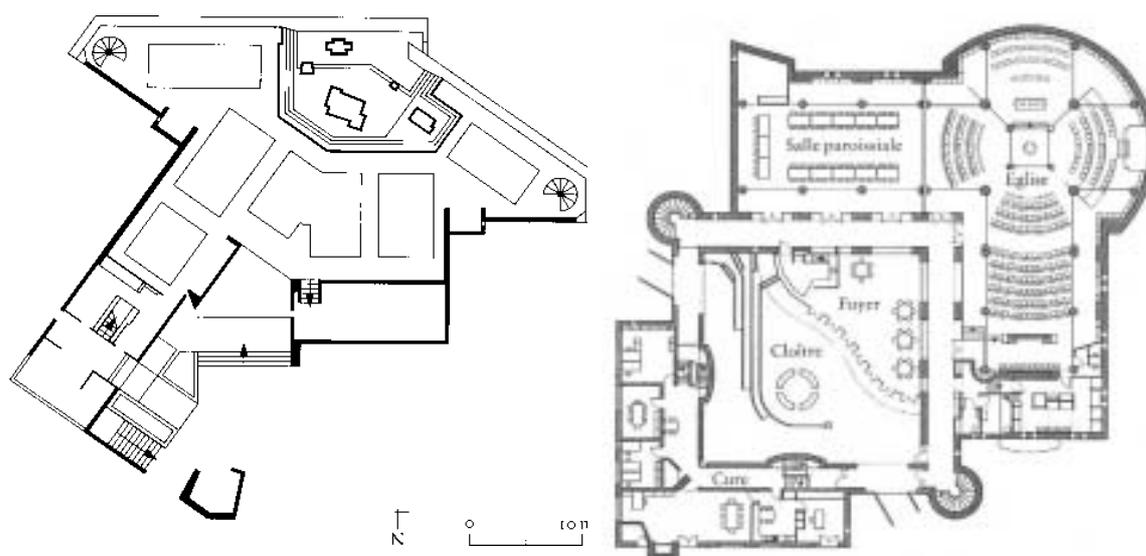


Figure 33 Dispositions centrées d'après Vatican II dans l'église de Zurich-Witikon (à gauche, J. Dahinden, 1966) et le centre paroissial d'Affoltern am Albis (à droite, W. Egli 1979-83) [17]

Le renouveau liturgique issu du Concile Vatican II touche également le domaine musical avec l'emploi de mélodies et de répons chantés simples utilisant un langage contemporain (Gouzes, Gocam, etc.). Selon les recommandations officielles des évêques allemands [94], les musiciens sont invités à prendre place dans un "lieu adapté du point de vue visuel et acoustique. La chorale est comprise à nouveau comme une partie de l'assemblée, ce qui doit transparaître au niveau de son

¹⁴¹ Ce point est contesté par Joyner [10], qui affirme que "l'intimité est facile à obtenir avec 5 personnes assises autour d'une petite table, elle est plus difficile à obtenir avec 50 personnes assises autour d'une plus grande table et virtuellement impossible à obtenir avec plusieurs centaines de personnes assises autour d'une table encore plus grande. L'intimité dépend du nombre de personnes présentes et non de leur proximité physique".

¹⁴² De tels plans induisent un manque de réflexions latérales qui sont très importantes pour l'appréciation musicale. Il est par ailleurs plus difficile de positionner correctement l'orgue avec ce type de disposition.

¹⁴³ Bouyer, défendant la tradition liturgique catholique, affirme ainsi "qu'un édifice circulaire avec des personnes rassemblées autour d'un point centre focal pourrait tendre à créer une communauté fermée sur elle-même et pourrait favoriser une conception statique du culte. Nous ne sommes pas rassemblés dans une église pour y rester mais plutôt pour partir ensemble en pèlerinage dans au travers du monde ici et maintenant et vers le Royaume éternel, la présence eschatologique du Dieu vivant" [93].

positionnement. Le fait de placer le chœur sur une galerie au fond de l'église ne met pas en évidence son appartenance au déroulement liturgique et sera ainsi à éviter dans les nouvelles constructions". La réforme liturgique catholique a enfin conduit dans certains cas à une prise de conscience de l'importance des conditions acoustiques dans les églises. Ainsi, une note pastorale de la conférence des évêques italiens sur la construction de nouvelles églises [95] mentionne l'importance de la forme et de la qualité des matériaux pour garantir un résultat acoustique acceptable. Cette note mentionne en outre "qu'il est important de rappeler que les éventuels défauts de conception sont difficilement remédiables par l'implantation d'une sonorisation".

On assiste cependant également dans l'église catholique à un courant minoritaire qui prône un retour aux valeurs traditionnelles de l'Eglise tant au niveau liturgique (retour à l'ancienne liturgie selon le rite de Saint Pie V) qu'au niveau architectural, musical et acoustique. Les théories développées par Joyner pour l'Eglise anglicane [10], qui préconisent un retour à une forme basilicale pour favoriser le chant choral et la musique d'orgue¹⁴⁴, se retrouvent également, en Suisse, dans certains courants traditionalistes. Le cardinal Ratzinger [96], qui affirme le souci de retrouver et d'approfondir une symbolique vraiment significative¹⁴⁵, parle ainsi de la "nécessité absolue de ranimer, autant que faire se peut, la tradition apostolique de l'orientation (vers l'orient), dans la construction des églises comme dans l'accomplissement de la liturgie", autrement dit, il préconise le retour de la célébration dos aux fidèles. Il souhaite le retour de la récitation du canon à voix basse, afin que les fidèles puissent "adorer en silence". Il souhaite l'abandon des "musiques rythmiques" qu'il qualifie de "sensuelles"

Dans les deux confessions, on redécouvre dans le domaine de l'art religieux (architecture, musique, littérature) un souci d'authenticité et d'intégrité qui conduit à exprimer sa foi dans un langage nouveau et en relation avec l'évolution de l'art profane. Après s'être approprié de façon nostalgique et archaïsante l'héritage du passé, l'art moderne le transforme ou s'affranchit d'une tradition trop limitative. L'époque moderne est alors à la recherche d'un nouveau langage architectural en particulier pour les édifices sacrés. Le Corbusier a joué dans ce domaine un rôle non négligeable pour définir ce nouveau vocabulaire des formes et des espaces pour « loger la prière des hommes ». Le plafond, dont celui de Ronchamp reste emblématique, se révèle alors un des éléments fondamentaux pour sculpter l'espace. L'utilisation du béton permet par ailleurs l'émergence de nouvelles formes de plafonds comme le voile inversé¹⁴⁶, qui induit une diffusion favorable du point de vue acoustique.

¹⁴⁴ Cette forme favorise les réflexions latérales et une réverbération élevée, deux éléments qui sont favorables pour la musique.

¹⁴⁵ La communion doit se faire dans la conversion (qui étymologiquement veut dire se tourner vers) en étant tous (prêtre et laïcs) tournés vers le Christ.

¹⁴⁶ Par exemple dans la chapelle du Servan à Lausanne (Dumas arch.).

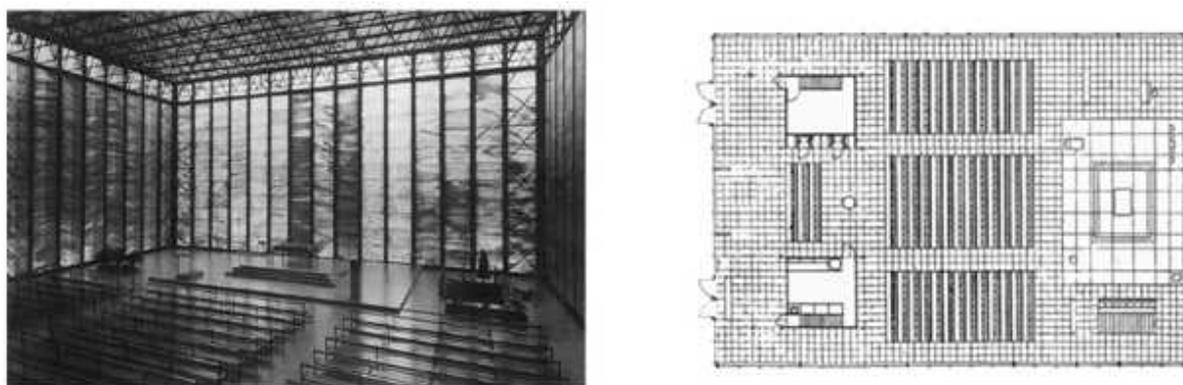


Figure 34 Eglise Saint-Pie à Meggen avec un plan en long et de grandes surfaces réfléchissantes (Franz Füg, 1964-66)

Cependant une radicalisation des concepts architecturaux sans analyse des conséquences fonctionnelles induit souvent de graves conséquences au niveau acoustique. Ainsi pour l'église Saint-Pie à Meggen (1964-66), l'architecte Franz Füg se donne comme principe la simplification structurelle et formelle pour faire « un vide que l'on vient ensuite remplir » qui le conduit à réaliser un édifice parallélépipédique (cf. Figure 34). Cependant, la hauteur importante (13.5 m), associée à une faible diffusion (structure métallique très légère et ajourée) entraîne des réflexions trop tardives. Par ailleurs les grandes surfaces parallèles et réfléchissantes (marbre translucide) induisent des échos également défavorables du point de vue acoustique. Autre exemple avec le symbolisme poussé à l'extrême de l'église de la Ste-Trinité à Genève (Brunoni, 1994), dont la forme semi-sphérique du plafond induit de graves défauts acoustiques (échos flottants, rampants, cf. §6.4.2.3).

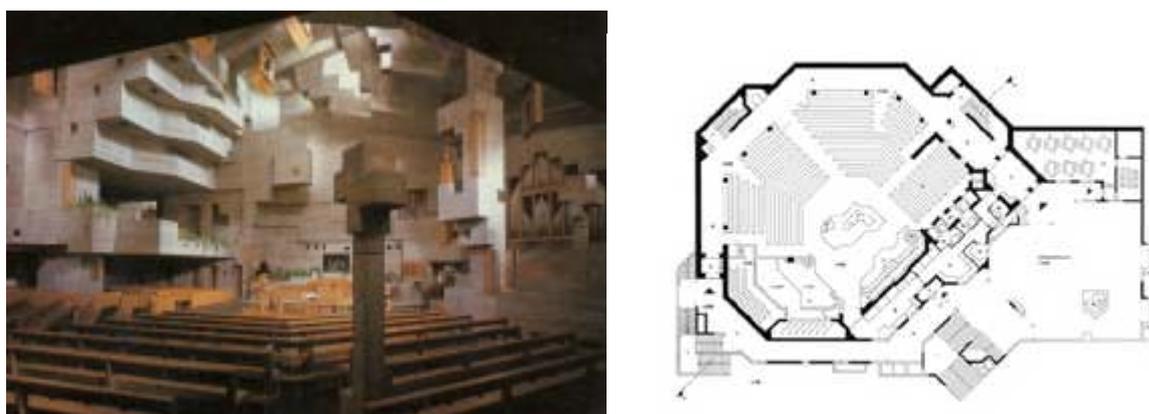


Figure 35 Eglise St-Nicolas d'Héréence avec un plan centré et un plafond très diffusant (Förderer, 1970)

Idéalement, le plafond devrait procurer une bonne diffusion acoustique, ce qui est le cas par exemple dans l'église St-Nicolas d'Héréence, grâce aux nombreux décrochements du plafond (cf. Figure 35) ou dans l'église St-Michel du Rocher à Rarogne avec son volume irrégulier de caverne (cf. Figure 36). Dans ces deux cas, la diffusion, particulièrement importante, permet de mieux tolérer la réverbération élevée des lieux.

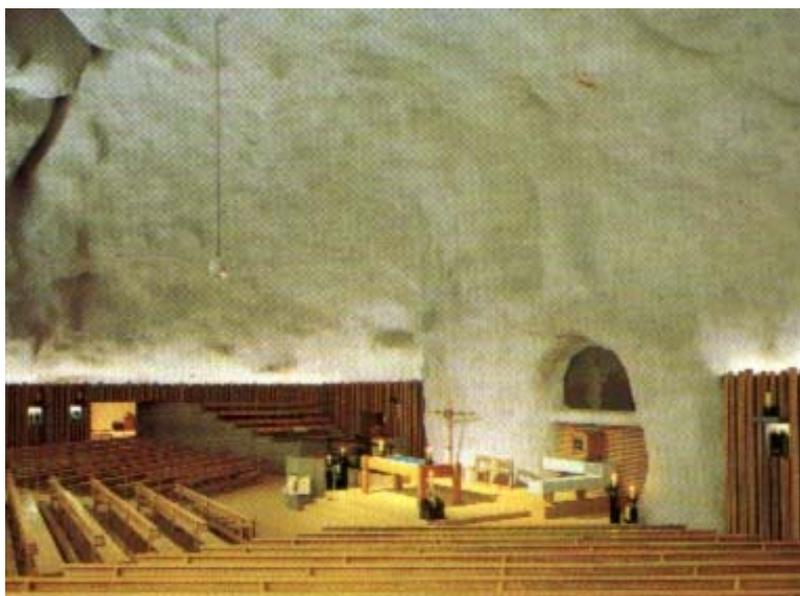


Figure 36 Eglise caverne St-Michel du Rocher à Raron (D. Ruff, 1974)

Une des fonctions acoustiques du plafond peut être la diminution de la réverbération, en particulier pour favoriser l'intelligibilité de la parole, qui devient une préoccupation importante dans l'église catholique après le Concile Vatican II (1962-65). On assiste ainsi à l'utilisation pour les plafonds de divers matériaux absorbants comme les crépis poreux. Le bois revient également sur le devant de la scène pour les édifices sacrés [81], car il permet, comme à la chapelle Mütschi de Walchwil (cf. Figure 37), à St-Mauritius de Berne (cf. Figure 38) ou à St-Joseph de Lausanne (architecte G. Tâche, 1994), de moduler non seulement la forme mais également l'acoustique par un choix judicieux de la composition du plafond. Suivant la situation, les lames peuvent être jointives ou ajourées pour réfléchir (par exemple sur la galerie où se situent l'orgue et la chorale) respectivement absorber le son (dans les zones « parasites »). Les charpentes apparentes en bois permettent par ailleurs souvent de jouer le rôle de diffuseurs acoustiques. Le choix et l'utilisation des matériaux absorbants pour le plafond des églises doivent être faits avec discernement pour ne pas étouffer le son comme c'est le cas des tôles perforées de la chapelle de N.-D.-du-perpétuel-secours à Genève (Brunoni, 1994). Le plafond d'une église permet souvent de moduler non seulement l'acoustique mais également la lumière. Dans bien des cas, en effet, cet élément de la construction permet de gérer la contrainte acoustique mais aussi la mise en scène de l'espace par un apport spécifique de lumière. Ainsi Botta dit-il à propos de l'église de Mogno [82], « j'ai dessiné une chapelle en plan elliptique, avec une géométrie complexe qui, par sa section verticale (son plafond), se transforme en géométrie élémentaire. Ma recherche a porté sur une lumière zénithale « totale » »¹⁴⁷.

¹⁴⁷ La conception de l'espace de l'église fondée sur la relation à la lumière naturelle n'est évidemment pas en opposition avec des exigences acoustiques, comme nous le prouve la cathédrale d'Evry (Botta, 1996) dont l'acoustique est réputée excellente [2].



Figure 37 Chapelle Mütschi de Walchwil avec un plafond en panneaux de bois absorbants et des chaises rembourrées en disposition centrée

Dans bien des cas cependant, l'architecte se soucie plus de la cohérence visuelle que de la qualité acoustique de son œuvre¹⁴⁸. On ne peut ainsi que déplorer les trop nombreux exemples où le souci d'une bonne acoustique n'apparaît qu'avec les plaintes des utilisateurs. Le Corbusier en est conscient lorsqu'il affirme à propos du couvent dominicain Ste-Marie de La Tourette, (Éveux, France) « une inquiétude à avoir, le problème de l'acoustique. Nous avons eu des tentatives et des tentations de vaincre une acoustique difficilement définissable d'avance, très difficilement. On pourrait peut-être scientifiquement le dire mais pratiquement être controuvé par la réalité. Enfin, pour éviter cela, on avait décidé de faire des grands murs polygonaux pour briser le son, les reflets, etc. Seulement, comme on n'avait pas d'argent, on s'est dit : ce n'est pas la peine de les faire, on ne peut pas les faire. Et moi j'étais content de ne pas les faire parce que cela me paraissait superflu et capable d'apporter un tumulte visuel qui m'aurait déplu et qui aurait été en dehors de la belle limpidité de forme qui domine. Il y a ceci d'heureux : l'acoustique semble être excellente. Une mauvaise acoustique pouvait être passible de s'adapter à la liturgie. La liturgie l'accepte. Tant d'églises ont une si mauvaise acoustique qu'on confond la mauvaise acoustique avec la liturgie. Ça crée ce brouhaha, ce mystère, cette confusion qui charme parfois. Ici vous vous trouvez en face d'une acoustique qui peut être d'une grande pureté. Je n'en suis pas responsable, sciemment, pas tout à fait sciemment, mais admettez que j'ai eu du flair ». Il faut cependant aujourd'hui pondérer ces propos en précisant que les utilisateurs de ce couvent se plaignent de

¹⁴⁸ On peut cependant relever avec Boespflug [5] "qu'il n'y a pas à choisir, du moins en théorie, entre l'ouïe et la vue, pour l'une au détriment de l'autre. Le salut doit être annoncé dans chacun des registre sensoriels, et l'on ne saurait soutenir que la Révélation s'est faite par l'ouïe seulement. Il reste que dans le concret, des architectes pourraient le dire, il est inévitable qu'une fonction soit privilégiée, correspondant à une type de participation précis".

sa mauvaise acoustique¹⁴⁹, qu'une bonne planification des qualités acoustiques est maintenant relativement aisée avec les connaissances et outils actuels, et n'implique généralement aucun coût supplémentaire. Il est par ailleurs erroné de penser que la liturgie accepte une mauvaise acoustique, qui ne peut par ailleurs être corrigée par des moyens électroacoustiques¹⁵⁰. La sonorisation permet dans les églises d'augmenter le volume sonore et d'améliorer l'intelligibilité de la parole, mais son utilisation est souvent contraignante et ses performances sont limitées par les conditions acoustiques du volume. C'est à l'architecte, secondé par un acousticien, que revient le souci de créer un lieu dont l'acoustique est adaptée à son utilisation. Au niveau musical, les dernières décennies ont vu, à côté de l'utilisation des Psaumes de la Réforme retravaillés, la recherche de nouveaux textes et de nouveaux moyens d'expression, plus simples, plus faciles d'accès, fortement influencés par l'approche anglo-saxonne de la musique d'église¹⁵¹. Selon Barth [85], les ornements (auditifs et visuels) ne doivent cependant pas "dispenser l'attention et la concentration de la communauté réunie (...). En tant qu'accessoires plus ou moins appréciés et dont on peut en principe se passer, l'orgue et le chœur paroissial n'ont pas à apparaître dans le champ de vision de la communauté rassemblée". Le renouveau théologique est assimilé et traduit sous forme d'édifices nouveaux (ou de transformations) par une minorité d'architectes. Ainsi O. Senn, par ses divers projets¹⁵² et écrits [53; 86-89] deviendra un des porte-parole de ce mouvement. La prise de conscience des conséquences d'une telle démarche et le rejet de l'art pour l'art et de l'esthétisme de forme dans l'œuvre d'art moderne, vue comme "reliquat fortuit, accessoire, sinon fautif", [54] conduiront à l'émergence d'une architecture religieuse austère¹⁵³, rationnelle et fonctionnelle. Servettaz, partisan de l'architecture rationnelle, affirma ainsi "qu'il faut remonter à l'idée primitive de l'église chrétienne ou au type primitif de l'église réformée. L'idée de cette église dans sa nudité catacombale, soit pour ce qu'elle renferme, soit pour ce qu'elle inspire, a fait naître le besoin d'une construction rationnelle, c'est-à-dire le besoin d'une salle d'audition" [54]. Ce rationalisme poussera même Barth à proposer que la table centrale, munie d'un pupitre mobile serve "à la fois de chaire, de table de communion et de fonts baptismaux" [85]. La redécouverte du plan centré, favorable du point de vue acoustique, aussi bien pour l'audition de la parole que pour le chant communautaire, peut se heurter cependant à l'inconvénient psychologique de la vue "gênante, troublante, distrayante, parfois même irritante ou déroutante" [1] des vis-à-vis. Ce

¹⁴⁹ Un des moines du couvent dominicain Ste Marie de La Tourette affirme [83] « à l'usage, quelques autres défauts se révélaient : la sonorité de la maison (...) la mauvaise acoustique de l'église où le son est beau, mais la parole quelquefois inintelligible à cause des vibrations. Pourtant, faire un couvent silencieux en "coupant la route du bruit" et réussir l'acoustique de cette église de Prêcheurs étaient bien parmi les grandes préoccupations de l'architecte ».

¹⁵⁰ Kirkegaard [84] regrette que les questions acoustiques dans les églises soient trop souvent abordées par des principes d'action simplistes du type "si ça bouge, on sonorise; si ça ne bouge pas, on le couvre d'un tapis absorbant."

¹⁵¹ Vitrail, le recueil de chants à l'usage des Églises réformées de langue française, contient des pièces du recueil "J'aime l'Éternel" (JEM qui rassemble des chants issus des mouvements évangéliques anglo-saxons) mais également des extraits du recueil "Arc-en-ciel" (AEC) et enfin des pièces traditionnelles de "Psaumes, Cantiques et Textes".

¹⁵² Cf. par exemple l'église St. Thomas (Bâle), la chapelle St. Nicolas de la cathédrale de Bâle, Rapperswil, etc.

¹⁵³ Le Corbusier, qui a plaidé pour une architecture austère a dit que "l'art est une chose austère qui a ses heures sacrées" (cité d'après Servettaz [54]).

conflit entre les avantages acoustiques et les inconvénients visuels a entraîné les architectes vers de nombreux compromis, souvent insatisfaisants, comme la symétrisation diagonale « en épi » (bâtarde des dispositions en long et en large) pour éviter aussi bien les travées parallèles que les face-à-face. Avec Biéler [1], on peut se demander cependant "si la crainte de se trouver en face de tel ou tel personnage et le désir de se plonger dans une sorte d'anonymat liturgique n'est pas justement la tentation première qui est à l'origine de toutes les infidélités ecclésiastiques: le refus de la communion surnaturelle" qui passe par une union non seulement visuelle mais également acoustique.

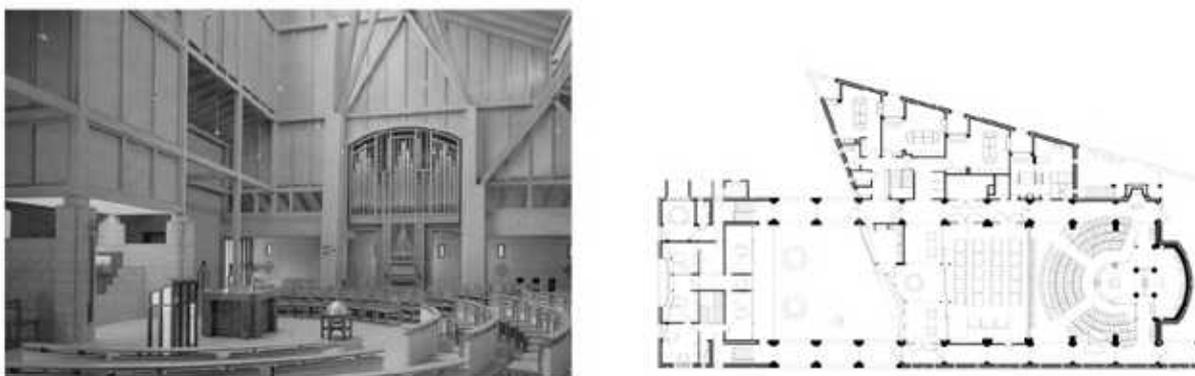


Figure 38 Eglise St-Mauritius de Berne-Bethlehem utilisant le bois et une disposition centrée (Egli, 1981-83)

Au-delà des différences liturgiques, on constate en deuxième moitié du XX^e siècle, parfois chez les protestants mais surtout chez les catholiques, une même redécouverte du sens de la communauté, rassemblée par la Parole de Dieu et le sacrement de la Cène. Cette évolution théologique se traduit par une transformation fonctionnelle des édifices religieux qui retrouve le plan centré et favorise la compréhension de la parole en particulier par l'utilisation de sonorisation. L'œcuménisme vécu favorise le rapprochement des conceptions (acoustiques) des églises et la découverte de nouveaux styles musicaux (Taizé).

2.3.6 Synthèse du survol historique

La synthèse du survol historique est présentée sous forme de tableau en page suivante.

Synthèse du survol historique
(C: Catholique, P: Protestant)

Époque	Style et type d'église	Piété	Liturgie	Musique	Acoustique	Tendance
Eglise primitive (I ^{er} – III ^e)	Edifices fonctionnels non spécifiques (Synagogue, Eglises domestiques, catacombes)	Communautaire, joyeuse	Enseignement, partage fraternel de la Cène	Hymnes chantés par l'assemblée	Favorise l'intelligibilité et le partage communautaire. Peu de problème (volume de taille réduite)	Synthèse des traditions sacrificielles et synagogales juives
Église triomphante (IV ^e – XV ^e)	Basiliques civiles puis martyriums puis cathédrales majestueuses et symboliques (roman et gothique) Seul le chœur est agencé.	Individuelle et pénitentielle	Sacrifice de la messe dans le chœur par les clercs, procession des fidèles. Puis apparition des prônes séparés de la messe.	Mélodies grégoriennes chantées par les chantres (Pérotin)	Réverbérante, favorise l'ambiance (contrainte secondaire)	Religiosité païenne, judaïsme sacrificiel
Réforme et Contre-Réforme (XVI ^e –XVII ^e)	P : Temples fonctionnels. Les bancs convergent autour de la chaire. C : grandes églises très décorées (baroque)	P : sobre, communautaire, C : liturgie majestueuse	P : Proclamation de la Parole de Dieu, célébration communautaire de la Cène C : Sacrifice de la messe.	P : Hymne et Psaumes huguenots puis cantates, passion (Bach). C : Polyphonie (Gabrielli, Victoria)	P : Sèche, favorisant la parole et la participation communautaire (contrainte essentielle) C : Réverbérante, favorisant la musique	Retour à la tradition de l'Église primitive
Siècle des Lumières (XVIII ^e)	P : Classicisme, bancs en long devant une chaire monumentale, orgue C : Bancs face à l'autel	P : Individuelle et rationaliste	P : Conférence spirituelle intellectuelle	C : Messes et compositions liturgiques pour chœur et solistes (Vivaldi, Mozart)	P : Relativement sèche. Favorise la parole (contrainte importante) C : Très réverbérante	Orthodoxie protestante. Intellectualisme
Renouveau liturgique (XIX ^e début XX ^e)	Néoclassicisme (bancs en long devant un espace liturgique, orgue) C : Néomédiévalisme (surtout néogothique), grandes églises.	P : Individuelle, sentimentaliste C : Nostalgie de la piété médiévale	P : Discours pieux, brillantes manifestations musicales, théâtralisation	Romantisme, exaltation du sentiment personnel. Grandes pièces pour orgue (Bruckner, Vierne, Franck)	Plus réverbérante. Favorise l'ambiance (contrainte plutôt secondaire)	Nostalgie du Moyen âge Piétisme
Contemporaine (deuxième moitié du XX ^e)	Eclatement stylistique (symbolisme et rationalisme). C: Redécouverte du plan centré et de l'héritage des diverses époques.	Recherche de communion dans un environnement individualiste	P : Prédication et Ste Cène. Diversification liturgique. C : messe en langue vernaculaire, devant l'assemblée, homélie.	P : Révision des psaumes huguenots P + C : utilisation d'un répertoire plus simple (Vitrail, Une même Voix)	Très variable (l'originalité architecturale prime). Utilisation sonorisation. C : Favorise l'intelligibilité et la participation communautaire	Nostalgie de l'Église primitive (C) et de la Réforme (P). Œcuménisme.

2.4 Analyse des liturgies actuelles

2.4.1 Introduction

Après ce survol historique, la question des conditions actuelles des célébrations religieuses émerge légitimement. Nombreuses sont les théories et les impressions qui circulent au sujet des offices dominicaux, mais celles-ci ne peuvent pourtant être vérifiées en l'absence de données objectives. Nous avons dès lors entrepris, pour cette étude des célébrations actuelle, de prolonger notre étude bibliographique par une analyse quantitative de la répartition et la durée des divers types d'interventions durant les cultes et messes. Cette étude de l'analyse temporelle de quelques offices dominicaux en Suisse romande, tente de décrire quantitativement la durée des activités qui s'y déroulent, d'analyser les différences entre culte et messe, entre célébrations ordinaires et festives, et d'étudier enfin l'importance donnée aux divers types d'activités (parole et musique) et aux divers intervenants.

2.4.2 Méthodologie

Pour déterminer objectivement la durée des diverses interventions durant une célébration, nous avons procédé à une analyse statistique de la répartition temporelle des activités liturgiques sur la base de l'étude détaillée de 16 célébrations (8 cultes et 8 messes). Le nombre de célébrations a été déterminé de façon à obtenir un écart type relativement stable entre les diverses célébrations. Seules les liturgies relativement ordinaires ont été prises en compte (les célébrations incluant des interventions plus particulières comme des baptêmes, des témoignages ont été écartés de notre analyse).

Les célébrations furent généralement enregistrées, puis leur déroulement analysé ultérieurement. Cette étude ne s'attache pas à analyser le déroulement chronologique des célébrations mais plutôt à quantifier temporellement les divers types d'interventions. Notre étude se penche ainsi uniquement sur la durée cumulée des divers types d'activités au cours d'une célébration. Nous avons ainsi distingué les interventions suivantes : la prédication, les prières (louange, adoration, intercession, invocation), les lectures bibliques, les interventions liturgiques parlées (confession des péchés et annonce du pardon, confession de foi, offrande, liturgie de communion, bénédiction), les autres paroles (accueil, ouverture, annonces, envoi). Par souci de simplification, et pour contourner la difficulté de distinguer entre chant et liturgie chantée, en particulier lors des messes, nous avons regroupé les interventions chantées de l'assemblée dans une seule catégorie (chant de l'assemblée). Du côté du culte réformé, il est parfois difficile de classer certaines paroles, qui sont à la frontière entre la parole (introduitive ou explicative d'un moment), la liturgie et la prière.

Une distinction a été faite selon la confession (catholique ou réformée) et les divers intervenants (ministre, officiants, musiciens, assemblée). Nous avons enfin regroupé les activités demandant une certaine intelligibilité de la parole (approche cognitive) et de celles musicales, qui demandent au contraire une certaine réverbération (approche plus émotive). La présence d'une chorale influençant le déroulement

liturgique, une distinction a été faite entre les célébrations sans chorale, appelées "ordinaires", et celles "avec chorale". Notons que l'appellation "ordinaire" est cependant parfois inappropriée dans le cas de certaines paroisses catholiques bénéficiant très régulièrement (typiquement 2 fois par mois), et de façon ordinaire, de la présence d'une chorale. Dans le cas des cultes, la participation d'une chorale est plus rare et elle a lieu à l'occasion de célébrations particulières¹⁵⁴. Précisons enfin que, dans notre étude, la célébration de la Cène fait partie uniquement des cultes avec chorale (les cultes ordinaires considérés ne comportent pas de liturgie du Repas du Seigneur).

2.4.3 Analyse

2.4.3.1 Culte ordinaire

D'après notre analyse statistique, un culte réformé ordinaire dure en moyenne un peu plus de 56 minutes (l'écart type entre les cultes est d'environ 8 minutes). On peut distinguer schématiquement 3 groupes d'activités d'égale durée dans un culte réformé (cf. Figure 39), soit la prédication, les autres interventions parlées (paroles, liturgie parlée, lectures, prières) et les parties musicales (chant de l'assemblée et orgue). Malgré la baisse sensible de sa durée aux cours des dernières décennies, la prédication, avec un tiers de la durée totale, reste donc la partie principale d'un culte réformé ordinaire. Elle varie cependant relativement d'un culte à l'autre (entre 24% et 39% du temps total, l'écart type entre les cultes étant de 6%) et peut durer de moins de 13 minutes à plus de 25 minutes.

Les autres interventions parlées sont, dans l'ordre, les prières (11% du temps total en moyenne), les paroles d'introduction ou d'annonce (8%), les lectures bibliques (7%) et finalement les interventions liturgiques (4%). Les prières sont principalement constituées de textes lus ou d'interventions libres par le pasteur, et leur durée varie sensiblement d'une paroisse à l'autre (entre 5 et 15% du temps total, l'écart type entre les cultes étant de 4%). La lecture d'un psaume au début du culte, qui est une spécificité réformée, se situe au carrefour entre prière, liturgie et lecture biblique. Les prières issues des officiants (en général la prière d'illumination avant les lectures) ou de l'assemblée (Le Notre Père) sont souvent assez courtes voire absentes dans certains cas.

Quant à la partie musicale, les interventions sont partagées de façon égale entre le chant choral de l'assemblée (18% du temps total en moyenne) et les morceaux d'orgue (17%) comprenant principalement le prélude, l'interlude après la prédication (les interludes après les lectures étant généralement assez courts) et le postlude. La durée du chant de l'assemblée varie relativement d'une paroisse à l'autre (entre 13 et 26% du temps total, l'écart type entre les cultes étant de 5%), non seulement du fait du nombre de cantiques mais également par le choix des strophes chantées. Certaines paroisses chantent en effet systématiquement les cantiques dans leur intégralité, d'autre n'utilisent qu'une à deux strophes par cantique. Selon l'organiste de service, les interventions de l'orgue varient également relativement d'une paroisse à l'autre (entre 13 et 24% du temps total, l'écart type entre les cultes étant de 4%).

¹⁵⁴ Ces célébrations, à l'occasion de circonstances particulières, rassemblent une assemblée occasionnelle. Suivant la distinction faite par la Commission de liturgie de l'Eglise Evangélique du Canton de Vaud (cf. par exemple *Chantez en l'honneur du Seigneur un chant nouveau*), elles correspondent typiquement à des célébrations du type "B".

Notons enfin le peu de place laissé au silence dans le culte réformé (1% de la durée totale).

De façon générale, la structure du culte est relativement simple, celui-ci étant constitué d'interventions assez longues, les changements d'intervenants étant peu nombreux. La structure du culte, relativement libre, peut cependant beaucoup varier d'une célébration à l'autre.

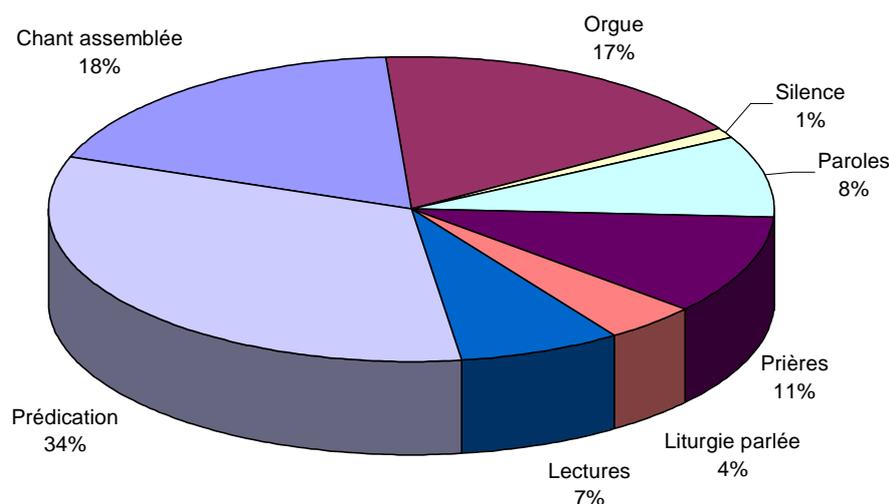


Figure 39 Répartition temporelle des activités liturgiques durant un culte ordinaire (valeurs moyennes)

2.4.3.2 Messe ordinaire

La durée moyenne d'une messe ordinaire (sans chorale) est comparable à celle d'un culte ordinaire (55 minutes \pm 6 minutes). Lors d'une messe, on peut distinguer schématiquement 4 groupes d'activités d'égale durée (cf. Figure 40), soit les interventions parlées, en particulier liturgiques (paroles, liturgie parlée, prières), la lecture et la prédication, les parties chantées (chant de l'assemblée et liturgie chantée) et les moments plus contemplatifs (orgue ou silence).

La messe se distingue plus particulièrement d'un culte réformé par l'abondance et la richesse des interventions liturgiques. L'analyse statistique montre en effet que les interventions liturgiques parlées sont beaucoup plus importantes dans les messes (11% du temps total en moyenne contre 4% pour un culte). La messe se caractérise en particulier par des interventions liturgiques chantées par le prêtre. Celles-ci sont en moyenne peu nombreuses (3% du temps total) mais peuvent prendre une place assez importantes dans certaines liturgies, en particulier lorsque celles-ci sont assez

conservatrices (jusqu'à 9% du temps total). Les prières, tout aussi nombreuses mais généralement plus courtes, durent moins longtemps que dans le culte réformé (8% du temps total en moyenne contre 11% pour un culte).

La durée de l'homélie est nettement plus courte que celle d'une prédication réformée, mais elle varie encore plus d'une messe à l'autre (entre 10 et 30% du temps total, l'écart type entre messes étant de 8%) et peut durer de moins de 6 minutes à 18 minutes. Les lectures bibliques sont comparables à celles d'un culte mais elles sont souvent précédées et entrecoupées d'interventions liturgiques, (parlée ou chantée), alors que durant un culte c'est plutôt la prière qui les précède et la musique d'orgue qui les ponctue. Notons qu'un psaume, lorsqu'il est lu dans une messe, fait partie de la liturgie de la parole alors qu'il est plutôt utilisé comme prière introductive (et considéré comme tels dans notre étude) dans le culte.

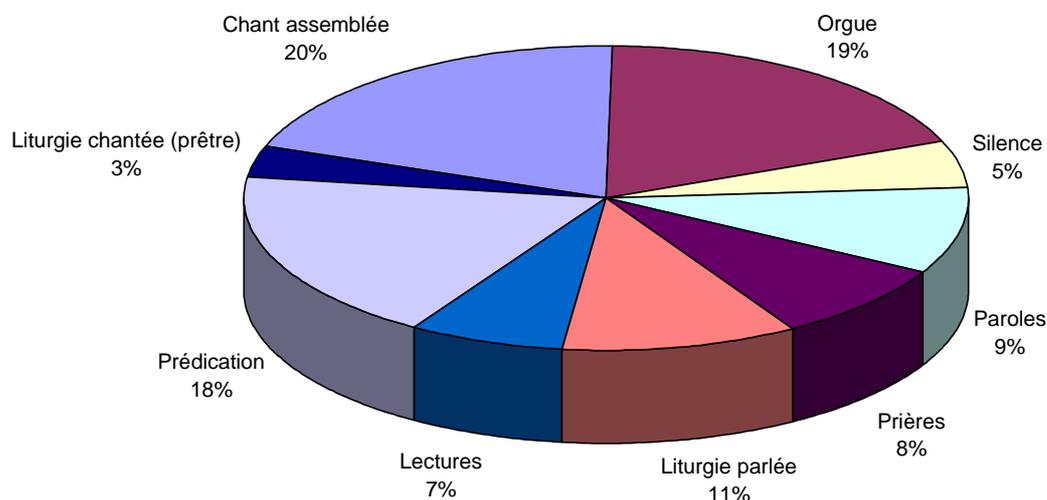


Figure 40 Répartition temporelle des activités liturgiques durant une messe ordinaire (valeurs moyennes)

Quant aux interventions musicales, plus longues que dans les cultes, elles sont partagées de façon égale entre le chant choral de l'assemblée (20% du temps total en moyenne) et les morceaux d'orgues (19%). La durée du chant de l'assemblée, qui comprend également les interventions liturgiques chantées, varie également relativement d'une paroisse à l'autre (entre 13 et 23% du temps total, l'écart type entre les messes étant de 4%), du fait du nombre et de la durée des chants utilisés. Les interventions de l'orgue varient également relativement d'une paroisse à l'autre (entre 13 et 27% du temps total, l'écart type entre les messes étant de 5%). Rappelons que la messe comprend en outre de nombreuses parties liturgiques chantées par le prêtre ou dialoguées entre le prêtre et l'assemblée. Contrairement au

culte réformé, la messe laisse davantage de place au silence (5% de la durée totale). Cette tendance s'explique d'une part par la succession d'interventions relativement courtes avec de nombreux changements d'intervenants, qui requièrent chaque fois quelques secondes de silence et d'autre part par la classification, dans les moments de silence, du partage de la paix qui, dans les cas observés, apparaît comme spécifiquement catholique.

La structure de la messe, qui semble plus complexe et plus dynamique que celle du culte réformé, se modifie peu d'une célébration à l'autre.

2.4.3.3 Présence d'une chorale

La présence d'une chorale, généralement lors d'une célébration plus festive, change quelque peu le déroulement d'une célébration dominicale. Nous avons donc séparé les cultes et messes incluant la participation d'une chorale (paroissiale ou invitée).

Lorsqu'elle est présente, une chorale participe très activement à la célébration en particulier lors des messes (25% du temps total, 16% pour les cultes, cf. Figure 41). L'organiste, devenant accompagnateur, réduit sa participation comme soliste, en particulier lors des messes (on passe de 19% sans chorale à 7 % avec chorale, et de 17 à 12% dans un culte). C'est également dans les messes que la présence d'une chorale entraîne la plus grande diminution du chant de l'assemblée (on passe de 20% sans à 9% avec chorale, et de 18% à 15% dans un culte), car celle-ci chante alors une grande partie de la liturgie habituellement chantée par les fidèles.

La participation d'une chorale induit également une baisse de la durée des paroles, surtout lors de messes (baisse de 6%, respectivement 2% pour les cultes) ainsi que des prières (baisse de 2% pour les messes et 3% pour les cultes). L'accueil, l'ouverture de la célébration et l'envoi par le ministre sont alors raccourcies mais prolongées d'une certaine façon par des interventions de la chorale.

La chorale induit une baisse de la longueur des prédications lors du culte (on passe de 33% à 28% avec chorale) qui peut s'expliquer par la nécessité de "libérer" du temps pour les interventions chorales en concentrant le message de la prédication. Au contraire, l'homélie s'allonge plutôt lors des messes avec chorale (on passe de 18% à 21% avec chorale), qui sont plus solennelles et où le prêtre prend davantage de temps pour approfondir son message. Seuls les éléments liturgiques parlés deviennent plus conséquents en présence d'une chorale, en particulier lors de cultes (la durée totale passe de 4% sans chorale à 8% avec chorale, et de 11 à 13% lors de messe), ce qui s'explique par le côté plus festif et solennel des célébrations qui apparaît par un renforcement des interventions liturgiques (parlées mais également chantées) et en particulier par la célébration de la Cène dans les cultes analysés. Enfin, la présence d'une chorale n'affecte pas la liturgie chantée par le prêtre ou la durée des silences.

De l'acoustique des églises en Suisse – Une approche pluridisciplinaire

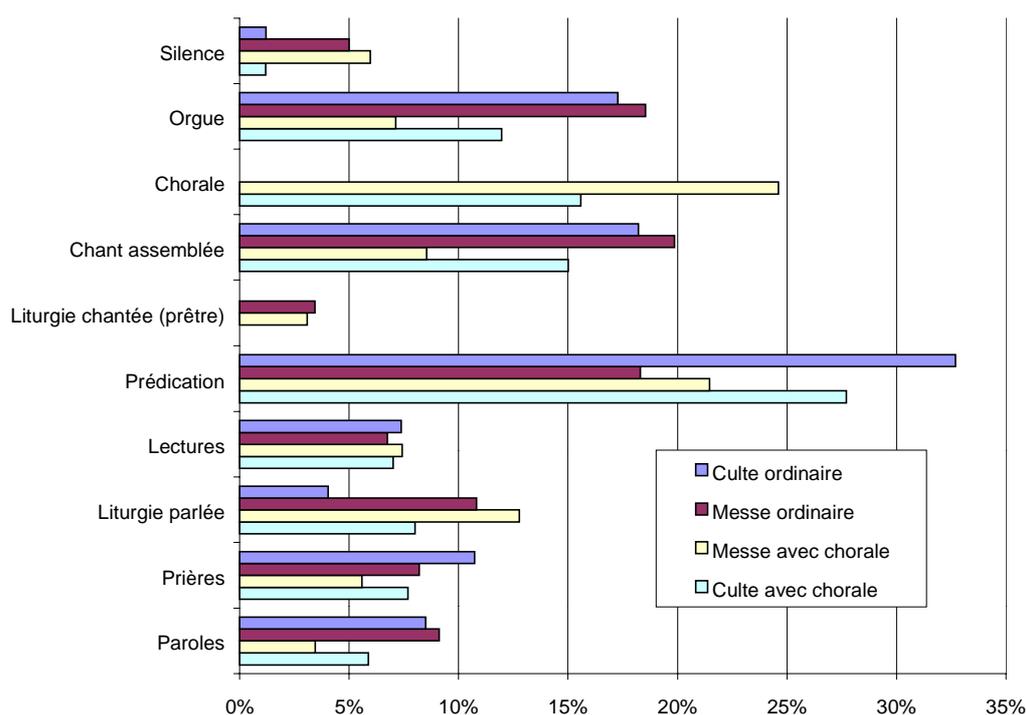


Figure 41 Comparaison de la répartition temporelle des activités liturgiques durant les divers types de célébrations, en particulier en présence d'une chorale (valeurs moyennes)

2.4.3.4 Parole et musique

Les catégories analysées ont été alors réunies en trois groupes composés d'une part des activités basées sur une communication cognitive demandant une bonne intelligibilité de la parole, d'autre part les activités basées sur une approche plus affective (musique) demandant une certaine ambiance, résultant notamment de la réverbération de l'église et enfin les moments de silence, favorisés par un bruit de fond suffisamment bas.

Tableau 1 Répartition entre parole, musique et silence (valeurs moyennes)

	Parole	Musique	Silence
Culte ordinaire	63%	36%	1%
Messe ordinaire	53%	42%	5%
Messe avec chorale	51%	43%	6%
Culte avec chorale	56%	43%	1%

Nous constatons (cf. Tableau 1) que la plus grande place est laissée aux éléments liés à la parole et ceci quelle que soit la célébration. Cette tendance est cependant nettement plus prononcée lors des cultes ordinaires (63% du temps total est constitué de paroles) que durant les messes ordinaires (53%). Les messes ordinaires laissent donc davantage de place à la musique et au silence. Ces répartitions varient cependant relativement d'une célébration à l'autre (l'écart type entre célébration des contributions parlées et musicales est de 8% pour les messes et 6% pour les cultes).

La participation d'une chorale augmente sensiblement (de 7%) la contribution des éléments musicaux lors des cultes, mais elle n'influence pas que peu la répartition pour les messes.

2.4.3.5 Intervenants

Les catégories analysées ont été enfin divisées en quatre groupes suivant les intervenants. Nous avons ainsi distingué les ministres (pasteur ou prêtre), les officiants (lecteurs laïc), les musiciens (organiste, éventuellement instrumentiste(s) et chorale) et l'assemblée.

Lors d'un culte ordinaire, le pasteur intervient plus de la moitié du temps (53% de la durée totale). Le reste du temps se partage entre l'assemblée (19%), l'organiste (17%) et le ou les officiants (9%). L'assemblée, qui intervient moins d'un 1/5 du temps, est donc relativement passive. Elle assiste donc davantage au culte qu'elle n'y participe activement, étant entendu que l'écoute attentive constitue évidemment une forme de participation. Au vu de la maigre participation de l'assemblée durant un culte ordinaire, la notion de sacerdoce universel apparaît être plus théorique que pratique dans ces célébrations. La participation du pasteur varie relativement d'une célébration à l'autre (écart type de 8% entre les cultes). On remarquera que les pasteurs prêchant longuement ont tendance à parler également beaucoup mais à limiter leurs interventions sous forme de prières. La participation des lecteurs dépend non seulement de la longueur des lectures, mais également de la durée de leur éventuelle participation à la prière d'illumination (avant les lectures), à l'introduction des lectures (présentation du contexte) et à la prière d'intercession.

Contre toute attente, le prêtre, malgré son importante implication au niveau liturgique (sous forme de parole aussi bien que du chant), intervient moins souvent durant la messe (45% de la durée totale), laissant davantage de place à la participation de l'assemblée (25%) et à l'organiste (19%). La place laissée à l'assemblée durant une messe ordinaire est notamment due à la présence systématique de parties dialoguées (répons parlés ou chantés) et de textes liturgiques récités par l'assemblée (Credo, Notre Père). Du fait que le prêtre effectue la lecture de l'Évangile, la participation du lecteur est légèrement plus faible dans la messe (7%) que dans le culte.

La présence d'une chorale induit une nette augmentation de la participation des musiciens (32% du temps total des messes, 28% pour les cultes) qui se fait, surtout dans le cadre des messes, au détriment de la participation de l'assemblée (la participation de l'assemblée diminue de 15%, mais seulement 3% dans le cas du culte), surtout sous l'angle du chant. La présence d'une chorale rend le fidèle plus spectateur que participant à la messe. La fête liturgique devient alors plus un spectacle qu'un partage. De par l'effet constaté sur la durée des prédications, l'intervention d'une chorale induit une baisse sensible de la durée de la participation des pasteurs mais une augmentation de celle des prêtres qui interviennent alors tous deux globalement de façon analogue (48 % du temps total). La répartition des interventions lors d'une célébration avec chorale est assez constante d'une célébration à l'autre tant pour le culte que pour la messe (écart type d'environ 2%).

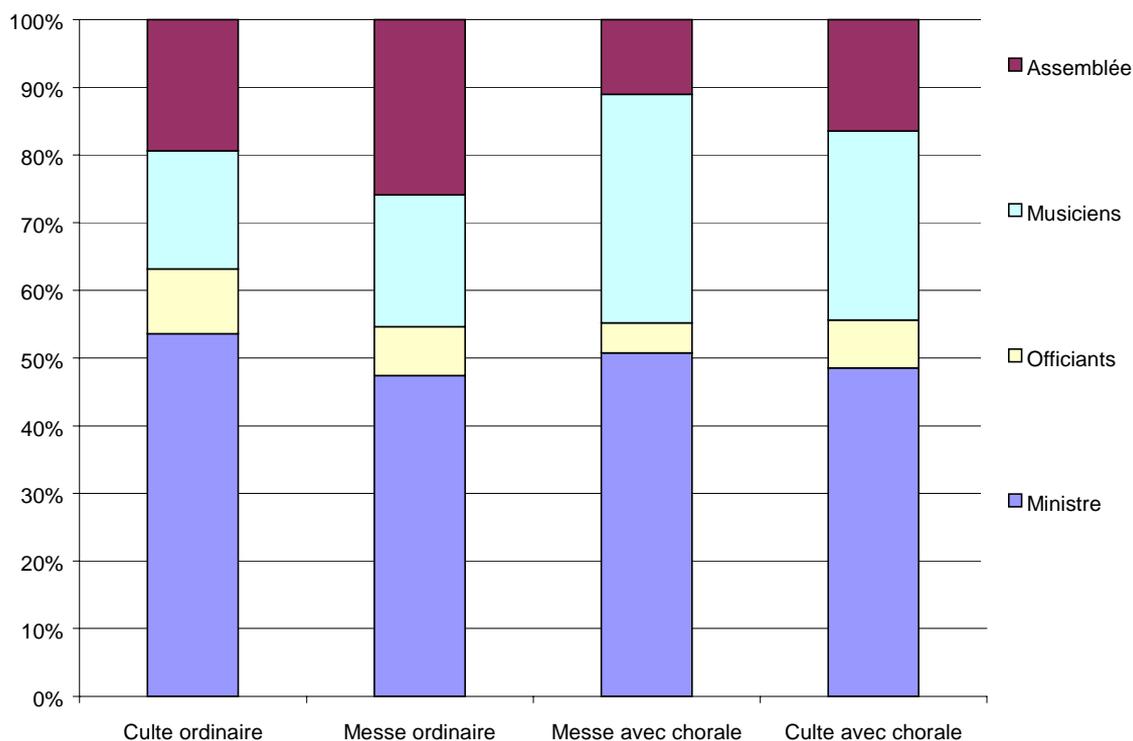


Figure 42 Contribution temporelle des divers intervenants

2.4.4 Conclusion

De façon générale, la structure du culte est simple (interventions assez longues avec peu de changements d'intervenants) et assez souple (nombreuses variations possibles d'une célébration à l'autre). Au contraire, la structure de la messe est plus complexe et dynamique (succession rapide d'interventions relativement courtes avec des nombreux changements d'intervenants) mais plus rigide.

Le culte réformé se partage de façon égale entre la prédication (qui reste donc le point essentiel et central du culte avec 1/3 du temps total), les autres interventions parlées (paroles, liturgie parlée, lectures, prières) et les parties musicales (chant de l'assemblée et orgue). De même durée moyenne que le culte (environ 55 minutes), une messe ordinaire se distingue par sa richesse liturgique. La messe peut se partager en quatre parties égales entre les interventions parlées, en particulier liturgiques (paroles, liturgie parlée, prières), la lecture et la prédication, les parties chantées (chant de l'assemblée et liturgie chantée) et les moments plus contemplatifs (orgue ou silence).

La participation d'une chorale, généralement assez active (25% du temps total pour les messes, 16% pour les cultes) se fait au détriment de celle de l'assemblée et des interventions solistes de l'orgue et dans une moindre mesure pour la durée des paroles (accueil, ouverture, annonces, envoi), surtout lors de messes. La présence d'une chorale lors de célébrations plus festives conduit à un renforcement des

interventions liturgiques parlées, et dans le cas des messes, de la durée de la prédication.

Les célébrations ordinaires (en l'absence d'une chorale) sont constituées, surtout dans le cas des cultes, d'interventions parlées (63% du temps total, 53% pour les messes). Les messes ordinaires laissent davantage de place à la musique et au silence. La participation d'une chorale augmente sensiblement (de 7%) la contribution des éléments musicaux lors des cultes, mais elle n'influence que peu la répartition entre paroles et musique lors des messes.

Lors d'un culte ordinaire, le pasteur intervient plus de la moitié du temps (53% de la durée totale). Le reste du temps se partage entre l'assemblée (19%), l'organiste (17%) et le ou les officiants (9%). L'assemblée, qui intervient moins d'un 1/5 du temps, est donc relativement passive. Le prêtre, malgré son importante implication au niveau liturgique, intervient moins souvent durant la messe (45% de la durée totale), laissant davantage de place à la participation de l'assemblée (25%) et à l'organiste (19%). La présence d'une chorale induit une nette augmentation de la participation des musiciens (32% du temps total des messes, 28% pour les cultes) qui se fait, surtout dans le cadre des messes, au détriment de la participation de l'assemblée.

Cette étude, basée sur l'analyse temporelle de 16 offices dominicaux en Suisse romande, nous a permis de décrire quantitativement la répartition temporelle des divers éléments qui les constituent. Nous avons pu analyser les différences entre culte et messe, étudier les effets de la participation d'une chorale et constater l'importance donnée aux divers types d'activités (parole et musique) et aux divers intervenants. Les conclusions auxquels cette étude aboutit, sur la base de l'analyse du seul paramètre temps, ne correspondent cependant peut-être pas totalement aux sentiments qui habitent les participants à ces célébrations. En effet, la perception subjective des divers temps liturgiques peut différer notablement de leur durée objective, notamment par la forme et le contenu de ceux-ci¹⁵⁵. Enfin, nous avons vu que les conditions acoustiques d'une église sont importantes pour favoriser ou perturber les divers types d'intervention ainsi que leur durée.

Cette analyse des caractéristiques liturgiques des cultes réformés et des messes catholiques nous a surtout permis de montrer objectivement, à côté des quelques petites spécificités confessionnelles, l'importante proximité liturgique entre ces deux types de célébrations. L'importance, à peu près équivalente dans les deux confessions, (re)donnée aussi bien à la parole (en particulier après Vatican II dans l'Eglise catholique), qu'à la musique, met en évidence la similarité actuelle des besoins acoustiques dans les églises catholiques et les temples protestants.

¹⁵⁵ Une prédication longue mais passionnante et partagée de façon vivante peut ainsi paraître courte alors qu'une autre, d'une durée réduite, mais peu captivante par sa présentation et son message, semblera durer une éternité. Il peut être alors intéressant d'étudier cette perception subjective de la durée et de la confronter avec les résultats de notre analyse objective.

2.5 Bibliographie du chapitre 2

- [1] **Bieler, A.** (1961). *Liturgie et architecture. Le temple des chrétiens*. Labor et Fides, Genève.
- [2] **Liénard, P.** (2001). *Petite histoire de l'acoustique*. Hermes science, Paris.
- [3] **White, L. M.** (1982). *Domus Ecclesiae - Domus Dei : Adaptation and development in the setting of early Christian assembly*. Thesis in Yale University.
- [4] **Hunt, F.** (1978). *Origins in acoustics*. Yale University Press, New York.
- [5] **Boespflug, F.-D.** (1987). *Liturgie et espace liturgique*. in *Telle église, telle parole. Remarques sur l'emplacement de la chaire à prêcher dans les lieux de culte*, pp. 19-31, Didier-Erudition, Paris.
- [6] **Dom Leclercq** (1917). *Manuel d'archéologie chrétienne depuis les origines jusqu'au VIIIe siècle*. Vol. I, pp. 381, Paris.
- [7] **Venzke, G.** (1959). *Raumakustik der Kirchen verschiedener Baustilepochen*. Acustica, Vol. 9, pp. 151-155.
- [8] **Carvalho, A. P. O.** (1994). *Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*. Thesis in Philosophy, University of Florida, USA.
- [9] **Reymond, B.** (2001). *D'un temps à l'autre, d'un style d'architecture religieuse à l'autre*. Science et Esprit, Vol. 53(2), pp. 293-307.
- [10] **Joyner, J. E.** (1993). *The impact of architecture on acoustical settings for sacred music in the episcopal parish churches of Georgia*. Thesis in Architecture, Georgia Institute of Technology, USA.
- [11] **Shankland, R. S. et Shankland, H. K.** (1971). *Acoustics of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 50(2), pp. 389-396.
- [12] **Lane, R. N.** (1957). *Room shapes and materials determine church acoustics*. Architectural Record, pp. 191 ss.
- [13] **Reymond, B.** (1993). *Ecclésiologie et apologétique architecturale*. Cahiers de l'institut romand de pastorale, Vol. 16, pp. 25-44.
- [14] **Delapraz, A.** (1970). *Eglises de Suisse. Du roman au gothique*. Avanti, Nauchâtel.
- [15] **Speich, K. et Schläpfer, H.** (1979). *Eglises et monastères suisses*. Ex Libris, Zurich.
- [16] **Booty, J. E.** (1979). *The church in history*. Seabury Press, New York.
- [17] **Horat, H.** (1988). *L'architecture religieuse*. Ars Helvetica, Disentis.
- [18] **Bradshaw, P., Cheslyn, J., Wainwright, G., et al.** (1992). *The study of liturgy*. Oxford University Press, London.
- [19] **Waeber, C.** (1990). *L'abbaye cistercienne d'Hauterive*. Société d'Histoire de l'Art en Suisse, Berne.
- [20] **Desarnaulds, V. et Loerincik, Y.** (2001). *Vases acoustiques dans les églises du Moyen Age*. Moyen Age. Zeitschrift des Schweizerischen Burgenvereins., Vol. 6(3), pp. 65-72.
- [21] **Vernhes, C.** (1999). *Analyse théorique de l'acoustique des églises des "Trois soeurs" de Provence*. Rev. Hist. Cisterc., Vol. 50(2), pp. 24.

- [22] **Larcher** (1970). *Acoustique cistercienne et unité sonore*. in *Encyclopédie des musiques sacrées*. Vol. 1, pp. 470-474, Paris.
- [23] **Zorkoczy, L.** (1976). *Hörsamkeit in Kirchen*. Merseburger, Berlin.
- [24] **Raes, A. C.** (1964). *Isolation sonore et acoustique architecturale*. Chiron, Paris.
- [25] **Durand de Mende, G.** (1996). *Manuel pour comprendre la signification symbolique des cathédrales et des églises*. La maison de vie.
- [26] **Sorokin, P.** (1962). *Society, culture and personality*. Cooper, New York.
- [27] **Forsyth, M.** (1987). *Architecture et musique*. Mardaga.
- [28] **Reymond, B.** (1996). *L'architecture religieuse des protestants*. Labor et Fides, Genève.
- [29] **Rocacher, J.** (1990). *Symbolisme et iconographie des conques des absides*. Chronique d'Art Sacré, Vol. 16-17.
- [30] **Carvalho, A. P. O.** (1999). *The effect of pulpits in the Rasti values within churches*. INTER-NOISE '99, Fort Lauderdale (USA), pp. 989-994.
- [31] **Desarnaulds, V., Chauvin, P. et Carvalho, A. P. O.** (2001). *Acoustic effectiveness of pulpit reflector in churches*. 17 ICA, Rome.
- [32] **Desarnaulds, V.** (2000). *De la position des orgues dans les églises. Partie 1 : Survol historique*. La Tribune de l'Orgue, Vol. 52(1), pp. 18-26.
- [33] **Schaffer, R.** (1979). *Le paysage sonore*. Lattès, Paris.
- [34] **Knudsen, V. et Harris, C.** (1951). *Acoustical designing in architecture*. John Wiley & Sons, New York.
- [35] **Parkin, P. H.** (1971). *Acoustics, Noise and Buildings*. Faber and Faber.
- [36] **Desarnaulds, V. et Binsted, K.** (1990). *Investigation of reverberation time and proper modes*. Project Laboratory Physics in McGill University, Montreal.
- [37] **Schwitzguebel** (1981). *Tables de concordance de Psaumes et Cantiques*. Labor et Fides, Genève.
- [38] **Viollier, L.** (1891). *Saint-Pierre ancienne cathédrale de Genève*. Association pour la restauration de Saint-Pierre, Genève.
- [39] **Böhringer** (1961). art. "Kirchenbau". in *LTK*. Vol. 7.
- [40] **Reymond, B.** (1997). *Temples de Suisse romande*. Cabédita, Yens s/Morges.
- [41] **Brion, M.** (1960). *Ces palais où Dieu habite. L'architecture religieuse de 1400 à 1800*. Arthème Fayard, Paris.
- [42] **Luther, M.** (1958). *La messe en langue allemande*. in *Oeuvres*. Vol. IV, pp. 216-221, Labor et Fides, Genève.
- [43] **Calvin, J.** (1959). *La forme des prières et chantz ecclésiastiques (1542)*. Bärenreiter, Kassel et Bâle.
- [44] **Weber, E. et Tonneau, L.** (1995). art. *Culture (musique)*. in *Encyclopédie du protestantisme*, pp. 327-336, Labor et Fides, Genève.
- [45] **Fatio, O.** (1986). *Confessions et catéchismes de la foi réformée*. Labor et Fides, Genève.
- [46] **Reymond, B.** (2002). *Le protestantisme et la musique : musicalités de la Parole*. Labor et Fides, Genève.
- [47] **Calvin, J.** *Sermon C sur le Deutéronome, ch 16 vv. 13-17*. in *Opera Calvini*. Vol. XXVII, pp. 407.
- [48] **Grandjean, M.** (1973). *Guide de monuments suisses. L'église de Saint-François à Lausanne*. Société d'Histoire de l'Art en Suisse.
- [49] **Grandjean, M.** (1988). *Les temples vaudois. L'architecture réformée dans le Pays de Vaud (1536-1798)*. Bibliothèque historique vaudoise, Lausanne.

- [50] **Richard, W.** (1959). *Untersuchungen zur Genesis der reformierten Kirchenternologie der Westschweiz und Frankreichs*. Francke, Berne.
- [51] **Rosenau, H.** (1979). *Vision of the Temple - The image of the Temple of Jerusalem in Judaism and Christianity*. Oresko, London.
- [52] **Lottemoser, W.** (1952). *Nachhallzeiten in Barockkirchen*. *Acustica*, Vol. 2, pp. 109-111.
- [53] **Senn, O.** (1958). *La construction d'église contemporaine*. *Cahier Protestant*, pp. 3-11.
- [54] **Servettaz, N.** (1932). *Architectures rationnelles religieuses*. Doxa, Milano.
- [55] **Keibs, L. et Kuhl, W.** (1959). *Zur Akustik der Thomaskirche in Leipzig*. *Acustica*, Vol. 9, pp. 365-370.
- [56] **Delapraz, A.** (1970). *Eglises de Suisse. Renaissance, baroque, moderne*. Avanti, Nauchâtel.
- [57] **Daniel-Rops** (1955). *Une ère de renouveau. La Réforme catholique*. Paris.
- [58] **Jounel, P.** (1995). *Le lieu de la célébration*. *Chronique d'Art Sacré*, Vol. 25-27.
- [59] **Fénélon** (1977). *Examen de conscience sur les devoirs de la royauté*. in *Dictionnaire des citations françaises*, Larousse, Paris.
- [60] **Reymond, B.** (1999). *Les chaires réformées et leurs couronnements*. *Etudes Théologiques & Religieuses*, Vol. 74(1999/1), pp. 35-49.
- [61] **Bertrand, E.** (1755). *Sur la construction et l'aménagement intérieur d'une église destinée à l'usage des protestants*. *Journal Helvétique*.
- [62] **Laugier, M. A.** (1765). *Observation sur l'architecture*. Mardaga 1979.
- [63] **Gamboni, D.** (1985). *Louis Rivier et la peinture religieuse en Suisse romande*. Payot, Lausanne.
- [64] **Bissegger, P.** (1985). *Le moyen âge romantique au pays de Vaud 1825-1850*. Bibliothèque historique Vaudoise, Lausanne.
- [65] **Meyer, A.** (1973). *Neugotik und Neuromanik in er Schweiz. Die Kichenarchitektur des 19. Jahrhunderts*. Berichthaus, Zürich.
- [66] **Nietzsche** (1997). *Le gai savoir*. in *Dictionnaire des citations*, Larousse, Paris.
- [67] **Radau, R.** (1867). *L'acoustique ou les phénomènes du son*. Librairie Hachette et Cie, Paris.
- [68] **Upham, J. B.** (1853). *A consideration of the phenomena and laws of sound and their application in the construction of buildings especially for musical effects*. *Am. J. Sci. Arts.*, Vol. 65.
- [69] **Henry, J.** (1856). *Acoustics applied to public buildings* Annual report of the Smithsonian Institution.
- [70] **Strutt, J. W. et Lord Rayleigh** (1894). *The theory of sound*. M. Millan, London.
- [71] **Sabine, W. C.** (1917). *La prévision de l'acoustique dans l'étude d'un projet*. Conférence de la Société des architectes diplômés par le Gouvernement,, Paris.
- [72] **Sabine, W. C.** (1927). *Collected papers on acoustics*. Harvard University Press, Cambridge.
- [73] **Knudsen, V.** (1954). *Review of architectural acoustics during the past twenty-five years*. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 26(5), pp. 646-650.
- [74] **Shaw, N. A., Klapholtz, J. et Gander, M. R.** (1994). *Books and acoustics, especially Wallace Clement Sabine's Collected papers on acoustics*. Wallace Clement Sabine centennial symposium, Cambridge, USA, pp. 41-44.
- [75] **Chladni, E.-F. - F.** (1809). *Traité d'acoustique*. Courcier, Paris.
- [76] **Thurian, M.** (1946). *Joie du ciel sur la terre - Introduction à la vie liturgique*. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.

- [77] **Hofer, A.-L.** (1997). *Eglise de Saint-Jean Lausanne*. Belle Rivière, Lausanne.
- [78] **Debré, F. et Vérot, P.** (1991). *Urbanisme et art sacré - Une aventure du XXe siècle*. Critérim, Paris.
- [79] **Debuyst, F. et Hindré, J.-P.** (1986). *60 ans d'architecture religieuse contemporaine*. Chronique d'Art Sacré, Vol. 7.
- [80] **Collectif** (1954). *La Colombe*. Association des artistes protestants.
- [81] **Oberholzer, Egli, Strobino, et al.** (1990). *Edifices sacrés*. Bulletin bois, Vol. 23, pp. 302-316.
- [82] **Petit, J.** (1992). *Mario Botta. Projet pour une église à Mogno*. Fidia ed. d'arte. Coll. Forces vives.
- [83] **Collectif** (2000). *Couvent dominicain Sainte-Marie de la Tourette*. Internet, http://www.couventlatourette.com/html/historique_usage.htm.
- [84] **Kirkegaard, R. L.** (1986). *Organ Acoustics : Building churches for organs - Building organs for churches*. Kirkegaard and Associates Publication.
- [85] **Barth, K.** (1959). *Le problème de l'architecture des lieux de culte dans le protestantisme*. Werk, Vol. 8.
- [86] **Senn, O.** (1952). *Protestantischer Kirchenbau*. Werk, Vol. 39(2), pp. 33-40.
- [87] **Senn, O.** (1953). *Protestantischer Kirchenbau*. Werk, Vol. 40(3), pp. 27-28.
- [88] **Senn, O.** (1954). *Der reformierte Kirchenbau gestern und heute*. Schweizerische Bauzeitung, Vol. 72(16), pp. 215-223.
- [89] **Senn, O.** (1983). *Evangelischer Kirchenbau im ökumenischen Kontext. Identität und Variabilität - Tradition und Freiheit*. Birkhäuser, Basel.
- [90] **Ochse** (1960). *2000 églises vont naître*. Art, Vol. 12-18 Oct.
- [91] **Filthaut, T.** (1968). *Church architecture and liturgical reform*. Helicon Press, Baltimore.
- [92] **Brentini, F.** (1994). *Bauen für die Kirche. Katholischer Kirchenbau des 20. Jahrhunderts in der Schweiz*. Ed. SSL.
- [93] **Bouyer, L.** (1967). *Liturgie et architecture*. Cerf, Paris.
- [94] **Liturgiekommission der Deutschen Bischofskonferenz** (1996). *Liturgie und Bild*. in *Arbeitshilfen*. Vol. 132, Sekretariat der Deutschen Bischofskonferenz, Bonn.
- [95] **Commissione Episcopale per la Liturgia** (1993). *La progettazione di nuove chiese*. Elle di ci, Torino.
- [96] **Ratzinger, J.** (2001). *L'esprit de la liturgie*. Ad Solem.

3. ANALYSE STATISTIQUE

3.1 Introduction

3.1.1 Vérification objective des hypothèses

Les théories exposées au chapitre précédent sont issues d'une réflexion essentiellement théologique, fondée sur l'analyse, bien documentée dans la littérature, de l'évolution liturgique ainsi que l'observation de quelques exemples particuliers d'architecture religieuse. Les hypothèses formulées sur la relation avec les caractéristiques acoustiques des églises demandent cependant une vérification objective. Celle-ci ne peut venir que de l'analyse statistique d'un nombre suffisant d'églises représentatives des divers paramètres étudiés (par exemple le type architectural ou la confession).

3.1.2 Analyse bibliographique

Les publications dans le domaine de l'acoustique des églises analysent cependant généralement l'acoustique d'une seule église présentant un intérêt historique [1-3]. Quelques articles ou livres traitent également des valeurs optimales pour le temps de réverbération et des possibilités d'aménagement des églises [4; 5], ou ils présentent les facteurs influençant les conditions d'écoute [6]. On ne trouve cependant que peu d'études systématiques analysant statistiquement les données acoustiques de plusieurs églises [7-11]. L'analyse statistique de ces données permet de déterminer les relations entre ces grandeurs [12] (par exemple dépendance du temps de réverbération avec le volume) et de donner finalement des indications aux architectes pour la construction ou la restauration d'édifices religieux. La pertinence de ces analyses est cependant souvent limitée d'une part par le type des paramètres recensés ainsi que leur analyse (souvent sommaire ou au contraire inutilement compliquée) et d'autre part par le faible nombre et les spécificités architecturales des églises recensées. On peut s'interroger en effet sur la généralisation de ces résultats, qui sont obtenus pour un ensemble d'églises particulières, représentatives d'une ville, d'un pays, d'une confession, voir d'un style architectural spécifique.

3.2 Situation en Suisse

3.2.1 Exposé de la démarche

La Suisse, qui n'a jamais fait l'objet d'étude de ce type, présente pourtant des caractéristiques optimales pour un tel recensement, car elle possède de très nombreuses églises, avec des types architecturaux très variés (du Moyen Age à l'époque moderne) et deux confessions chrétiennes également représentées (catholique et réformée). Nous avons donc entrepris de recenser un grand nombre d'églises en Suisse en relevant leurs principales caractéristiques géométriques et acoustiques ainsi que le type de mobilier et son utilisation (l'analyse de ces derniers fera l'objet des chapitres 4 et 5). L'analyse statistique de ces grandeurs permet en premier lieu d'avoir une vision globale des caractéristiques objectives des églises en

Suisse. La mise en relation de ces grandeurs permet ensuite d'étudier la pertinence de nombreuses hypothèses souvent avancées mais rarement justifiées et validées. Parmi elles, nous nous pencherons tout particulièrement sur la relation entre l'évolution historique de la liturgie et des styles architecturaux et les principales grandeurs acoustiques.

3.2.2 Méthodologie

Pour effectuer cette recherche, nous avons réuni puis mis en forme dans une banque de données, les résultats d'évaluations objectives portant sur 190 églises sur l'ensemble du territoire suisse¹.

3.2.2.1 Paramètres recensés

Les paramètres recensés dans cette étude concernent d'une part des caractéristiques architecturales (principalement géométriques), d'autre part des informations sur le mobilier et l'utilisation de l'église, et enfin sur des grandeurs acoustiques (cf. Tableau 1). La plus grande partie des données fut déterminée spécialement pour cette étude, le reste fut tiré de rapports de mesurages existants².

Tableau 1 Paramètres recensés dans l'étude

Architecture	Mobilier et utilisation	Mesurages acoustiques
Volume	Chaire et abat-voix (dimensions) ¹	Temps de réverbération
Surface au sol ¹	Sonorisation (type et position) ¹	vide: mesuré
Géométrie ¹	Orgue (position) ¹	plein: calculé
Lieu (ville /campagne) ¹	Nombre et organisation de places ¹	Intelligibilité (RASTI) ¹
Epoque de construction	Confession (actuelle)	Bruit de fond (Leq(20 s)) ¹

¹ Seulement pour une partie des églises.

3.2.2.2 Evaluation et mesurages

Selon la provenance, la difficulté ou l'époque d'acquisition des données, quelques paramètres n'ont pas été évalués dans certaines églises.

Les paramètres architecturaux et le mobilier étudié (chaire, abat-voix et orgue) ont été évalués sur la base de plans ou de relevés sur place. La confession actuelle (qui n'est pas forcément celle de l'époque de construction³) a été considérée comme paramètre pour l'utilisation de l'église. Enfin les paramètres acoustiques ont été évalués par des mesurages objectifs dans les églises vides. Les mesurages ont été effectués en plusieurs (en moyenne 5) positions dans l'église avec les équipements suivants (en fonction des cas) : sonomètre Brüel&Kjaer 2231 + module d'analyse Réverbération, MLSSA, Symphonie 01 dB avec le logiciel dBati32, Rion NA27 avec un logiciel d'analyse développé au Bureau d'ingénieurs Monay.

¹ Pour une question de proximité géographique, une assez grande partie des églises recensées se trouvent dans le canton de Vaud, historiquement réformé.

² Nous présentons ici nos remerciements pour toutes les personnes qui ont mis à disposition leurs données, et en particulier à M. Kurt Eggenschwiler de l'EMPA.

³ Nous avons vu dans le survol historique que certaines communautés protestantes avaient bien souvent utilisés, parfois après les avoir adaptées, les églises romanes ou gothiques construites pour une liturgie bien différente de la leur.

Le temps de réverbération par octave (125 à 4000 Hz) a été mesuré dans les églises vides puis calculé d'après la formule de Sabine en considérant les valeurs d'absorption par personne obtenues dans le cadre de mesurages durant des célébrations (cf. § 5.4.3.1). Pour les diverses analyses, nous avons considéré le temps de réverbération moyen dans les octaves centrées à 500 et 1000 Hz.

L'intelligibilité de la parole, évaluée au moyen du RASTI, a été généralement mesurée dans l'église sans puis avec l'utilisation de la sonorisation. Dans les deux cas, nous avons considéré les valeurs maximums, minimums et moyennes des diverses positions de mesurages.

Une trentaine d'églises, faisant l'objet de mandats d'étude particuliers, ont été mesurées de façon nettement plus détaillées.

3.2.2.3 Style

Afin de vérifier les hypothèses émises au chapitre précédent sur les relations entre l'évolution historique de la liturgie et les conditions acoustiques des églises, nous avons classifié les églises suivant leur style architectural qui est lié à la période principale de construction. Afin d'avoir un nombre suffisant d'églises dans chaque catégorie de style, nous avons choisi d'utiliser un nombre réduit de catégories reflétant autant que possible une période facilement identifiable aussi bien du point de vue architectural que liturgique. Ne disposant que d'un faible échantillon d'églises romanes et gothiques, nous avons dû les regrouper dans une même catégorie, et ce malgré leurs différences architecturales. La répartition des églises recensées, fut classées selon 4 grandes classes de style, dont le choix, l'appellation et la caractérisation ne peuvent rester que très grossiers pour les raisons susmentionnées. Les styles retenus sont les suivants:

- Roman ou Gothique (avant 1530)
- Baroque (env. 1530 à environ 1815)
- Néoclassique⁴ (env. 1815 à environ 1915)
- Moderne (après 1915)

Le choix des églises recensées a été effectué afin d'obtenir un nombre suffisant et comparable d'églises dans chaque catégorie de style (entre 33 et 64 cf. Tableau 2). Une assez grande partie des églises recensées se trouvant dans le canton de Vaud à dominante réformée, la proportion de cette confession est légèrement dominante (60% d'églises réformée contre 40% d'églises catholique).

Tableau 2 Nombre d'églises recensées selon la confession et le style

Style / Confession	Roman ou Gothique <1530	Baroque 1530-1815	Néo-classique 1815-1915	Moderne >1915	Total
Catholique	11	9	26	31	77
Réformé	32	24	24	33	113
Total	43	33	50	64	190

⁴ La terminologie « néoclassique » recouvre, dans notre cas, non seulement le style d'inspiration gréco-romain, mais également et surtout le style néomédiéval (principalement néogothique).

3.2.3 Caractéristiques géométriques

3.2.3.1 Volume

Le volume est le paramètre le plus simple pour décrire, au niveau architectural, la taille d'une église. L'analyse statistique du volume peut alors permettre de définir une première typologie des églises. Le volume a également une grande signification au niveau acoustique car il influence des paramètres aussi importants que la réverbération ou le sentiment d'enveloppement.

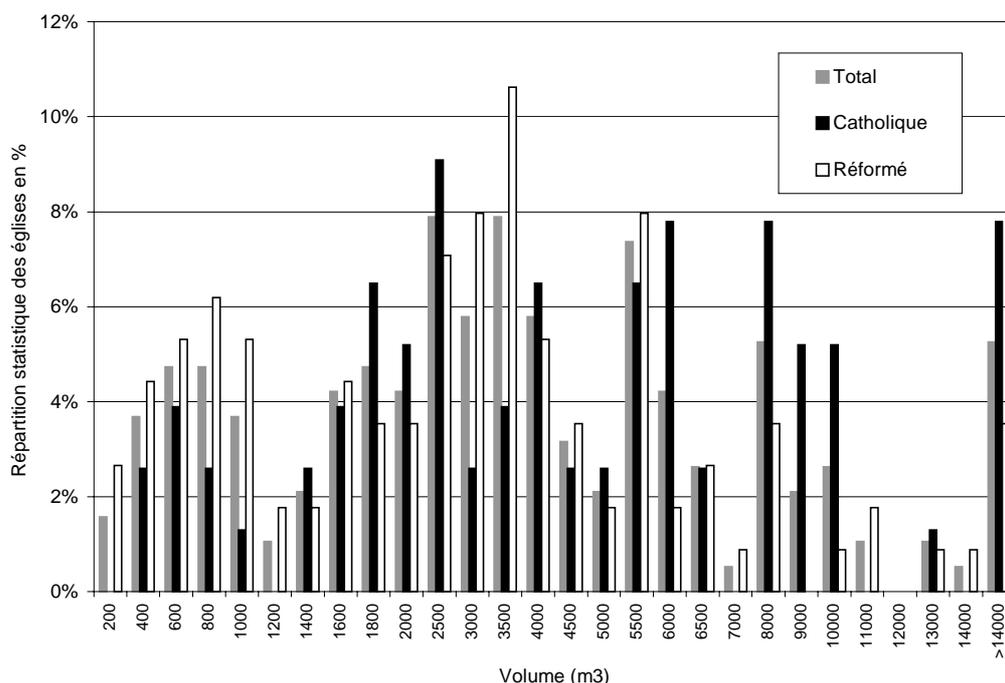


Figure 1 Répartition statistique des églises (par confession) suivant leur volume

Le volume total des églises a été évalué sur la base de plans ou de mesurages in situ des dimensions. Les églises recensées ont été regroupées par classes de volume de 200 m³ jusqu'à 2000 m³ puis de 500 m³ entre 2000 et 7000 m³ et enfin de 1000 m³ au-dessus de 7000 m³. L'occurrence des églises dans chaque classe de volume est présentée dans la Figure 1.

L'analyse statistique du volume des églises recensées permet de différencier plusieurs types d'églises. On constate en effet que la distribution statistique des églises se partage en diverses catégories (addition de plusieurs distributions gaussiennes) :

1. Les petites églises avec un volume $600 \pm 400 \text{ m}^3$ (moyenne ± 1 écart type)
2. Les églises moyennes avec un volume $3000 \pm 1500 \text{ m}^3$
3. Les grandes églises avec un volume de plus de 5000 m³. Dans cette dernière catégorie, on peut distinguer 3 sous-groupes:
 - Les assez grandes églises avec un volume 5000 à 7000 m³
 - Les grandes églises avec un volume 7000 à 11000 m³
 - Les très grandes églises avec un volume de plus de 11000 m³

En analysant la répartition des volumes selon la confession, on constate un léger décalage entre les valeurs des différentes catégories. Les petites églises réformées (souvent de village) sont ainsi plus grandes ($800 \pm 600 \text{ m}^3$) et plus nombreuses que celles catholiques de la même catégorie ($500 \pm 400 \text{ m}^3$), qui sont alors plutôt des chapelles. La même conclusion se retrouve pour les églises moyennes ($3000 \pm 1500 \text{ m}^3$ pour les réformés et $2500 \pm 1500 \text{ m}^3$ pour les catholiques). Par contre, les grandes églises sont nettement plus nombreuses et plus grandes du côté catholique.

En analysant les variations de volume moyen en fonction du style et de la confession, on constate cependant (cf. Tableau 3) que les églises réformées (en particulier pour celles construites après la Réforme) sont en moyenne plus petites que les églises catholiques (3864 contre 5793 m^3). Cela est dû à la contribution importante, dans le calcul de la moyenne, de quelques grandes églises catholiques qui conduit à un écart type également notablement plus important pour cette confession pour les styles baroque, néoclassique et moderne. En supprimant la plus grande église baroque catholique (cathédrale de St. Gall de $54'000 \text{ m}^3$), la moyenne des églises baroques catholiques passe cependant de 11716 à seulement 6430 m^3 (3372 au lieu de 4906 m^3 pour l'ensemble des églises baroques). La contribution des grandes églises conduit donc généralement à obtenir des moyennes plus élevées que les médianes⁵ (la médiane du volume pour l'ensemble des églises 3372 m^3). Notons enfin que les églises catholiques disposent souvent de chapelles latérales qui peuvent induire des effets de volumes couplés.

Tableau 3 *Volume moyen des églises en fonction du style et de la confession*

Style	Catholique	Ecart	Réformé	Ecart	Tous	Ecart
Roman et Gothique	4447	4208	6498	7970	5973	7191
Baroque	11716	16879	2353	2665	4906	9709
Néoclassique	6092	5353	3406	2134	4803	4312
Moderne	4300	4204	2741	1874	3496	3289
Tous	5793	7354	3864	4886	4645	6060

3.2.3.2 Volume spécifique

Le volume spécifique est défini par le rapport entre le volume d'une salle et le nombre de places dans cette salle. Dans notre cas, nous considérerons le nombre actuel de places dans l'église ce qui conduit à définir le volume spécifique pour une occupation maximale. La prise en compte de l'occupation effective sera traitée ultérieurement (cf. chapitre 5 et 6). Le volume spécifique, qui représente donc le nombre de m^3 par personne, est important au niveau acoustique surtout au niveau de la sensibilité à l'occupation [13; 14].

⁵ La médiane est la valeur qui sépare les échantillons en deux classes égales. Ainsi 50% des églises recensées ont un volume plus important (et 50% un volume plus faible) que la valeur médiane du volume de l'ensemble des églises.

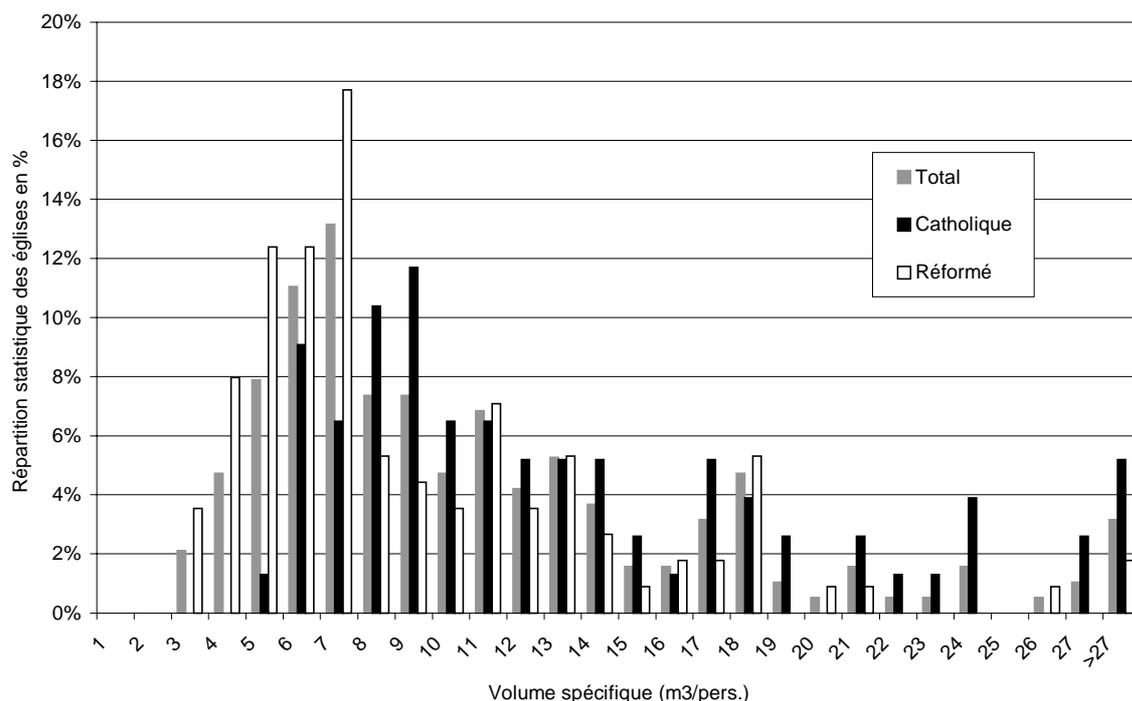


Figure 2 Répartition statistique des églises (par confession) suivant leur volume spécifique

L'analyse de la répartition statistique des églises suivant leur volume spécifique (cf. Figure 2) montre une occurrence maximale entre 7 et 8 m³/pers. pour les petites et moyennes églises et un maximum secondaire nettement plus faible à 18 m³/pers. pour les grandes églises, qui peuvent atteindre des volumes spécifiques très importants (plus de 50 m³/pers. pour les très grandes églises, souvent catholiques, ou les monastères). On constate par ailleurs que les églises réformées ont généralement un volume spécifique plutôt faible, la plupart d'entre elles disposant de 5 et 8 m³/pers., (certaines pouvant descendre à moins de 4 m³/pers. et très peu dépassant 19 m³/pers.). Les églises réformées présentent donc une occupation plutôt dense de l'espace, ce qui favorise l'intelligibilité de la parole lorsque l'église est pleine (cf. §5.3). Les églises catholiques disposent par contre généralement de volume spécifique plus important, typiquement de 8 à 10 m³/pers. Le volume spécifique des petites églises catholiques ne descend que dans 1% cas au-dessous de 5 m³/pers. (contre 24% pour les réformées) mais celui des grandes églises dépasse par contre souvent 19 m³/pers. (19% des églises catholiques contre 4% pour les églises réformées). Ces remarques expliquent les différences observées sur les valeurs moyennes (± 1 écart type) des volumes spécifiques qui sont de 13.7 ± 9.8 m³/pers. pour les églises catholiques et 9.1 ± 7.1 m³/pers. pour les temples réformés (10.9 ± 8.6 m³/pers. pour l'ensemble des églises).

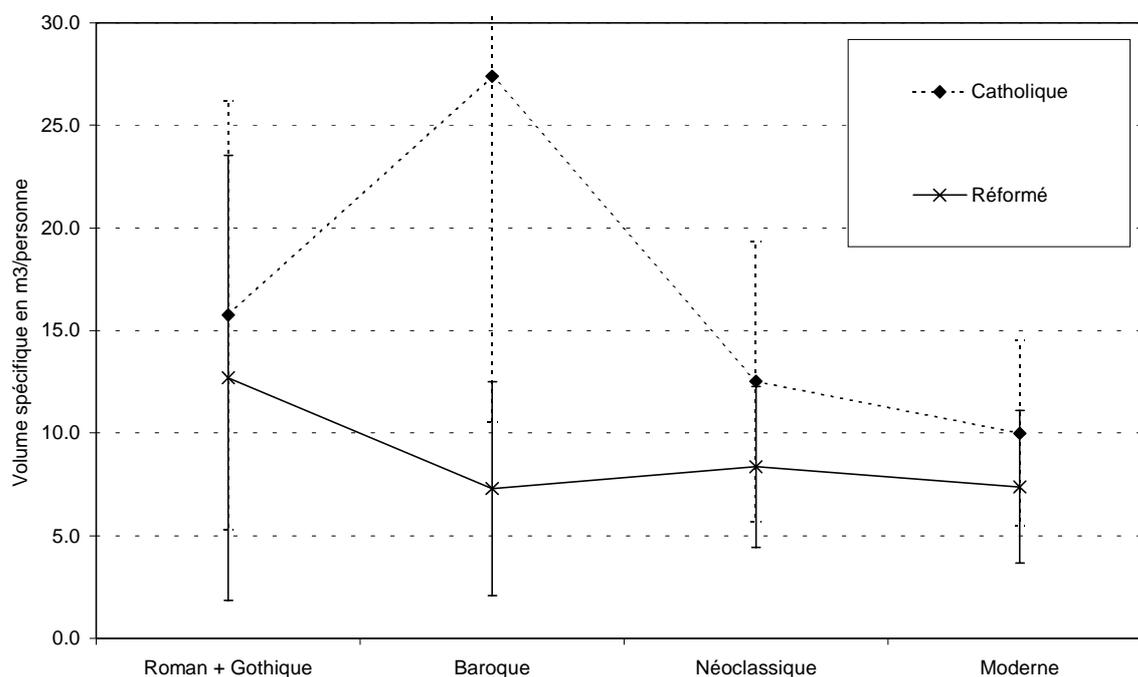


Figure 3 Evolution du volume spécifique suivant le style et la confession

En analysant l'évolution du volume spécifique moyen suivant le style (cf. Figure 3), on constate que celui-ci est toujours plus élevé dans les églises catholiques que celles réformées. L'écart est relativement faible à l'époque romane et gothique, suite à laquelle les réformés n'ont fait qu'aménager les lieux hérités de la tradition, en densifiant l'occupation de l'espace. A l'époque baroque, les tendances adoptées par les deux confessions sont inverses. Les catholiques augmentent notablement le volume spécifique de leurs églises pour atteindre une valeur moyenne supérieure à 25 m³/pers. Remarquons cependant le très grand écart type qui est le reflet de la présence de très grandes églises qui augmentent notablement la valeur moyenne. Après la Réforme, les protestants diminuent au contraire sensiblement le volume spécifique de leurs églises pour favoriser les conditions d'intelligibilité de la parole. Durant le style néoclassique, ou plus précisément néomédiéval, l'augmentation de volume des églises réformées entraîne un léger accroissement du volume spécifique. Le phénomène est inverse et encore plus marqué dans les églises catholiques à cette époque. La baisse, durant l'époque moderne, du volume moyen entraîne encore une légère diminution du volume spécifique dans les deux confessions qui est cependant plus marquée chez les catholiques probablement du fait de la densification de l'occupation de l'espace après le concile Vatican II.

3.2.3.3 Hauteur

Au niveau acoustique, la hauteur moyenne d'une salle, définie comme le rapport du volume à la surface au sol, est importante non seulement pour la réverbération, mais elle détermine également le retard de la réflexion issue du plafond qui peut être gênant (pour l'intelligibilité de la parole d'abord, mais dans des cas extrêmes également pour la musique) s'il devient excessif (cf. §4.3).

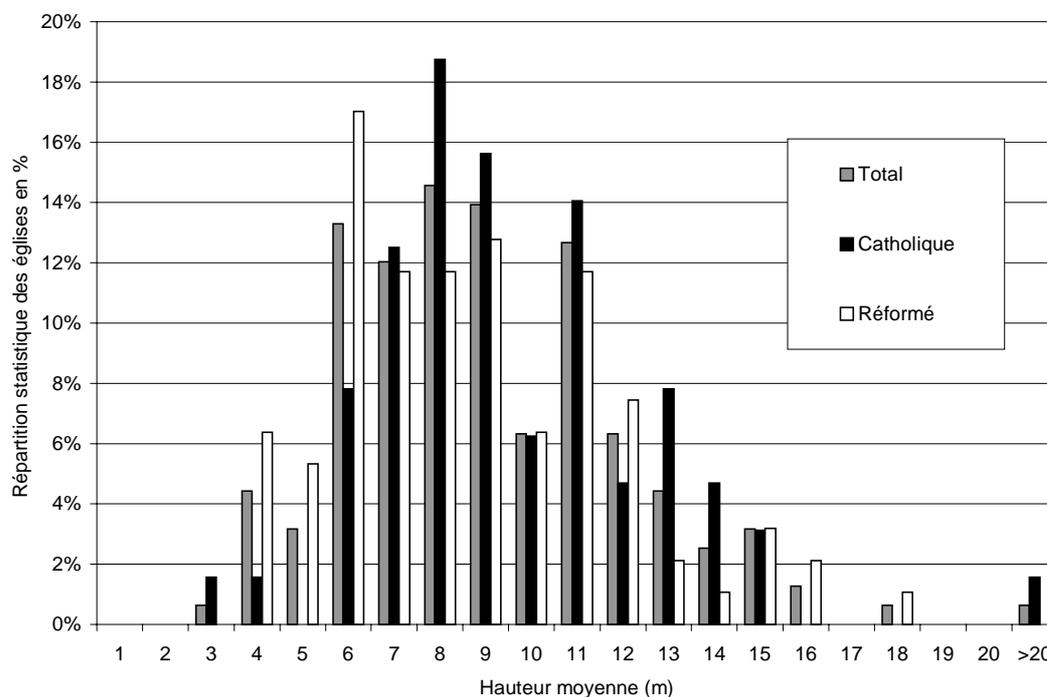


Figure 4 Répartition statistique des églises (par confession) suivant leur hauteur

D'après l'analyse de la répartition statistique des églises (cf. Figure 4), 79% des églises ont une hauteur moyenne (h) comprise entre 5 et 12 m. La limite de 10 m, qui présente une incidence plus faible, semble séparer les petites et moyennes églises des grands édifices.

Si l'on distingue la confession, on constate que la hauteur des églises catholiques est, en général, plus élevée que celle des édifices réformés. La hauteur la plus fréquente est ainsi de 5 à 6 m pour les églises réformées et 7 à 8 m pour les églises catholiques. La valeur moyenne de la hauteur des églises est de 8.2 m chez les réformés et 9.0 chez les catholiques (l'écart type est de 3.2 dans les deux cas). On retrouve davantage de petites et moyennes églises réformées avec une faible hauteur moyenne (29% contre 11% des églises catholiques avec $h < 6$) mais plus de grandes églises catholiques avec une hauteur importante (16% contre 6% des églises réformées avec $12 < h < 15$ m). Enfin, on peut remarquer que les hauteurs extrêmes ($h < 3$ m et $h > 20$ m) sont l'apanage des églises catholiques.

3.2.4 Temps de réverbération

Le paramètre acoustique le plus utilisé et peut-être le plus important pour caractériser l'acoustique d'une salle est le temps de réverbération. Nous étudierons d'abord sa dépendance avec le volume, puis son évolution avec le style et la confession. Nous analyserons enfin son spectre fréquentiel (qui donne le timbre d'une église) en fonction des divers paramètres susmentionnés.

3.2.4.1 Volume et autres grandeurs géométriques

Plusieurs auteurs [13; 15-17] ont mis en évidence empiriquement une relation entre le temps de réverbération souhaitable d'une salle et le logarithme du volume de cette salle. Les temps de réverbération mesurés étant par bandes d'octaves, nous avons considéré les valeurs moyennes des octaves centrées sur 500 et 1000 Hz. Ce temps de réverbération moyen est le plus couramment utilisé [13; 17-19] et permet de comparer nos valeurs avec les résultats présentés dans d'autres publications.

L'analyse du temps de réverbération moyen pour l'ensemble des églises recensées confirme cette relation (cf. Figure 5) mais montre une forte dispersion (le coefficient de détermination n'est que de $R^2=0.42$). Cette dispersion diminue légèrement pour des églises pleines ($R^2=0.50$).

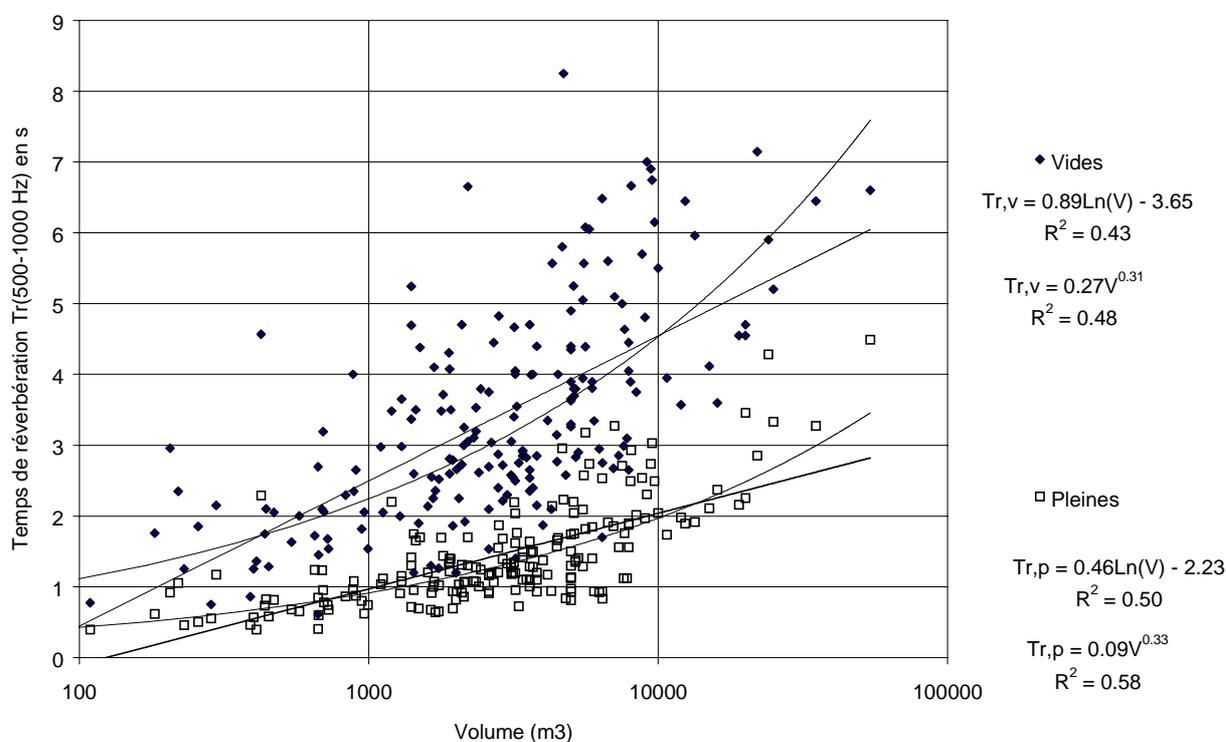


Figure 5 Temps de réverbération en fonction du volume

Rappelons la formulation de Sabine pour le calcul de la réverbération :

$$T_R = \frac{0.16V}{\alpha \cdot S_{tot}}$$

où V est le volume et S_{tot} la surface totale de l'enveloppe et du mobilier de l'église et α , le coefficient d'absorption moyen. On constate que le temps de réverbération est directement proportionnel à une dimension de longueur caractéristique de l'église égale au rapport du volume à la surface totale, qui, en première approximation, peut

être assimilée à la racine cubique du volume⁶. En calculant la courbe de tendance du temps de réverbération avec une régression en puissance du volume, on obtient

$$\begin{aligned} \text{Tr},v &= 0.2713 \cdot V^{0.3057} \quad R^2 = 0.48, \text{ église vide} \\ \text{Tr},p &= 0.0919 \cdot V^{0.3329} \quad R^2 = 0.58, \text{ église pleine} \end{aligned}$$

On constate que la détermination est légèrement meilleure que pour la régression logarithmique et que le coefficient de puissance est légèrement inférieur, pour les églises vides, à la valeur théorique de 1/3.

A partir des autres grandeurs physiques ayant fait l'objet de notre recensement, on peut, en première approximation, assimiler la dimension de longueur caractéristique de l'église à la racine carrée de la surface au sol (S_s) ou simplement à la hauteur moyenne (h). Cela nous conduit donc à vérifier la corrélation entre le temps de réverbération avec une régression en puissance pour la surface et une régression linéaire de la hauteur moyenne. En calculant les courbes de tendance des valeurs de temps de réverbération mesurées, on obtient les relations suivantes:

$$\begin{aligned} \text{Tr},v &= 0.3132 \cdot S_s^{0.3929} \quad \text{avec } R^2=0.41, \text{ église vide} \\ \text{Tr},p &= 0.0932 \cdot S_s^{0.4616} \quad \text{avec } R^2 = 0.58, \text{ église pleine} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Tr},v &= 0.318 \cdot h + 0.59 \quad \text{avec } R^2=0.42, \text{ église vide} \\ \text{Tr},p &= 0.188 \cdot h - 0.14 \quad \text{avec } R^2 = 0.62, \text{ église pleine} \end{aligned}$$

On remarque que la relation en puissance de la surface au sol donne un coefficient de détermination assez faible pour les églises vides mais équivalent à celui obtenu pour la relation en puissance du volume pour les églises pleines. Dans les deux cas, le coefficient de puissance est légèrement inférieur à la valeur théorique de $\frac{1}{2}$.

La régression linéaire sur la hauteur moyenne donne, pour les églises vides, une détermination équivalente à la régression logarithmique du volume. La régression linéaire sur la hauteur moyenne donne par contre la meilleure estimation du temps de réverbération dans les églises pleines.

Notons enfin qu'il est possible d'améliorer encore la détermination du temps de réverbération en utilisant des fonctions plus complexes et en combinant les diverses grandeurs géométriques. De telles relations ont cependant déjà fait l'objet d'études détaillées de la part de Carvalho [12; 22-26].

3.2.4.2 Confession et style

Pour confirmer ou infirmer les hypothèses, formulées au chapitre 2, sur l'évolution de l'acoustique des églises au cours des siècles en parallèle avec l'évolution de la liturgie et de la musique, nous avons étudié statistiquement la relation entre les valeurs moyennes de temps de réverbération avec le style architectural, qui, rappelons-le correspond à l'époque principale de construction.

⁶ En prenant la longueur d comme la l'arrête de l'équivalence cubique de la salle [20], on a $S \approx 6 \cdot d^2$ et $V \approx d^3$ soit $S \approx 6 \cdot V^{2/3}$. La relation de Sabine donne alors $T = 0.16 \cdot V^{1/3} / 6 \cdot \alpha$. Jauhaneau [21] a montré que cette relation en puissance du volume permettait en fait de maintenir constant, dans les salles de mêmes formes mais de volumes différents, le rapport du champ direct et du champ réverbéré.

3.2.4.2.1 Confession

Les valeurs moyennes, suivant le style et la confession, des temps de réverbération (valeur moyenne des octaves centrées sur 500 et 1000 Hz) figurent dans le Tableau 4 et la Figure 6.

Tableau 4 Temps de réverbération moyen (500+1000 Hz) en fonction du style et de la confession

Style	Catholique	Ecart	Réformé	Ecart	Tous	Ecart
Roman + Gothique	3.50	1.35	3.50	1.67	3.50	1.58
Baroque	4.08	1.53	2.38	0.82	2.84	1.29
Néoclassique	4.77	1.22	2.85	0.82	3.85	1.42
Moderne	3.72	1.78	2.71	1.04	3.20	1.53
Tous	4.09	1.58	2.89	1.24	3.38	1.50

Les résultats confirment l'affirmation souvent entendue que le temps de réverbération est plus long dans les églises catholiques que dans les églises réformées. Cette conclusion ne s'applique cependant que pour les églises construites après la Réforme, les églises romanes et gothiques ayant été construites avant le schisme du début du XVI^e siècle. Cette différence entre confessions confirme donc l'hypothèse formulée au chapitre 2 sur le culte réformé qui a accordé plus d'importance à la parole (et à sa compréhension) qu'à l'ambiance (en particulier musicale) et a donc privilégié les acoustiques plutôt sèches (avec un faible temps de réverbération).

3.2.4.2.2 Style

L'analyse détaillée des variations du temps de réverbération suivant le style architectural illustre, pour les deux confessions, l'évolution historique de la liturgie et de ses exigences acoustiques :

A l'époque romane et gothique, les temps de réverbération très longs favorisent davantage l'ambiance liturgique (chant grégorien du clergé situé dans le chœur, séparé de la nef par un jubé) que l'intelligibilité de la parole. L'absence de différence entre confessions s'explique par le fait que les églises de cette époque étaient toutes construites à la base pour le rite catholique. Une légère différence apparaît entre les confessions dans les églises pleines, du fait de la densification plus importante de l'occupation apportée par le culte réformé (cf. §3.2.3.2). Le volume spécifique passe en effet de $15.8 \pm 10.8 \text{ m}^3$ par personne (moyenne ± 1 écart type) pour les catholiques à $12.7 \pm 10.8 \text{ m}^3$ par personne dans les temples réformés.

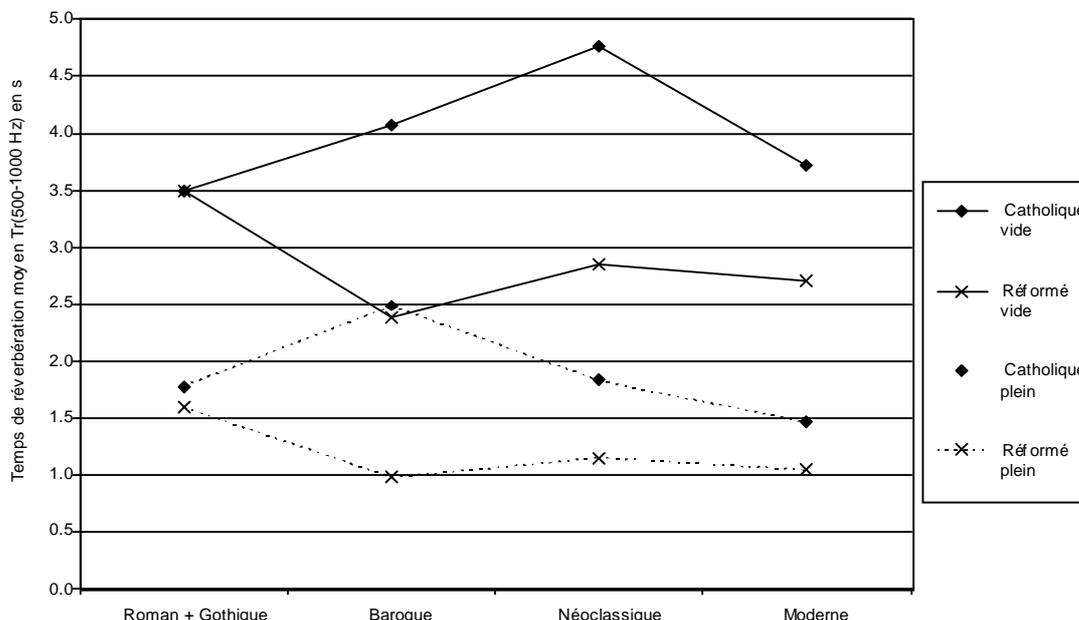


Figure 6 Temps de réverbération moyen en fonction du style et de la confession dans les églises vides et pleines

A l'époque baroque, on observe une diminution importante du temps de réverbération dans les églises réformées. Après la Réforme, les protestants commencent à construire des temples spécifiquement réformés avec des temps de réverbération très courts (moyenne de 2.4 s vide) et une occupation très dense (moyenne de 7 m³/pers.). L'importance centrale donnée à la parole (lecture de la Bible, prédication), est alors clairement favorisée par ces conditions acoustiques plus sèches. La Contre-Réforme catholique entraîne au contraire une augmentation du temps de réverbération moyen (4.1 s) et du volume spécifique dans les églises favorisant plus la musique. La forte divergence entre les confessions de ces deux paramètres fait que c'est l'époque où l'on observe, dans les églises pleines, les plus grandes différences. Le temps de réverbération moyen dans les églises pleines est alors de 1.0 s dans les églises réformées contre 2.5 s dans les édifices catholiques.

La mise en valeur de la musique (orgue) à côté du prédicateur et l'augmentation du volume et du volume spécifique à l'époque néoclassique conduit à une légère augmentation du temps de réverbération dans les temples réformés. Dans les églises catholiques, la nostalgie du Moyen Age conduit à augmenter encore le temps de réverbération (moyenne de 4.8 s, église vide). La densification de l'occupation (diminution de volume spécifique à 12 m³ par pers.) permet cependant d'abaisser le temps de réverbération en présence des fidèles (moyenne de 1.8 s, église pleine), et de permettre une intelligibilité de la parole encore acceptable. La différence entre confession dans les églises pleines diminue alors quelque peu.

A l'époque moderne, le concile de Vatican II, qui entraîna une modification profonde de la liturgie et de la conception des églises catholiques, introduisit notamment un besoin accru au niveau de l'intelligibilité de la parole. Cela se traduit par une

densification du nombre de places et une diminution du volume moyen des églises et à une baisse du temps de réverbération dans les églises (moyennes de 3.7 s vides et 1.5 s pleines). Notons que la plus grande partie des églises mesurées dans la période "moderne" (qui commence en 1915 d'après notre classification grossière) sont effectivement postérieures au concile de Vatican II (1962-1965). On n'observe par contre, à cette époque, que peu d'évolution dans les temples réformés (la faible diminution du volume et du volume spécifique induisent une très légère baisse du temps de réverbération). Le temps de réverbération moyen dans les églises pleines des deux confessions a alors tendance à se rapprocher. L'augmentation de l'écart type des résultats dans les deux confessions, trahit une plus grande dispersion des conditions acoustiques des églises modernes qui peuvent être très ou très peu réverbérantes selon les cas. Cela est particulièrement le cas dans les églises catholiques (écart type de 1.7 s), mais s'explique en partie par le fait que l'époque considérée comprend des églises construites aussi bien avant qu'après le concile de Vatican II.

En remarquant par ailleurs la grande différence entre les conditions dans les églises vides ou pleines, on met en évidence un des points essentiels de l'acoustique des églises: une faible occupation des églises lors de services religieux ordinaires (ce qui est souvent le cas actuellement) conduit à un temps de réverbération élevé et donc à une faible intelligibilité de la parole. Les conditions sont plus favorables pour la parole (mais pas toujours pour la musique) lorsque l'église est pleine, situation normale à l'époque de la construction, et occasionnelle lors de fête ou concert de nos jours. L'importance de cette remarque nous conduira à étudier en détail cette problématique (cf. §5.4).

3.2.4.2.3 Régression logarithmique

L'analyse précédente de l'évolution du temps de réverbération en fonction du style a été réalisée directement sur la base de la moyenne des résultats de mesurages des églises réparties selon les quatre périodes. Cette démarche donne donc une image effective des variations de temps de réverbération en ne considérant que les divers styles architecturaux et en faisant abstraction des autres paramètres. Cependant, nous avons constaté d'une part que le volume moyen des églises variait d'une période à l'autre (cf. § 3.2.3.1) et d'autre part que le temps de réverbération dépendait du volume (cf. 3.2.4.1). Pour obtenir une image relative des variations de l'évolution du temps de réverbération en fonction du style on peut calculer et comparer des fonctions de régression pour chaque style, et calculer le temps de réverbération pour un volume normalisé. Cette démarche permet alors d'étudier plus précisément les variations de la quantité d'absorption et donc de la matérialisation des surfaces des églises suivant les périodes.

Nous avons vu (cf. §3.2.4.1) que le temps de réverbération présentait une relation satisfaisante avec le logarithme du volume⁷. Une telle relation est décrite par deux

⁷ Afin de pouvoir comparer nos résultats avec ceux obtenus par d'autres études similaires, nous avons délibérément choisi d'opter pour une régression de type logarithmique avec le volume, car ce type de

paramètres, à savoir la pente "a" et l'ordonnée à l'origine "y". Le temps de réverbération s'exprime alors par la relation

$$Tr(V) = a * \ln(V) + y$$

Le calcul des deux paramètres "a" et "y" a été effectué pour les divers styles architecturaux en ne faisant pas la distinction entre confession pour avoir un nombre suffisant d'églises par style (cf. Tableau 5).

Tableau 5 Paramètres des régressions logarithmiques du temps de réverbération en fonction du style (église vide)

Style	Pente "a"	Coordonnée à l'origine "y"	Coefficient de détermination R ²
Roman et gothique	0.883	-3.60	0.48
Baroque	0.828	-3.47	0.67
Néoclassique	0.804	-2.70	0.23
Moderne	0.905	-3.85	0.39
Tous styles	0.870	-3.55	0.42

Nous constatons que les pentes des régressions logarithmiques sont assez semblables d'un style à l'autre (0.855 ± 0.047). Les coordonnées à l'origine ont dans tous les cas des valeurs négatives (-3.4 ± 0.5 s) et assez proches les unes des autres, à l'exception de l'époque néoclassique qui a une valeur supérieure d'environ 0.8 s. Enfin les coefficients de détermination des régressions varient beaucoup d'un style à l'autre. La régression logarithmique donne une détermination satisfaisante pour le style baroque et dans une moindre mesure pour les styles roman et gothique. Le style néoclassique et, dans une moindre mesure, le style moderne, présentent par contre une grande dispersion. Pour mieux se rendre compte des différences entre les styles, on peut calculer, à partir des régressions, les valeurs de temps de réverbération, pour quelques volumes typiques (600 m³ pour les petites églises, 3000 m³ pour les églises moyennes, 4645 m³ comme volume moyen sur l'ensemble des églises et 10000 m³ pour les grandes églises, selon la typologie du §3.2.3.1)

Nous constatons (cf. Tableau 6) que le style néoclassique présente le temps de réverbération typique le plus élevé et ce quel que soit le volume. Cette tendance diminue cependant avec l'accroissement du volume (l'écart à la moyenne est de 0.43 s pour les petits volumes et de 0.25 s pour les grands volumes). Cette conclusion confirme les remarques faites pour la comparaison absolue pour cette période. Les églises de style baroque, sont au contraire plutôt plus sèches que la moyenne et cette tendance augmente avec l'accroissement du volume (l'écart à la moyenne n'est de 0.19 s pour les petits volumes et de 0.3 s pour les grands volumes). Cette différence s'explique par la contribution majoritaire (73%) dans ce style des églises réformées qui sont, nous l'avons vu, relativement petites et plutôt sèches.

régression est la plus fréquemment utilisée dans la littérature. Rappelons cependant qu'une régression en puissance du volume donne une meilleure corrélation avec nos résultats de mesurages.

Tableau 6 Temps de réverbération en fonction du style (calcul avec des régressions logarithmiques pour des volumes typiques)

Style	Volume typique (m ³)			
	600	3000	4645	10000
Roman et gothique	2.05	3.47	3.86	4.53
Baroque	1.83	3.16	3.52	4.16
Néoclassique	2.44	3.74	4.09	4.71
Moderne	1.94	3.40	3.79	4.49
Tous	2.01	3.41	3.79	4.46

3.2.4.2.4 Normalisation du temps de réverbération

Pour comparer le temps de réverbération suivant la période en gardant le volume constant ($V_{ref} = 4645 \text{ m}^3$ comme volume moyen sur l'ensemble des églises), nous avons utilisé deux techniques différentes de normalisation appelées *simple* et *complexe*.

La normalisation 1 (simple) consiste à corriger les temps de réverbération moyens de chaque style (Tableau 4) en considérant le volume moyen du style (Tableau 3) et utilisant la pente moyenne calculée précédemment pour le style considéré (Tableau 5), soit

$$Tr_{,n1 \text{ style } n} = Tr_{\text{moyen mesuré style } n} - a_{\text{style } n} * \text{Ln}(V_{\text{moyen mesuré style } n} / V_{ref})$$

Par exemple

$$Tr_{,n1}(\text{moderne}) = 3,20 - 0,905 \text{ Ln}(3496/4645) = 3,45 \text{ s}$$

La normalisation complexe consiste à calculer les temps de réverbération de chaque style en considérant le volume de référence et utilisant les régressions logarithmiques calculées pour chaque style (cf. §3.2.4.2.3), soit

$$Tr_{,n2 \text{ style } n} = a_{\text{Style } n} * \text{Ln}(V_{ref}) + y_{\text{Style } n}$$

Par exemple

$$Tr_{,n2}(\text{moderne}) = 0,905 \text{ Ln}(4645) - 3,85 = 3,79 \text{ s}$$

Les valeurs de temps de réverbération normalisée de cette façon sont données dans le Tableau 6 (pour $V = 4645 \text{ m}^3$).

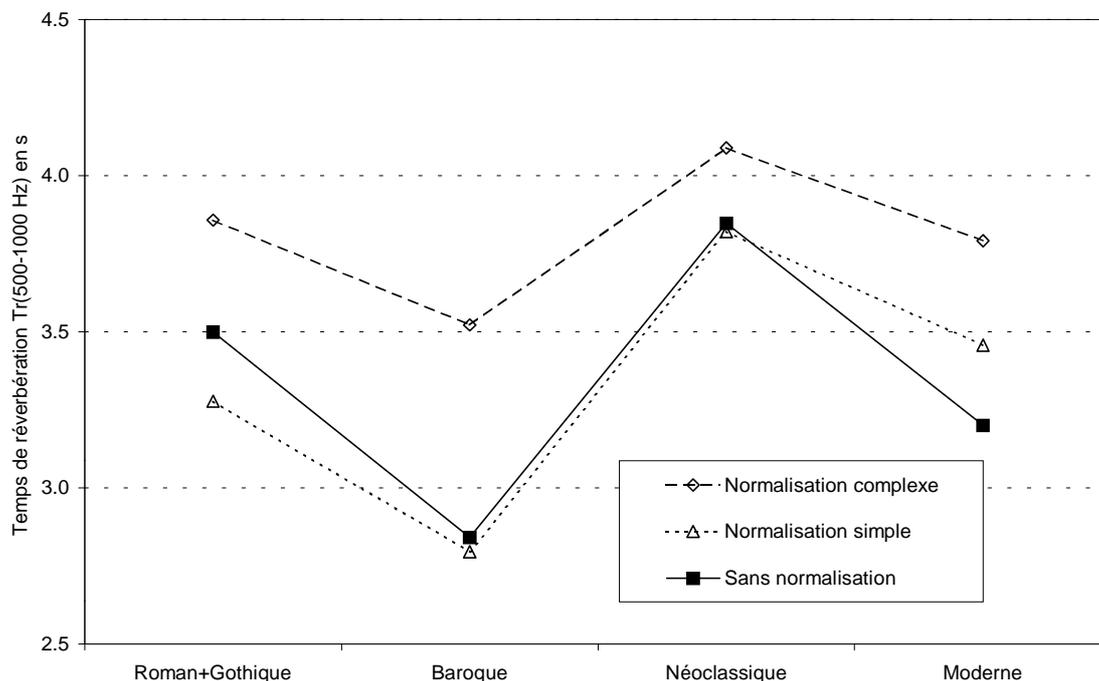


Figure 7 Temps de réverbération normalisé ($V = 4645 \text{ m}^3$) en fonction du style

La normalisation simple ne fait que corriger les temps de réverbération des styles dont le volume moyen s'écarte du volume de référence ($V_{\text{ref}} = 4645 \text{ m}^3$). Ainsi le temps de réverbération pour le style roman et gothique, avec un volume moyen effectif légèrement supérieur au volume de référence est abaissé et celui du style moderne, avec un volume moyen effectif légèrement inférieur au volume de référence est un peu augmenté.

La normalisation complexe, qui ne tient pas compte des volumes moyens effectifs dans chaque style, donne des résultats présentant la même tendance mais avec des valeurs légèrement plus élevées. Les deux courbes sont donc presque parallèles, sauf pour la période néoclassique où l'écart diminue, ce qui peut s'expliquer en partie par la valeur particulièrement faible de la détermination pour ce style.

Les conclusions développées lors de la comparaison absolue des églises (sans normalisation, en tenant donc compte des différences effectives de volumes suivant les styles et la confession) se retrouve, de façon un peu atténuée, avec les résultats des temps de réverbération normalisés. Nous constatons en effet (cf. Figure 7) que le temps de réverbération diminue sensiblement pour le style baroque. Comme relevé précédemment, le nombre important d'églises réformées dans cette classe de style en détermine la tendance. Les modifications dans la façon de célébrer le culte après la Réforme, entraîna un besoin accru d'intelligibilité de la parole et donc une acoustique moins réverbérante. L'augmentation observée durant l'époque baroque pour les églises catholiques ne fait donc qu'atténuer la diminution observée pour l'ensemble des églises pour cette période. La période néoclassique, avec sa nostalgie de l'époque et de la piété médiévale, conduit à une augmentation sensible de la réverbération.

3.2.4.3 Evolution fréquentielle du temps de réverbération

Afin d'étudier l'évolution fréquentielle du temps de réverbération, les valeurs par octave (données disponibles pour la plupart des églises) ont été normalisées. La valeur du temps de réverbération de chaque bande d'octave a été divisée par la valeur moyenne (moyenne des bandes d'octave centrées à 500 et 1000 Hz). Cela permet d'étudier les différences relatives entre les bandes d'octaves et d'analyser l'importance sur le timbre des églises de divers paramètres (volume, réverbération moyenne, style et confession).

3.2.4.3.1 Volume

Pour étudier l'influence du volume sur l'évolution fréquentielle du temps de réverbération, les églises ont été réparties suivant 4 catégories de volume correspondant à la typologie déjà définie, avec un nombre comparable d'églises dans chacune d'elles. Les limites inférieures des catégories sont de 10000 m³ pour les très grandes églises, 5000 m³ pour les grandes églises et 1500 m³ pour les moyennes. On remarque (cf. Figure 8) que plus l'église est grande, plus la réverbération aux hautes fréquences ($f \geq 2000$ Hz) diminue. Cet effet, qui induit une perte de brillance, s'explique aisément par l'absorption de l'air qui devient significative à ces fréquences, en particulier pour les grands volumes (grandes ou très grandes églises) où le libre parcours moyen entre deux réflexions devient important. Le fait que la pierre soit principalement utilisée pour l'édification des très grandes églises, pour des questions constructives, explique par ailleurs le temps de réverbération plus important de ces églises aux basses fréquences ($f = 125$ Hz). Le temps de réverbération est plus faible à ces fréquences pour les moyennes et grandes églises ($1500 \leq V \leq 10000$ m³) du fait de la plus grande utilisation de bois (qui absorbe les basses fréquences) dans ce type d'églises.

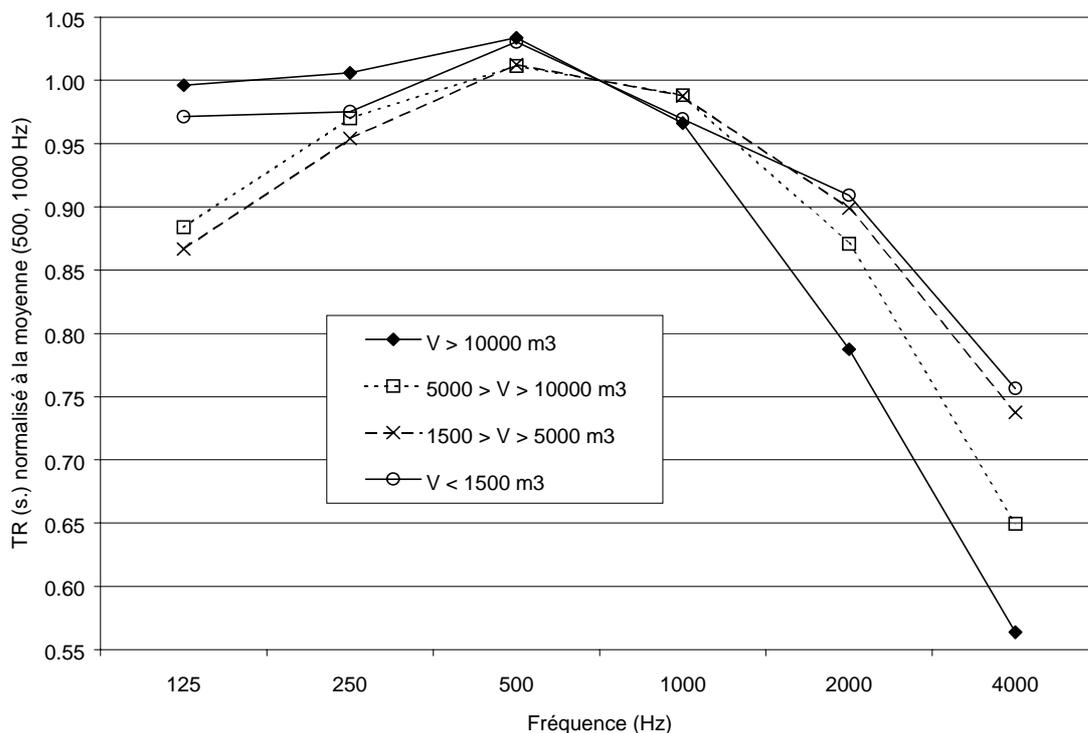


Figure 8 Evolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction du volume

3.2.4.3.1 Valeur moyenne du temps de réverbération

Si on analyse l'évolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction de sa valeur moyenne, on constate (cf. Figure 9) que plus les églises sont réverbérantes, plus la réverbération aux hautes fréquences ($f \geq 2000$ Hz) diminue. Cela s'explique partiellement par la relation entre le temps de réverbération et le volume. Cette variation en hautes fréquences est cependant plus marquée dans ce cas que lorsque le volume est pris pour paramètre. On peut par ailleurs remarquer une augmentation de la réverbération aux basses fréquences pour les églises relativement sèches ($Tr < 2$ s) mais une baisse sensible à ces fréquences pour les églises moyennement réverbérantes ($2 < Tr < 4$ s).

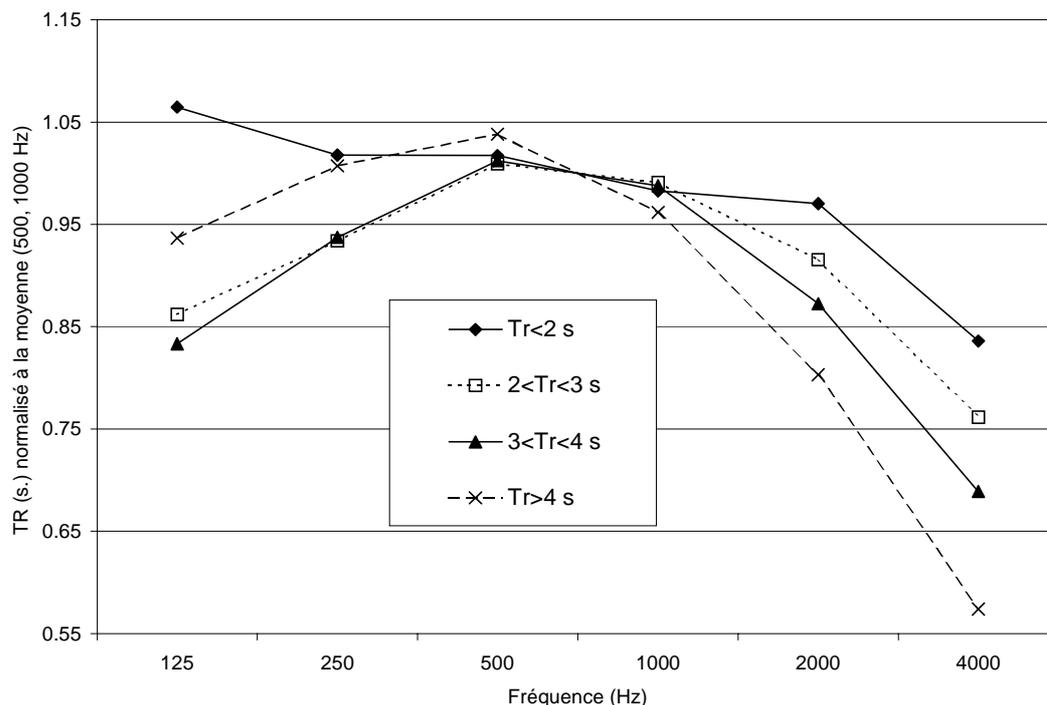


Figure 9 Evolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction de sa valeur moyenne

3.2.4.3.2 Style et confession

L'analyse de l'évolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction du style met en évidence (cf. Figure 10) une baisse significative des basses fréquences durant l'époque baroque (et dans une moindre mesure à l'époque néoclassique). Cette faible réverbération contribue à améliorer l'intelligibilité de la parole. Ce timbre particulier, déjà relevé par Venzke [27], s'explique par l'utilisation de nombreuses boiseries dans ce style. Au contraire, on constate que le style roman et gothique ont un timbre plus chaleureux avec des basses fréquences plus élevées, dues à l'utilisation importante de la pierre dans ces styles. Le timbre des églises romanes et gothiques se distingue également en hautes fréquences, où la diminution rapide de la réverbération est caractéristique de volumes et des réverbérations plutôt élevés.

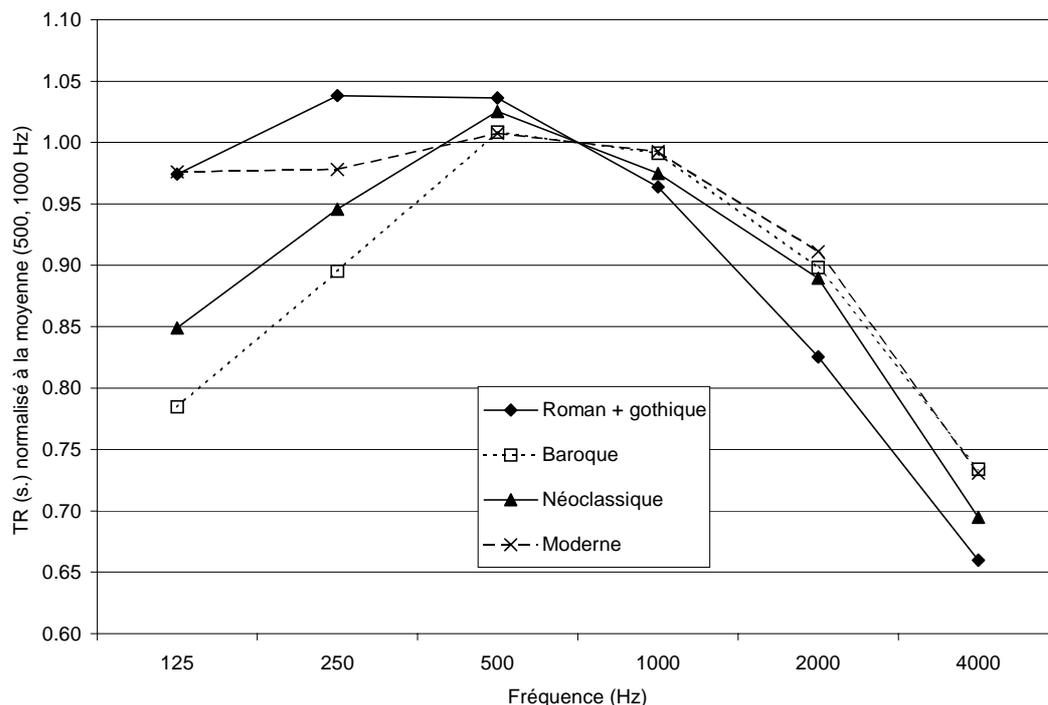


Figure 10 Evolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction du style

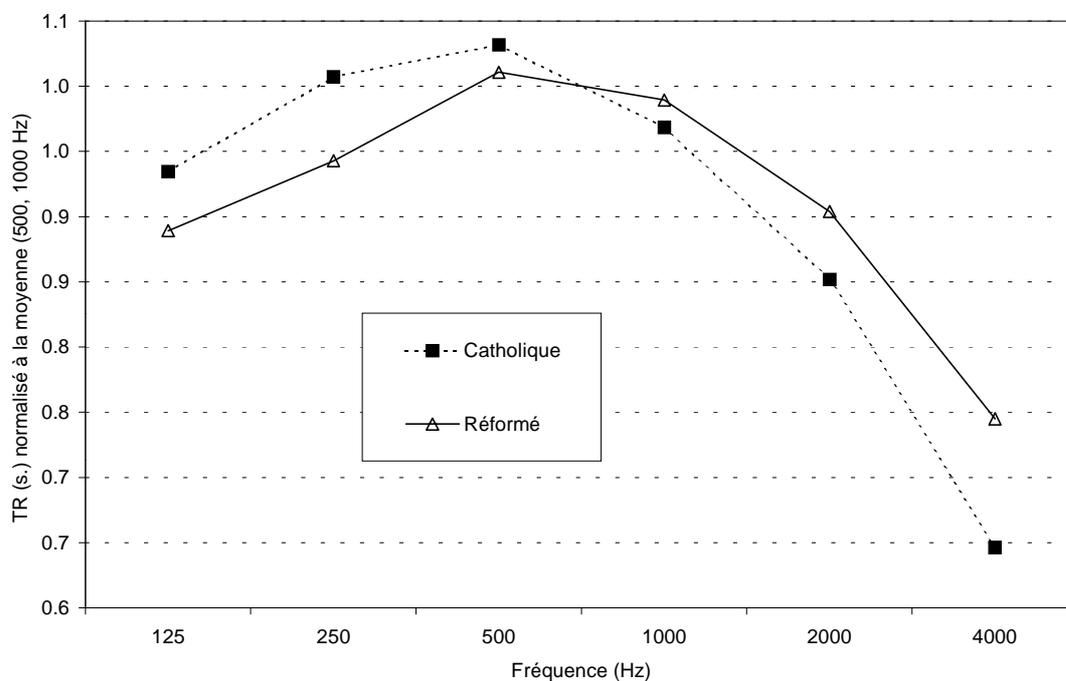


Figure 11 Evolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction de la confession

L'analyse de la confession ne permet pas de constater de grandes différences de timbre entre les églises catholiques et protestantes (cf. Figure 11). Les églises

catholiques présentent une diminution un peu plus rapide des hautes fréquences mais moins importantes aux basses fréquences que les églises réformées. Ces caractéristiques s'expliquent par le volume et la réverbération importantes des églises catholiques.

3.2.5 Bruit de fond

3.2.5.1 Caractérisation des sources

Le bruit de fond issu de sources sonores extérieures et intérieures est un des paramètres importants pour apprécier l'ambiance acoustique d'un lieu. Le bruit de fond peut être perçu comme en accord à la fonction ou comme extérieur à elle. Ainsi, à même niveau sonore, le son des cloches sera moins gênant que le passage d'un train.

Les principales sources extérieures auxquelles les églises sont exposées sont les bruits de transport (route, train, avion, etc.). Mais on trouve aussi des sources "naturelles" (activités humaines, fontaine, oiseaux, etc.) qui sont généralement perçues comme moins perturbatrices. Le type et l'intensité du bruit de fond extérieur dépendent principalement de la situation de l'église et de l'isolation acoustique de son enveloppe.

Les principales sources de bruit de fond intérieures sont liées à la présence de l'assemblée (craquement de bancs, toux, chuchotement, etc.) mais également au bruit des installations techniques du bâtiment (chauffage, humidificateur pour l'orgue, etc.). Le type et l'intensité du bruit de fond intérieur dépendent donc des caractéristiques (nombre, présence d'enfants, etc.) de l'assemblée, mais également du type de mobilier (chaise, bancs ou plancher qui grince) ainsi que de la présence et de l'utilisation des installations techniques.

3.2.5.2 Analyse des niveaux sonores

Les mesurages ayant été essentiellement effectués dans des églises vides, le bruit de fond mesuré correspond généralement à des sources extérieures⁸. L'analyse de l'influence de la présence de l'assemblée sur l'intelligibilité de la parole nous conduira à étudier le bruit de fond dans certaines églises occupées (cf. §5.4.4.2).

Le niveau sonore équivalent durant 20 s ($L_{eq}(20s)$) a été mesuré dans les églises par bandes d'octave (de 125 à 4000 Hz) et en large bande (sans pondération et en dB(A)). Pour analyser les résultats des mesurages, nous avons distingué deux types d'environnement extérieur (urbain ou rural).

Tableau 7 Bruit de fond ($L_{Aeq}(20s)$ en dB(A) et $L_{eq}(20s)$ en dB).

Milieu	Moyenne		Ecart type	
	$L_{Aeq}(20s)$	$L_{eq}(20s)$	$L_{Aeq}(20s)$	$L_{eq}(20s)$
Urbain	36.1	55.3	7.2	6.0
Rural	23.3	45.4	3.6	4.8

⁸ Dans de rares cas, la présence d'un humidificateur en fonction pour l'orgue dans des églises inoccupées devient déterminante pour l'évaluation du bruit de fond.

Nous constatons (cf. Tableau 7) que le niveau sonore moyen pondéré est beaucoup plus faible dans un milieu rural (23.3 dB(A)) que dans un milieu urbain (36.1 dB(A)). Dans les deux cas, le niveau sonore de bruit de fond est cependant généralement suffisamment faible pour ne pas perturber l'intelligibilité de la parole. Les églises se trouvent donc généralement dans des zones peu exposées au bruit ou elle dispose d'une isolation suffisante pour s'en protéger. Relevons tout de même que 15% des églises évaluées présentaient un niveau de bruit de fond supérieur à 40 dB(A) et 5% une valeur supérieure à 45 dB(A). Dans ce dernier cas, les églises se trouvent toutes en bordure d'une route passante avec des problèmes d'isolation sonore souvent au niveau des portes.

Les résultats de mesurages montrent une plus grande dispersion pour un environnement urbain (écart type de 7.2 dB(A)) que dans un milieu rural (3.6 dB(A)) qui s'explique par les grandes variations d'exposition sonore en ville en fonction de la proximité et de la fréquentation des axes routiers.

L'analyse fréquentielle du bruit de fond met en évidence (cf. Figure 12) des spectres de bruit de fond classiques avec une décroissance importante en basses fréquences (8 puis 5 dB/octave entre 125 et 500 Hz) puis plus faible aux moyennes et hautes fréquences (env. 3 dB/oct au-dessus de 500 Hz). Notons que le niveau de bruit de fond en milieu rural, qui devient très faible en hautes fréquences (12 dB dans les octaves de 2 et 4 kHz) se stabilise à ces fréquences. La différence entre les environnements est presque constante (10 à 12 dB) entre 125 et 2000 Hz et elle diminue en hautes fréquences (6 dB à 4000 Hz).

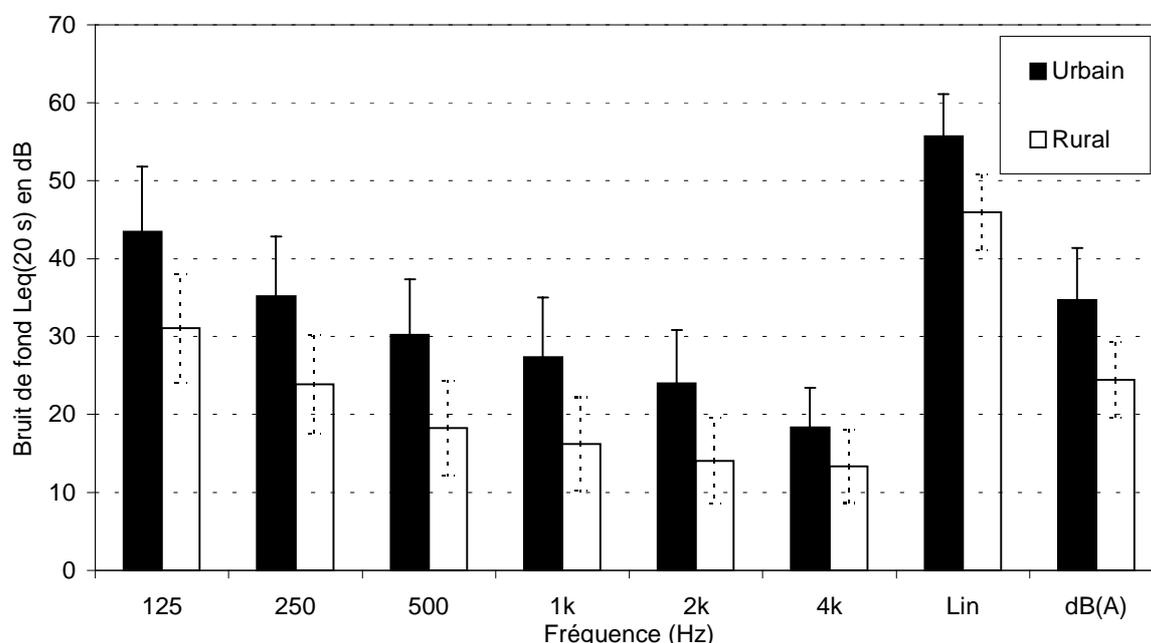


Figure 12 Bruit de fond dans les églises situées dans deux types d'environnement urbain et rural (valeur moyenne \pm 1 écart type)

3.2.6 Intelligibilité de la parole

3.2.6.1 Emission, transmission et réception d'un message

La transmission d'un message sonore se fait en trois étapes qui font intervenir successivement l'émission du message par un orateur, sa transmission dans un milieu, et sa réception par un auditeur. L'intelligibilité de la parole dépend de la qualité de chacun de ces trois maillons. La qualité de l'émission sonore du message est dictée non seulement par son niveau sonore mais également par la diction, l'articulation et le débit de l'orateur. Le contenu du message sera également déterminant pour l'intelligibilité. Le message émis est alors transmis acoustiquement de l'orateur à l'auditeur. La qualité du milieu de transmission, dans notre cas une église, est déterminée essentiellement par sa réverbération et le niveau sonore du bruit de fond. Un message est d'autant mieux transmis que la réverbération est faible et que le bruit de fond est bas. Enfin, au bout de la chaîne, les capacités d'audition du fidèle sont déterminantes pour que le message, émis puis transmis soit perçu et compris correctement. L'intelligibilité est donc également déterminée par l'acuité auditive, la concentration, la connaissance du sujet traité (pour recomposer les éléments incompris), de l'auditeur.

Dans le cas de paroles (non sonorisées) dans une église, le milieu de transmission est caractérisé par l'acoustique de l'édifice. Pour cette phase de transmission, l'intelligibilité de la parole dépend principalement de deux paramètres, à savoir l'émergence du signal (la parole) sur le bruit de fond et le temps de réverbération. Dans certains cas, la présence de phénomènes temporels particuliers (par exemple une forte réflexion tardive) peuvent encore affecter l'intelligibilité.

3.2.6.2 Sonorisation

3.2.6.2.1 Fonction de la sonorisation

Au cours des siècles divers dispositifs ont été utilisés dans les églises pour améliorer l'intelligibilité de la parole en agissant sur l'émission, la transmission et la réception de paroles. Le chapitre 5 analysera plus particulièrement deux de ces dispositifs, les vases acoustiques et les chaires. Actuellement, l'amélioration de l'intelligibilité de la parole dans les églises passe par l'utilisation d'une installation de sonorisation.

Une sonorisation, si sophistiquée soit-elle, ne peut cependant corriger ni une mauvaise élocution, ni une mauvaise acoustique et encore moins un défaut d'audition. La sonorisation n'a pour objet que de renforcer, déplacer et modifier les caractéristiques (spectre fréquentiel, rayonnement) d'une source sonore trop faible en créant une ou plusieurs source(s) secondaire(s). On a cependant trop vite fait de voir dans ces dispositifs le moyen idéal de ne plus se soucier ou d'éliminer tout problème acoustique⁹. La sonorisation, si elle contribue souvent à améliorer quelque

⁹ Raes affirme ainsi que "le renforcement électroacoustique des orateurs n'a, nulle part, fait autant de mal que dans les temples. Certains prêtres et architectes "progressistes" suppriment la chaire, ne se soucient pas de l'acoustique de leurs églises, n'élèvent plus la voix et comptent sur le micro pour tout arranger" [28].

peu les conditions d'écoute, apporte cependant souvent presque autant de problèmes qu'elle n'en résout.

3.2.6.2 Occurrence, utilisation et type de sonorisation

L'analyse statistique des églises recensées montrent que 90% des églises, même de petites dimensions, sont sonorisées. Il est pourtant reconnu que dans des volumes inférieurs à 3000 m³ présentant de bonnes conditions acoustiques et une assistance inférieure à 1000 personnes (ce qui est le cas de bon nombre d'églises), un orateur entraîné peut se faire comprendre de ses auditeurs sans l'aide de dispositif d'amplification électroacoustique. Sans être souvent indispensable, une installation de sonorisation est pourtant aujourd'hui devenue presque incontournable. Parmi les églises possédant une installation de sonorisation, 92% des paroisses l'utilisent à chaque célébration contre 8% occasionnellement.

Les installations relevées sont parfois pure fantaisie d'un concepteur peu scrupuleux, peu éclairé dans le domaine ou simplement plus avide de lucre que de performance¹⁰. En effet, la majorité des églises recensées disposent de système d'amplification avec des haut-parleurs (en général des colonnes situées de part et d'autre de l'assemblée) distribuées dans l'espace.

3.2.6.3 Mesurages

Objectivement, la qualité de l'intelligibilité peut être mesurée par des tests d'écoute normalisés qui font appel à l'ensemble du processus (émission, transmission et réception). Ces tests sont cependant très fastidieux à mettre en œuvre et sujet à beaucoup d'incertitude. En ce qui concerne notre étude, nous nous limiterons à étudier l'adéquation, pour la parole, du milieu de transmission, qui peut être caractérisé par des grandeurs physiques objectives et mesurables. Le plus utilisé est l'indice STI (Speech Transmission Index) ou sa version simplifiée le RASTI (RApid Speech Transmission Index) [29].

Tableau 8 Intelligibilité subjective de la parole en fonction de l'indice STI (ou RASTI)

STI ou RASTI	0 à 0.3	0.3 à 0.45	0.45 à 0.6	0.6 à 0.75	0.75 à 1
Intelligibilité	Mauvaise	Faible	Suffisante	Bonne	Excellente

Dans 48 églises, des mesurages d'intelligibilité (en utilisant l'indice RASTI) ont été effectués d'abord sans, puis avec l'appui d'une installation de sonorisation. Dans chaque église, les valeurs minimum, maximum et moyenne des résultats pour les diverses positions de mesurages ont été analysées.

¹⁰ Il n'y a en Suisse que très peu d'ingénieurs indépendants en sonorisation. La plupart des installations sont alors directement proposées par des fournisseurs, qui sont partie prenante, l'essentiel de leur revenu étant assuré par la marge de bénéfice sur la vente de matériel et non de leurs prestations de conseil (souvent non facturées).

3.2.6.4 Résultats et analyse

Les résultats de mesurages (cf. Tableau 9) mettent en évidence les faibles valeurs d'intelligibilité dans les églises sans sonorisation (en moyenne sur l'ensemble des églises mesurées, le RASTI d'une église varie de 0.35 à 0.49 avec une moyenne à 0.40). Une installation de sonorisation peut apporter une amélioration sensible (jusqu'à une augmentation de 0.13 du RASTI) mais également une baisse de l'intelligibilité si elle est mal conçue (la baisse la plus importante est de -0.04). En moyenne, la sonorisation n'apporte qu'une faible amélioration moyenne de l'intelligibilité (+0.03). La conception et le matériel utilisé pour sonoriser les églises en Suisse, souvent inadaptés, expliquent en grande partie la faible différence entre les résultats sans (RASTI moyen de 0.40) et avec système d'amplification électroacoustique (RASTI moyen de 0.44). Ces résultats concordent avec ceux obtenus par Carvalho [30] au Portugal (RASTI moyen de 0.42 sans sonorisation et 0.44 avec sonorisation). En comparant l'intelligibilité suivant la confession, on constate que celle-ci est meilleure dans les temples réformés que dans les églises catholiques, et ce, avec ou sans sonorisation. Cette constatation s'explique par le fait que les églises catholiques ont, en moyenne, une réverbération plus élevée et une surface au sol plus importantes que les églises réformées.

Tableau 9 Intelligibilité de la parole: indice RASTI

Statistique	Sans sonorisation			Avec sonorisation			Amélioration moy
	min.	max.	moy.	min.	max.	moy.	
Maximum dans église	0.54	0.70	0.57	0.54	0.64	0.58	0.13
Minimum dans église	0.19	0.37	0.25	0.18	0.36	0.30	-0.04
Moyenne dans église	0.35	0.49	0.40	0.38	0.50	0.44	0.03
Ecart type dans église	0.08	0.07	0.07	0.07	0.08	0.06	0.04

Tableau 10 Intelligibilité de la parole selon la confession

Confession	Sans sonorisation			Avec sonorisation			Amélioration moy
	min.	max.	moy.	min.	max.	moy.	
Catholique	0.32	0.46	0.37	0.35	0.47	0.41	0.04
Réformée	0.39	0.51	0.44	0.41	0.54	0.48	0.03

La valeur minimale du RASTI de chaque église sans sonorisation, correspond à la plus mauvaise place mesurée, située en général à une position éloignée de l'orateur, lorsque le champ acoustique est essentiellement diffus. On peut mettre alors en évidence que cette valeur minimale est assez bien corrélée au logarithme de la surface au sol de l'église (cf. Figure 13), qui est le paramètre recensé dans notre cas le mieux corrélé avec la distance maximale entre orateur et auditeur. Cette corrélation disparaît évidemment avec l'utilisation d'une installation de sonorisation. On constate cependant que celle-ci peut augmenter l'intelligibilité des plus mauvaises places surtout dans les moyennes et grandes églises.

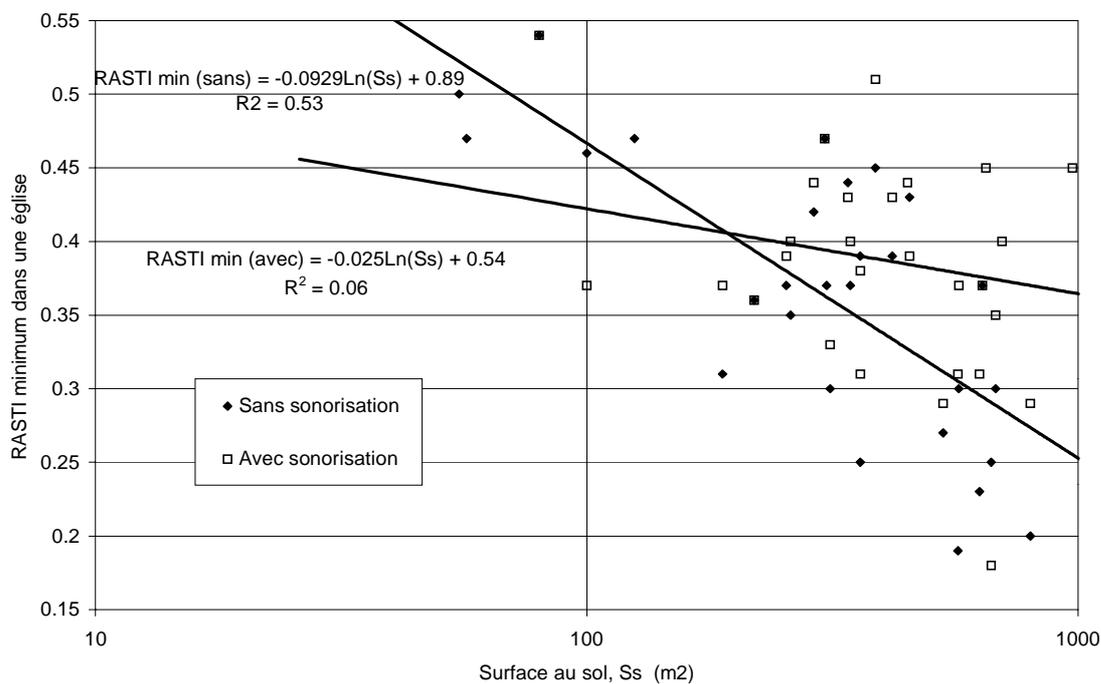


Figure 13 Intelligibilité minimale (RASTI min) en fonction de la surface au sol (S_s) et de l'utilisation d'une sonorisation

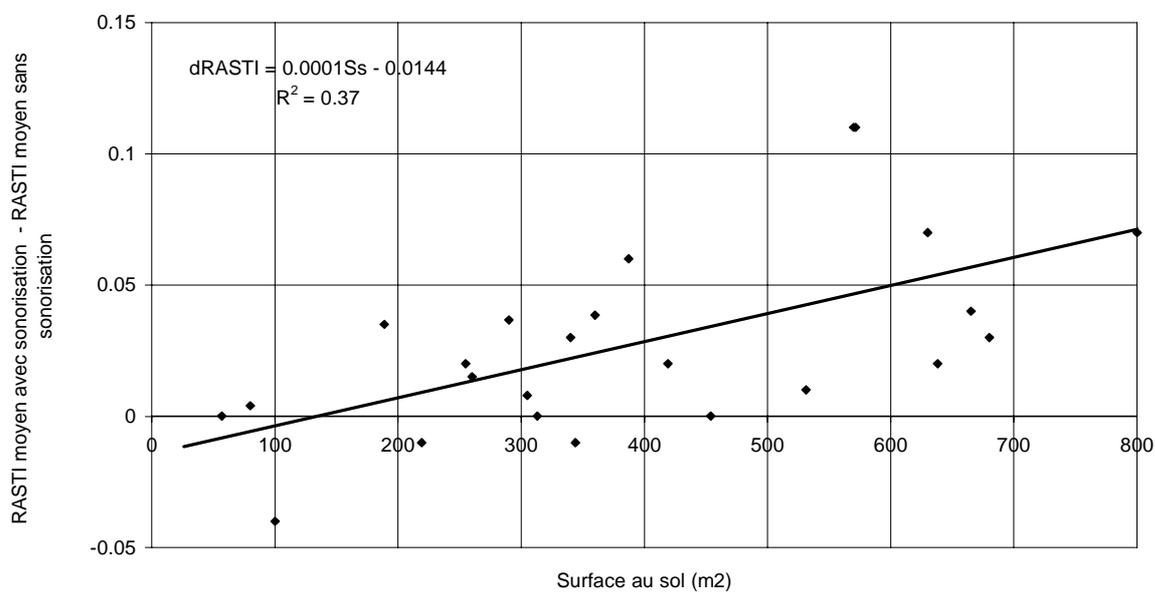


Figure 14 Amélioration par la sonorisation de l'intelligibilité moyenne en fonction de la surface au sol

Cette remarque se confirme avec l'analyse de l'amélioration apportée par la sonorisation sur l'intelligibilité moyenne qui augmente avec la surface au sol de l'église (cf. Figure 14). Plus l'église est grande, plus l'amélioration apportée par l'utilisation d'une installation de sonorisation peut être importante. L'utilisation d'une sonorisation ne se justifie donc que pour des églises avec une surface au sol de plus de 250 m².

Le fait que les niveaux sonores de bruit de fond mesurés soient relativement bas tant en ville qu'à la campagne, induit que l'influence de celui-ci sur l'intelligibilité est généralement négligeable dans les églises (l'émergence entre le niveau sonore de la parole et du bruit de fond est généralement largement supérieur à 15 dB(A)). La faible intelligibilité moyenne s'explique donc principalement par les temps de réverbération élevés (surtout dans les églises vides¹¹).

On constate en effet (cf. Tableau 11) que l'intelligibilité moyenne de la parole dans les églises sans sonorisation est bien corrélée au temps de réverbération. L'analyse en fréquence, montre que les bandes de 2000 et 1000 Hz présentent les meilleures corrélations avec l'intelligibilité. Cette remarque, basée sur l'analyse de salles particulières que sont les églises, confirme ainsi les résultats d'études psychoacoustiques sur l'intelligibilité de la parole dans les salles [29; 31].

Tableau 11 Coefficient de corrélation entre l'intelligibilité (RASTI moyen) le temps de réverbération par octave

Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	500 + 1000
r^2	-0.68	-0.81	-0.84	-0.87	-0.87	-0.80	-0.86

L'analyse des différents résultats de mesurages d'intelligibilité moyenne sans sonorisation montre empiriquement une bonne relation avec le logarithme du temps de réverbération dans la bande de 2 kHz (cf. Figure 15).

¹¹ Rappelons que tous les mesurages présentés ici ont été réalisés dans des églises inoccupées. L'effet de l'occupation sur l'intelligibilité et les performances des installations de sonorisation fera l'objet d'une analyse particulière (cf. §5.4).

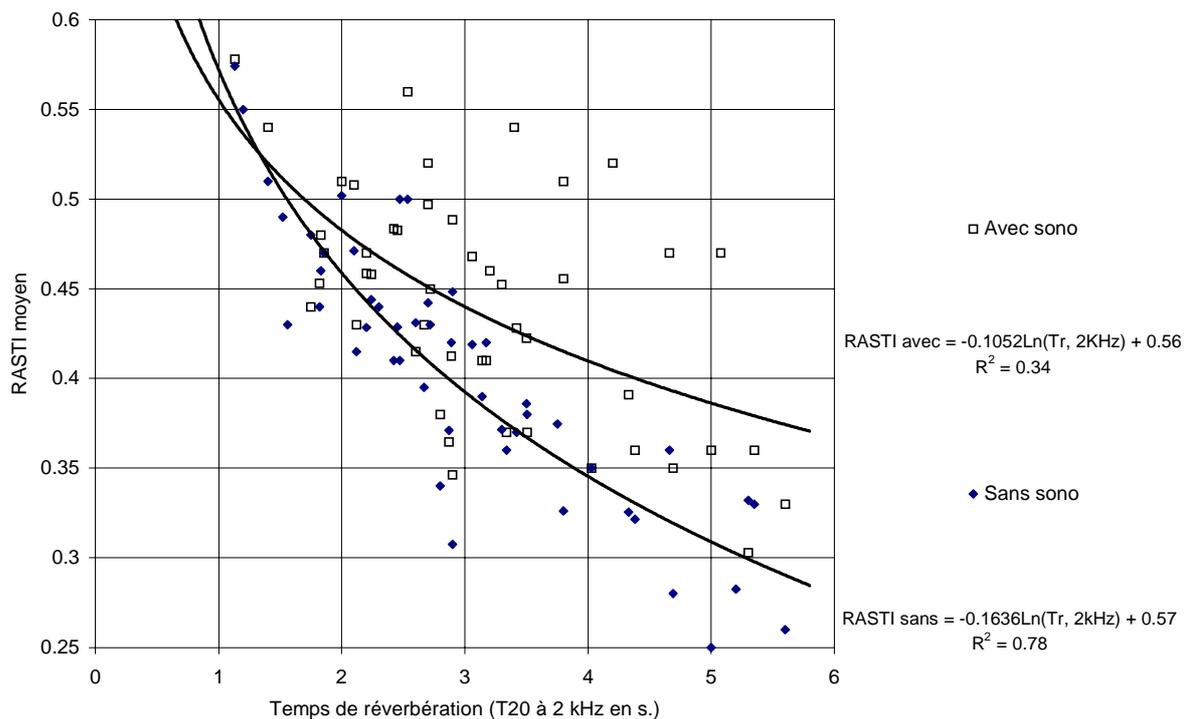


Figure 15 Intelligibilité moyenne en fonction du temps de réverbération et de la sonorisation

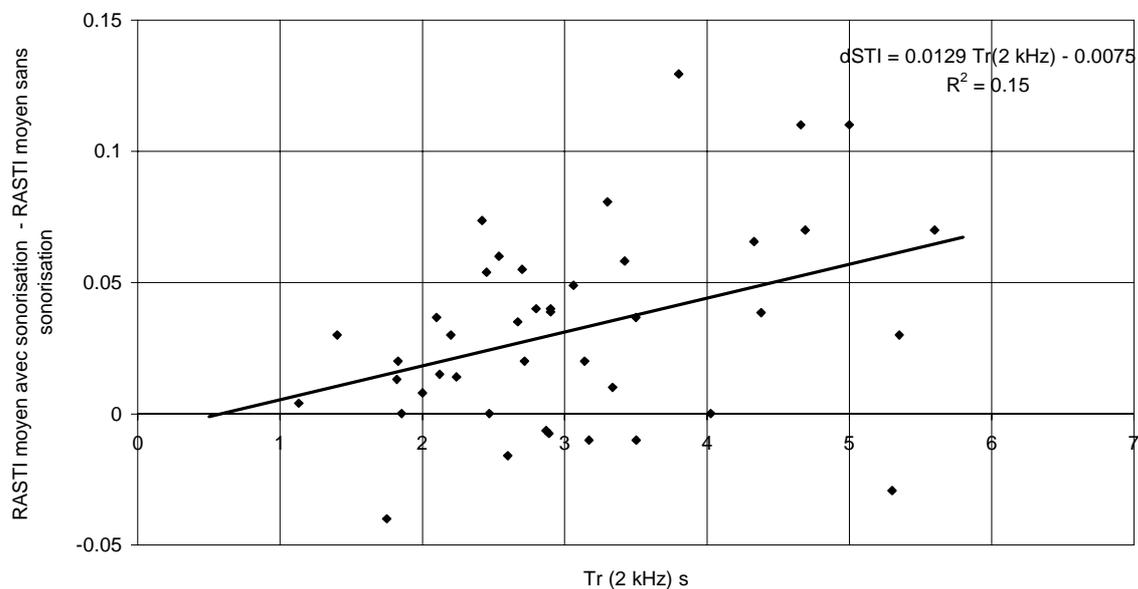


Figure 16 Amélioration par la sonorisation de l'intelligibilité moyenne en fonction du temps de réverbération

Nous avons vu que l'utilisation d'une installation de sonorisation modifie (en bien ou en mal!) l'intelligibilité de la parole, et ce, quelles que soient les conditions

acoustiques de l'église (en particulier le temps de réverbération). Il est dès lors logique que la corrélation entre intelligibilité et temps de réverbération devienne nettement moins bonne avec l'utilisation d'une sonorisation.

L'analyse précise des résultats de mesurages montre que l'utilisation d'une sonorisation ne peut apporter une amélioration sensible d'intelligibilité qu'en présence d'une réverbération assez élevée ($T_r > 2.5$ s, cf. Figure 16) et surtout dans les moyennes ou grandes églises ($S_s > 250$ m², cf. Figure 14).

3.2.7 Synthèse de l'analyse statistique des églises en Suisse

3.2.7.1 Géométrie

L'analyse statistique sur 190 églises recensées en Suisse a d'abord permis de différencier celles-ci suivant leur volume. On peut distinguer les petites églises (volume de 600 ± 400 m³) des églises moyennes (3000 ± 1500 m³) des grandes églises (>5000 m³). Les petites et moyennes églises réformées sont plus nombreuses et légèrement plus grandes que celles catholiques de la même catégorie. Par contre, les grandes églises sont nettement plus nombreuses et grandes du côté catholique. Le volume moyen est plus important et plus variable dans les églises catholiques (5793 ± 7354 m³) que réformées (3864 ± 4886 m³).

Le volume spécifique le plus courant est de 7 à 8 m³/pers. pour les petites et moyennes églises 18 m³/pers. pour les grandes églises, qui peuvent atteindre des volumes spécifiques très importants. Les églises réformées présentent une occupation plus dense de l'espace (5 et 8 m³/pers., ce qui favorise l'intelligibilité de la parole lorsque l'église est pleine) que les églises catholiques (8 à 10 m³/pers.). C'est à l'époque baroque que la différence entre les deux confessions est la plus grande, les catholiques disposant de volume spécifique le plus important de tous les styles (>25 m³/pers) alors que les réformés ont le plus faible (<7 m³/pers.).

79% des églises ont une hauteur moyenne (h) comprise entre 5 et 12 m. Les églises catholiques sont en général plus hautes (maximum d'occurrence entre 7 et 8 m) que les édifices réformés (entre 5 et 6 m).

3.2.7.2 Réverbération

La relation entre le temps de réverbération et le logarithme du volume présente une plus grande dispersion ($R^2 = 0.42$ respectivement 0.50 dans les églises vides respectivement pleines) que si l'on considère une relation en puissance du volume ($R^2 = 0.48$, respectivement 0.58). On observe une dispersion semblable en étudiant la relation entre le temps de réverbération et la hauteur ($R^2 = 0.42$, vides et 0.62 pleines) ou une puissance de la surface au sol ($R^2 = 0.41$, vides et 0.58 pleines).

Le temps de réverbération est plus long dans les églises catholiques (moyenne de 4.09 ± 1.58 s dans les églises vides) que dans les églises réformées (2.89 ± 1.24 s). Cette différence augmente encore dans les églises pleines de part la densité d'occupation plus importante des églises réformées. Logiquement, le temps de

réverbération des églises ne dépend pas de la confession pour les églises construites avant la Réforme (style roman et gothique). Le style baroque se caractérise par une augmentation de la réverbération dans les églises catholiques et une diminution dans les églises réformées. On constate à l'époque néoclassique une augmentation de la réverbération dans les deux confessions. Enfin, la période moderne voit une diminution de la réverbération des églises catholiques (surtout après le concile Vatican II). L'évolution de la réverbération en fonction du style architectural peut donc bien être mise en relation étroite avec l'évolution de la liturgie au cours des siècles.

Les régressions logarithmiques avec le volume sont assez semblables d'un style à l'autre (pente de 0.855 ± 0.047 et coordonnées à l'origine de -3.4 ± 0.5 , le style néoclassique étant plus élevé de 0.8 s.), mais elles présentent des dispersions variables (importante pour la période néoclassique et faible pour la période baroque). Les deux types de normalisation (volume constant) du temps de réverbération confirment les conclusions susmentionnées sur l'évolution suivant le style et la confession.

L'analyse de l'évolution fréquentielle de temps de réverbération (timbre), montre que plus l'église est grande et réverbérante, plus la réverbération aux hautes fréquences diminue (perte de brillance due à l'absorption de l'air). On remarque une augmentation de la réverbération aux basses fréquences (timbre chaleureux) pour les très grandes églises et les églises plutôt sèches ($T_r < 2$ s), mais une baisse sensible à ces fréquences pour les églises de taille et de réverbération moyennes. Selon les matériaux de prédilection utilisés, on observe une baisse significative des basses fréquences pour le style baroque (utilisation du bois) et une augmentation de ces fréquences pour le style roman et gothique (utilisation de la pierre).

On constate qu'après la Réforme (à l'époque baroque), les constructeurs mettent en œuvre différentes stratégies pour améliorer l'intelligibilité de la parole dans les églises. La plus marquante et efficace concerne la baisse significative du temps de réverbération. On observe cependant également aussi une densification de l'occupation (la diminution du volume spécifique induit une baisse importante de la réverbération lorsque l'église est pleine) ainsi que l'absorption massive des basses fréquences (en particulier par l'utilisation de boiseries) qui induit un timbre adapté à la parole.

3.2.7.3 Intelligibilité

Le niveau sonore du bruit de fond, dont l'aspect qualitatif est important, est beaucoup plus faible et homogène dans un milieu rural (23.3 ± 3.6 dB(A)) que dans un milieu urbain (36.1 ± 7.2 dB(A)). Dans les deux cas, le niveau du bruit de fond est cependant généralement suffisamment bas pour ne pas perturber l'intelligibilité de la parole (seul 5% des églises au bord d'axes routiers importants ont un bruit de fond supérieur à 45 dB(A)).

L'intelligibilité de la parole ne dépend pas que du milieu de transmission (déterminé essentiellement par le bruit de fond et la réverbération) mais également de l'émission du message par un orateur et sa réception par un auditeur. Malgré leur utilisation dans 90% des églises, les installations de sonorisation, souvent mal conçues,

n'apportent qu'une faible amélioration moyenne de l'intelligibilité (RASTI moyen de 0.40 sans, et 0.44 avec sonorisation). L'intelligibilité de la parole dans une église vide et non sonorisée, qui dépend essentiellement de la réverbération (en particulier dans les octaves de 2000 et 1000 Hz), n'est généralement améliorée significativement par une sonorisation que dans le cas d'assez grands édifices (surface au sol de plus de 250 m²), et assez réverbérants ($T_r > 2.5$ s).

3.3 Comparaison internationale

3.3.1 Introduction

On peut se demander si les conclusions de notre analyse statistique s'appliquent strictement à la Suisse ou si elles peuvent être extrapolées aux églises d'autres pays. Autrement dit, dans quelle mesure, les spécificités architecturales, confessionnelles, liturgiques et même musicales d'un pays comme la Suisse déterminent-elles les caractéristiques acoustiques de ses églises? Pour répondre à ces questions, il faut confronter nos résultats de mesurages à ceux obtenus par des études similaires entreprises dans d'autres pays.

Durant la dernière décennie, plusieurs études [4; 32-39] se sont employées à récolter et analyser diverses grandeurs objectives caractérisant les églises tant sur le point architectural (époque de construction), que géométrique (surface, hauteur, volume, etc.) et acoustique (temps de réverbération, intelligibilité, etc.).

Nous avons donc compilé les données de ces divers recensements d'églises afin d'obtenir un ensemble statistiquement significatif. Celui-ci, malgré l'introduction de biais issus des diverses méthodes de mesurages et des éventuelles spécificités locales, devrait permettre d'étudier et de comparer divers paramètres, de façon peut-être plus pertinente que les études individuelles (par exemple pour le style architectural) ou avec une nouvelle approche (en particulier l'analyse des particularités régionales). On s'emploiera tout particulièrement à déterminer les relations entre le temps de réverbération (valeur moyenne et évolution fréquentielle), le volume, le pays, la confession et le style architectural.

3.3.2 Méthodologie

3.3.2.1 Source des données

Les études qui se sont employées à récolter et analyser des grandeurs objectives caractérisant les églises utilisent chacune un ensemble de paramètres différents. Le traitement de ces paramètres diffère par ailleurs d'une étude à l'autre. Ainsi par exemple, la valeur moyenne du temps de réverbération est parfois prise uniquement sur les moyennes fréquences (octaves à 500 et 1000 Hz) ou sur l'ensemble du spectre (125 à 4000 voire 8000 Hz). Il est dès lors difficile de comparer directement les résultats obtenus par ces diverses études.

L'option prise pour effectuer cette analyse est alors de revenir aux données brutes des recensements et de les rassembler dans une seule banque de données. Celle-ci

contient à ce jour des données sur environ 400 églises issues de 9 pays (cf. Tableau 12). La plupart des données utilisées sont tirées de publications spécifiques sur l'acoustique des églises ou générale sur l'acoustique (noté *divers* dans le Tableau 12).

Tableau 12 Origine des données analysées

Pays	Symbole	Eglises	Confession(s)*	Style	Source
Suisse	CH	190	C + R	Oui	[40] + divers
Serbie	YU	56	O	Oui	[34]
Allemagne	D	42	C + R	Oui	[5; 10; 27] + divers
Portugal	P	41	C	Oui	[33]
USA	USA	24	C + R	Non	[4]
Italie	I	14	C	Non	[3; 41] + divers
Grèce	GR	13	O	Non	[32; 42] + divers
Pologne	PL	9	C	Non	[39]
Espagne	E	10	C	Non	[36; 43]

(*) C=Catholique, R=Réformée, O=Orthodoxe

3.3.2.2 Paramètres analysés

Cette analyse comparative ne peut porter que sur les quelques paramètres communs à ces diverses études. (cf. Tableau 13).

Tableau 13 Paramètres analysés.

Paramètre	Remarques
Pays	Cf. Tableau 12
Confession	Catholique, réformé, orthodoxe
Style	Epoque de construction Analyse pour les pays (CH, D, P et YU) avec suffisamment d'églises
Volume	Total de l'église en m ³
Temps de réverbération	Par octave de 125 à 4000 Hz + moyenne des octaves 500+1000 Hz

3.3.3 Analyse

3.3.3.1 Volume

Les diverses études portent sur des églises de tailles variables, les volumes allant de 80 à 700000 m³ (cf. Tableau 14). Le volume moyen de la plupart des églises étudiées est de l'ordre de 5000 m³ (en CH, P, GR et E). Le volume moyen des églises est cependant plus faible en Serbie (1800 m³) mais plus grande aux USA (12722 m³), en Allemagne (17260 m³) et en Pologne (26700 m³). Les églises recensées en Italie sont particulièrement grandes (volume moyen de 85247 m³). Tous pays confondus, le volume moyen, de l'ordre de 10000 m³ avec une forte dispersion (écart type de l'ordre de 40000 m³), est deux fois plus grand que la valeur moyenne des églises recensées en Suisse (4645 m³). Ces chiffres élevés sont essentiellement dus à la prise en compte de quelques églises particulièrement grandes (6 églises avec un volume de plus de 100000 m³). La valeur médiane, de 3379 m³ pour l'ensemble des églises recensées, correspond à la valeur des églises suisses (3372 m³).

Tableau 14 Volume des églises recensées.

Pays	CH	D	P	USA	GR	PL	E	I	YU	Tous
Nb valeurs	190	42	41	23	13	9	10	14	56	398
Maximum (m ³)	54000	130000	18674	114683	22100	97000	9500	700000	20500	700000
Minimum (m ³)	80	1200	299	296	230	6000	3950	2183	115	80
Moyenne (m ³)	4645	17260	5772	12601	6403	26700	5626	85247	1806	9783
Ecart type (m ³)	6046	27539	5161	22923	8237	29641	1762	185531	2959	39489

3.3.3.2 Temps de réverbération en fonction du volume

Pour l'analyse de la relation entre le temps de réverbération avec le volume, nous avons considéré la valeur moyenne des octaves centrées à 500 et 1000 Hz pour des églises vides.

3.3.3.2.1 Dispersion

Les résultats présentent une assez grande dispersion des données pour la relation du temps de réverbération (Tr) avec le volume (R^2 d'environ 0.45 pour l'ensemble des églises ainsi qu'en CH et P; cf. Figure 17). Les églises orthodoxes ($R^2=0.66$ en YU, et 0.85 en GR) présentent une meilleure cohérence entre elles, probablement du fait de la forte unité au niveau du style architectural et de l'aménagement du mobilier liturgique dans cette confession. On observe également une bonne cohérence dans les pays où les églises recensées (principalement catholiques) ont un grand volume moyen ($R^2=0.54$ en D, 0.64 en PL et 0.77 en I). A l'inverse, les églises USA ($R^2=0.08$) et E (0.18) présentent une très forte dispersion. Aux USA, cette faible corrélation entre Tr et volume vient de la coexistence, dans ce pays, d'églises de construction traditionnelle (le temps de réverbération est alors similaire aux autres pays dans ces églises utilisant une liturgie traditionnelle) avec des églises très sèches (pour les nouvelles liturgies s'appuyant essentiellement sur un système de sonorisation). On observe également une nette séparation en Espagne entre 3 églises avec une réverbération assez élevée, les 7 autres étant nettement plus sèches. Toutes ces églises sont pourtant de même style (Mudejar-gothiques) et avec un volume comparable.

3.3.3.2.2 Courbes de régression

Les courbes de régression logarithmique de l'évolution du temps de réverbération avec le volume (soit $Tr = a \cdot \ln(V) - y$, avec a , la pente et y , l'ordonnée à l'origine) sont cohérentes pour la plupart des pays (D, P, CH, I, YU, et GR), avec pour pente (paramètre « a ») une valeur de 0.97 ± 0.08 et pour origine (paramètre « y ») une valeur de 4.7 ± 0.8 s.

Dans ces pays, la valeur de Tr calculée pour un volume typique de 5000 m^3 est de 3.5 ± 0.5 s. Pour un volume moyen ($1000 < V < 10000 \text{ m}^3$) le temps de réverbération

est ainsi plus faible d'environ 1 seconde en GR et I (extrapolation à partir de grands volumes) par rapport à la YU.

Les USA présentent, dans notre échantillon, des églises nettement plus sèches, avec une faible pente ($a = 0.30$) et une faible valeur à l'origine ($y = 0.7$ s). Comme nous l'avons déjà exposé préalablement, aux USA, de nombreuses églises récentes sont sèches car conçues pour obtenir une bonne intelligibilité avec un système de sonorisation.

Au contraire, en PL, le temps de réverbération des (grandes) églises est nettement plus important que la moyenne des églises européennes avec une forte pente ($a = 1.96$) et une forte valeur à l'origine ($y = 12.9$ s). Les raisons de cette réverbération élevée, exposées en détail par Wroblewska [39], sont à chercher dans le style architectural monumental d'après guerre des édifices religieux polonais.

A l'exception des USA (églises très sèches) et de la Pologne (églises très réverbérantes), les courbes de tendance de l'évolution du temps de réverbération avec le volume sont relativement similaires pour la plupart des pays quelle que soit la confession. Il n'y a donc pas de véritable spécificité locale pour l'évolution du temps de réverbération avec le volume.

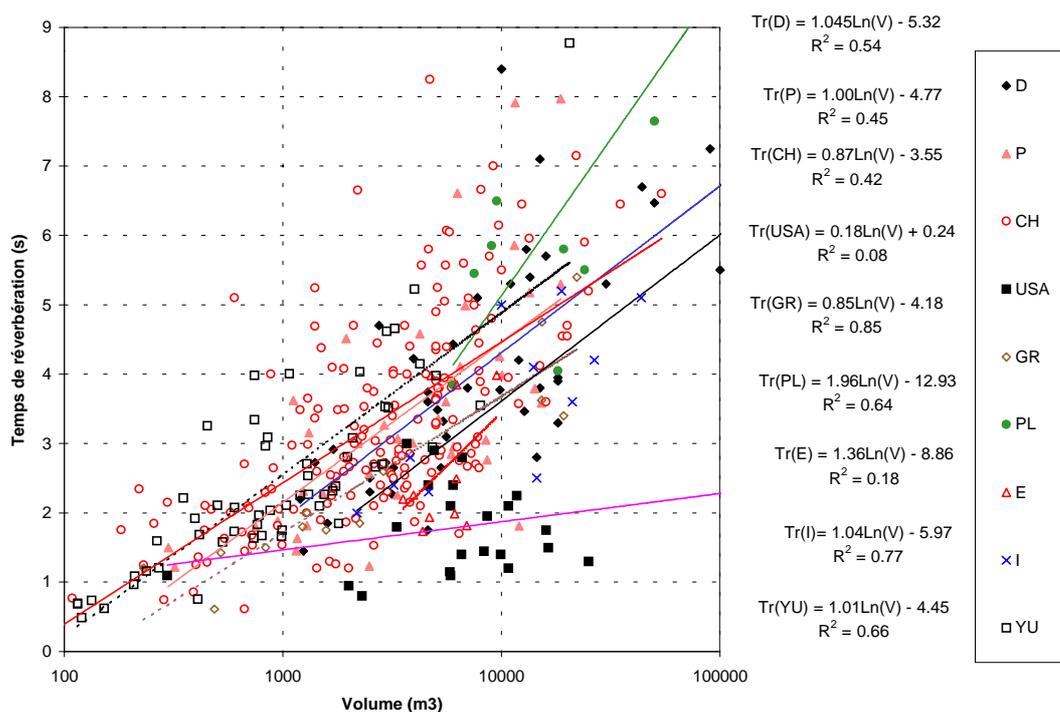


Figure 17 Temps de réverbération (Tr) en fonction du volume pour des églises (vides) de divers pays

3.3.3.3 Temps de réverbération en fonction du style

Le grand nombre d'églises analysées nous a permis de comparer l'évolution du temps de réverbération avec le style architectural de façon plus détaillée que pour les données limitées à la Suisse, en séparant notamment la période romane et gothique. Pour l'analyse des églises par pays, nous n'avons considéré que ceux qui

comprenaient un nombre suffisant d'églises recensées (> 40 d'églises, soit CH, D, P et YU).

Les églises ont été classées selon leur période de construction ou de modification architecturale importante puis regroupées en 5 styles: roman et préroman, gothique, baroque, néoclassique, et moderne.

Tous les styles sont en général bien représentés dans les diverses études (sauf roman et néoclassique en D; néoclassique et moderne au P, cf. Tableau 15).

Tableau 15 Nombre d'églises suivant le style architectural et le pays.

Style/Pays	CH	D	P	YU	Tous pays
Roman	8	-	13	4	29
Gothique	35	8	12	12	81
Baroque	33	7	10	9	64
Néoclassique	50	2	2	15	73
Moderne	64	18	4	16	127
Tous styles	190	35	41	56	373

Tableau 16 Volume moyen suivant le style architectural et le pays.

Style/Pays	CH	D	P	YU	Tous pays
Roman	4507	-	3534	1880	4571
Gothique	6410	22588	6407	1226	18025
Baroque	4876	21180	6049	1873	7689
Néoclassique	5236	10425	15049	1404	5521
Moderne	3579	4782	5813	2560	5482

Les volumes moyens dans certains styles et pays sont par contre très variables et s'éloignent passablement de la valeur moyenne de 5000 m³ (cf. Tableau 16). En D, on a par exemple, plus de 21000 m³ pour le gothique et baroque mais seulement 10425 m³ pour l'époque néoclassique et 4782 m³ pour l'époque moderne. A l'inverse, l'époque néoclassique présente le plus grand volume au P. Enfin les volumes sont relativement faibles pour tous les styles en YU.

Pour comparer de façon relative le temps de réverbération moyen suivant le style, il faut considérer un volume commun. Les valeurs de temps de réverbération ont donc été normalisées, par la méthode dite "complexe" (cf. §3.2.4.2.4), en calculant les paramètres de la régression logarithmique pour chaque ensemble (pays, style), sauf pour les échantillons trop petits (période romane en D, néoclassique au P et D, moderne au P). Ces régressions ont ensuite été utilisées pour évaluer le temps de réverbération normalisé correspondant à la valeur calculée pour chacune de ces équations pour un volume de référence de 5000 m³.

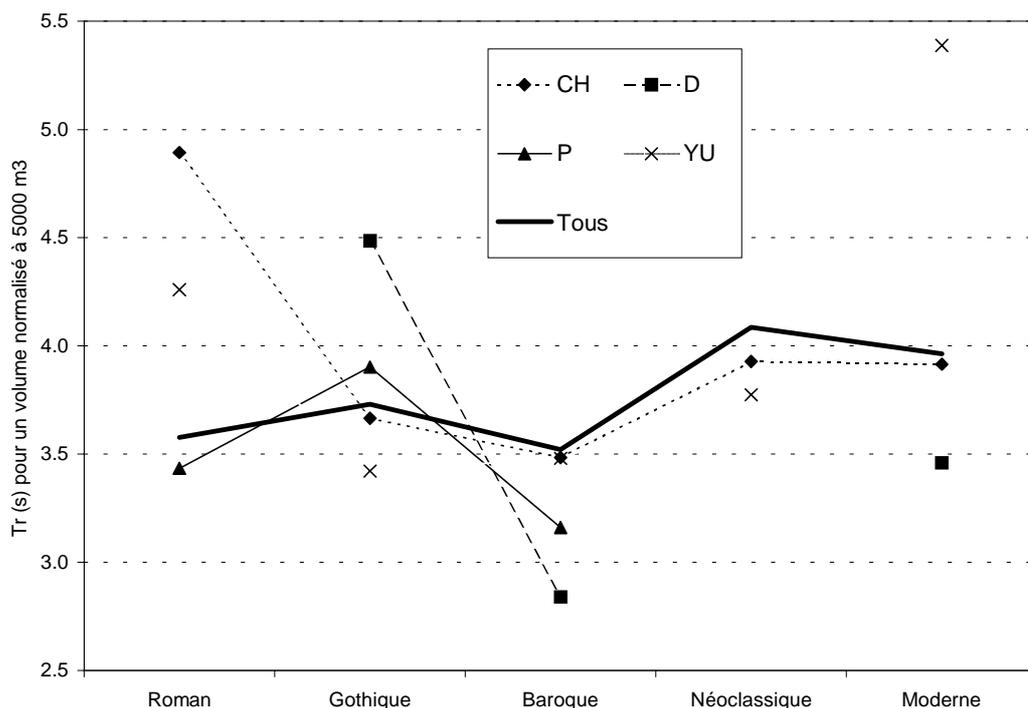


Figure 18 Evolution du temps de réverbération (normalisé pour un volume de 5000 m³) en fonction du style architectural et du pays

La Figure 18 montre une décroissance du temps de réverbération entre l'époque (pré-)romane et gothique en Suisse et en Serbie mais une faible hausse au Portugal. Le passage du gothique au baroque entraîne une baisse généralisée (particulièrement marquée en Allemagne, berceau de la Réforme) qui s'explique par l'évolution de la liturgie amenée par la Réforme et la Contre-Réforme, où l'intelligibilité de la parole devient importante. Le néoclassicisme voit à nouveau une augmentation du temps de réverbération liée à la nostalgie de la piété médiévale et un retour à un sentimentalisme qui s'exprime mieux dans une atmosphère assez réverbérante. L'utilisation importante de la pierre (matériau réfléchissant) au lieu du bois (matériau plus absorbant, utilisé à l'époque baroque) explique également cette évolution. La transition à l'époque moderne a introduit des variations plus contrastées (baisse en P, augmentation notable en YU, peu de changement en D et CH). Les écarts importants, observés au sein d'un même pays, s'expliquent par l'éclatement et la diversité des styles architecturaux des édifices sacrés modernes. Les valeurs plus sèches constatées préalablement aux USA peuvent cependant laisser présager à l'avenir une diminution dans les églises où la liturgie nécessite une excellente intelligibilité de la parole et où la musique est essentiellement sonorifiée. L'évolution liturgique (dans l'histoire et selon les confessions) permet d'expliquer en partie les diverses tendances observées.

3.3.3.4 Evolution fréquentielle du temps de réverbération

Afin d'étudier l'évolution fréquentielle du temps de réverbération, les valeurs par octave (données disponibles pour la plupart des églises) ont été normalisées avec la valeur moyenne (octaves 500 + 1000 Hz). Cela permet d'étudier les différences

relatives entre les bandes d'octaves et d'analyser l'importance sur le timbre des églises de divers paramètres (volume, style, confession et pays).

3.3.3.4.1 Volume

Pour étudier l'influence du volume sur l'évolution fréquentielle du temps de réverbération, cinq catégories de volume (limites à 10000, 5000, 2500 et 1000 m³), avec un nombre d'églises comparable dans chacun d'eux, ont été utilisées. On remarque (cf. Figure 19) que, comme pour les églises suisses, les volumes importants (> 10000 m³) entraînent une baisse importante de la réverbération aux hautes fréquences ($f \geq 2000$ Hz). Cependant, contrairement à ce que l'on avait observé pour notre échantillon suisse, on constate dans ce cas que les faibles volumes ($V < 1000$ m³) ont un temps de réverbération élevé aux basses fréquences ($f \leq 125$ Hz). Cet effet, qui correspond à un timbre chaleureux, peut peut-être s'expliquer par la présence de modes propres parfois encore distincts dans ces conditions¹². On peut enfin remarquer que les temps de réverbération sont plus faibles aux basses fréquences ($f \leq 250$ Hz) pour les volumes de moyenne importance ($1000 \leq V \leq 5000$ m³).

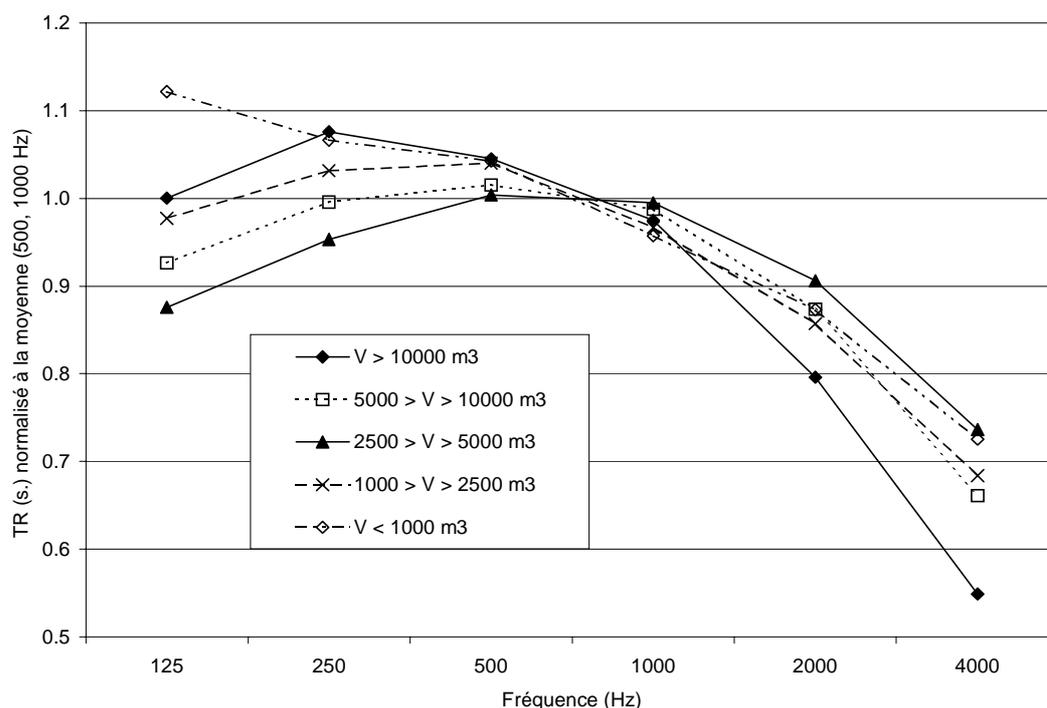


Figure 19 Evolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction du volume

¹² Pour obtenir une répartition satisfaisante des églises suivant les catégories de volume, la limite pour les petites églises dans le cas international (<1000 m³) est inférieure à celle adoptée pour l'échantillon suisse (<1500 m³). Cela peut expliquer pourquoi ce phénomène n'a pas été observé pour l'échantillon suisse.

3.3.3.4.2 Confession

Si on isole la confession (cf. Figure 20), on constate que le temps de réverbération aux hautes fréquences ($f \geq 2000$ Hz) diminue plus rapidement pour les confessions catholique et orthodoxe. Dans le premier cas, cela s'explique par le volume moyen important de ces églises (environ 15000 m^3 contre 4500 m^3 pour les églises réformées). Cette explication ne s'applique pas dans le cas des églises orthodoxes, qui présente la plus forte chute aux hautes fréquences malgré le volume moyen le plus faible (2500 m^3). Le mobilier liturgique utilisé dans les églises orthodoxes, avec souvent de nombreuses tentures, est probablement à l'origine de cette forte absorption aux hautes fréquences. Dans ces églises, on retrouve par contre, une augmentation du temps de réverbération aux basses fréquences déjà constatée dans le cas des églises de faible volume. La caractéristique des églises réformées est, à l'inverse des églises orthodoxes, une baisse moins importante aux hautes fréquences, mais une chute du temps de réverbération aux basses fréquences ($f \leq 250$ Hz) qui favorise l'intelligibilité de la parole. Cette caractéristique, déjà observée pour les églises de moyenne tailles, est probablement encore accentuée, dans ce cas, par la présence régulière, dans ces églises, de nombreuses boiseries, qui absorbent les basses fréquences.

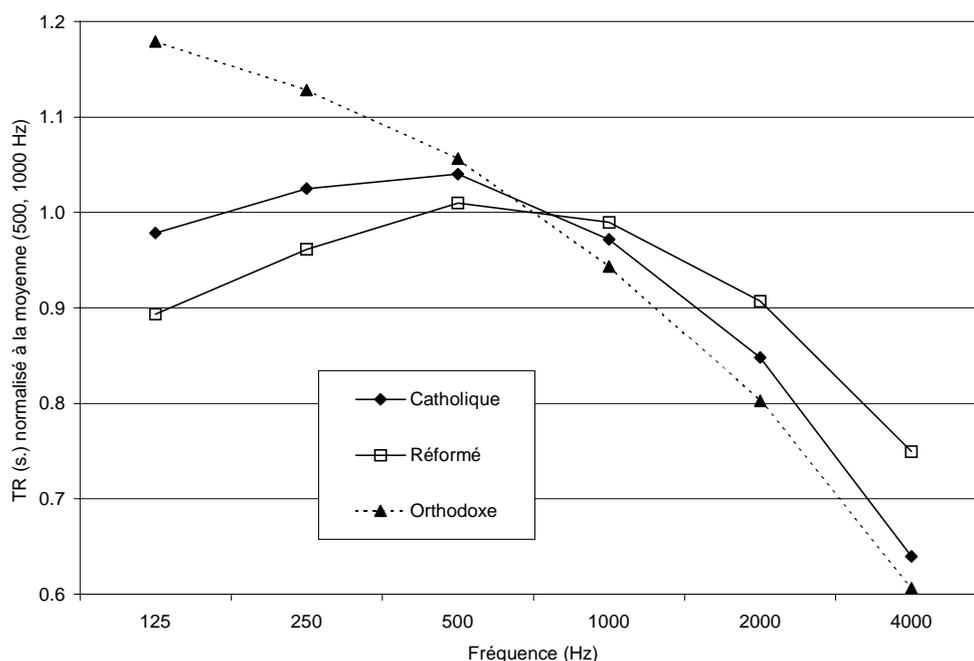


Figure 20 Evolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction de la confession

3.3.3.4.3 Style

L'analyse fréquentielle de la réverbération en fonction du style (cf. Figure 21), met en évidence une diminution aux hautes fréquences ($f \geq 2000$ Hz) pour l'époque romane (et préromane) et dans une moindre mesure, gothique. Ceci est principalement dû au volume moyen important de ces églises (respectivement environ 25500 m^3 et 17700 m^3).

m³ contre 5000 m³ ou moins dans les autres styles). Par ailleurs, dans ces églises, l'utilisation de la pierre pour ces grands espaces peut expliquer les temps de réverbération élevés aux basses fréquences ($f \leq 250$ Hz). Ces caractéristiques fréquentielles marquées des églises romanes leur confèrent donc une acoustique spécifique. Les églises baroques et néoclassiques ont, à l'inverse, une baisse moins importante aux hautes fréquences, mais une chute du temps de réverbération aux basses fréquences ($f \leq 250$ Hz) qui favorise l'intelligibilité [27]. La présence de boiseries dans ces églises contribue à expliquer cette caractéristique, déjà observée pour les églises de moyenne tailles, en particulier réformées. Les églises modernes, qui présentent la même évolution fréquentielle aux moyennes et hautes fréquences que les deux styles précédents, se démarquent par des temps de réverbération plus importants aux basses fréquences. L'utilisation importante de matériaux bruts et rigides (peu absorbants), comme le béton, en est probablement la principale cause.

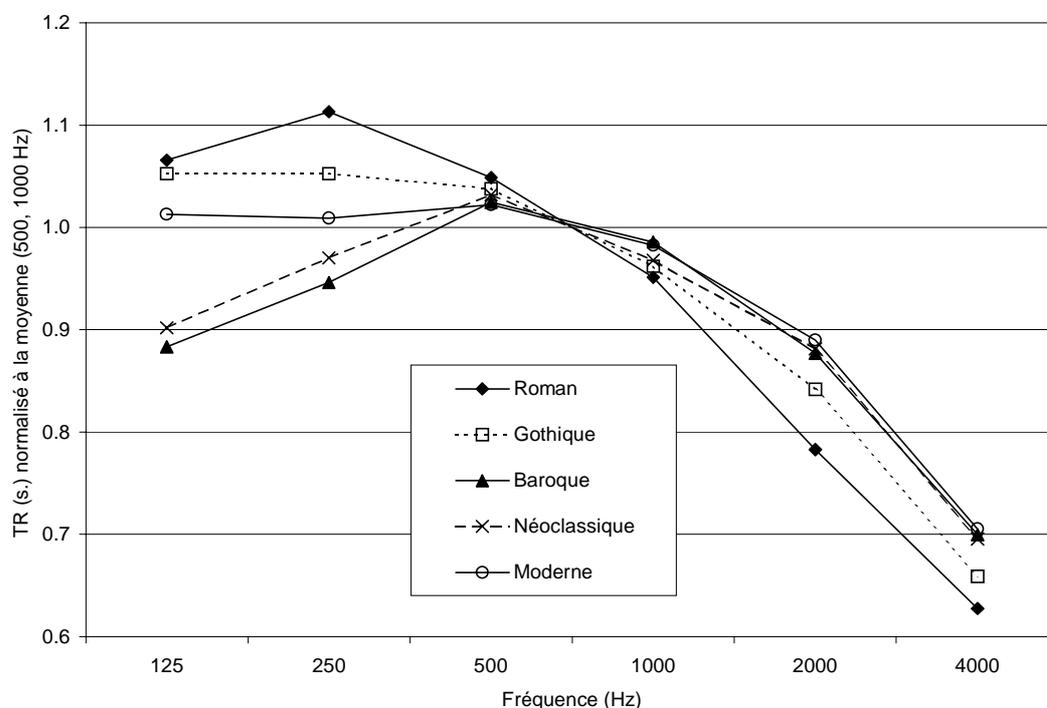


Figure 21 Evolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction du style

3.3.3.4.4 Pays

En étudiant les spécificités régionales (cf. Figure 22), on constate que les églises américaines, souvent pourvues de plafond absorbant efficaces surtout aux moyennes et hautes fréquences, ont des temps de réverbération très élevés aux basses fréquences mais faibles aux hautes fréquences. Les églises serbes et grecques, présentent les mêmes caractéristiques, mais atténuées, et déjà relevées comme une caractéristique des églises orthodoxes. Les églises françaises et polonaises analysées, qui possèdent un très grand volume, présentent une baisse importante aux hautes fréquences. Les autres pays présentent des spectres de temps de réverbération relativement plats avec une faible diminution aux hautes et basses fréquences.

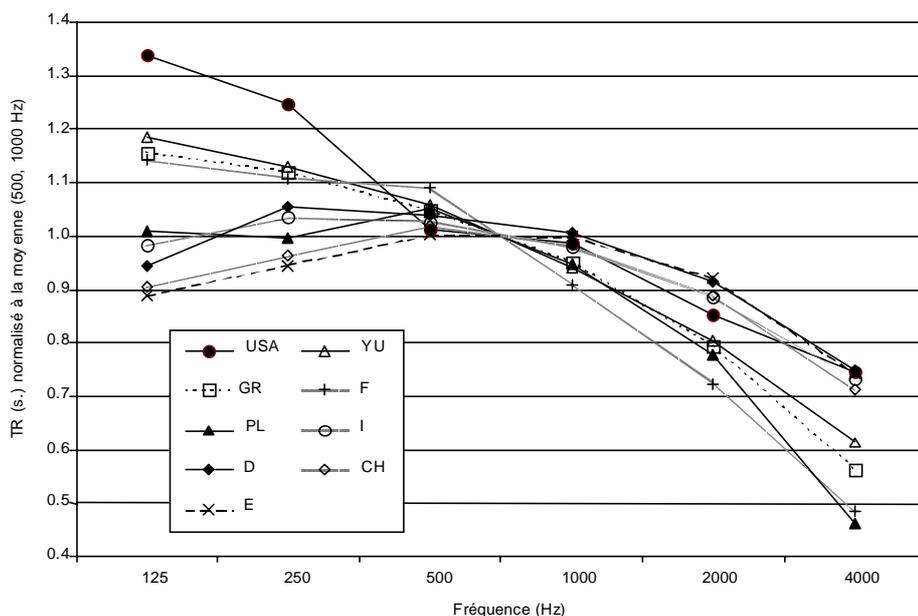


Figure 22 Evolution fréquentielle du temps de réverbération en fonction du pays

3.3.4 synthèse de la comparaison internationale

Cette analyse portant sur presque 400 églises réparties dans 9 pays montre une assez grande dispersion des données pour la relation du temps de réverbération avec le volume (R^2 moyen d'environ 0.45). A l'exception des USA (églises très sèches) et de la Pologne (grandes églises très réverbérantes), les courbes de régression logarithmique entre temps de réverbération et volume sont relativement similaires pour la plupart des pays quelle que soit la confession. Il n'y a donc pas de véritable spécificité locale pour l'évolution du temps de réverbération avec le volume. L'analyse des études comprenant un grand nombre d'églises nous a permis de comparer l'évolution du temps de réverbération avec le style architectural. Une décroissance dans certains pays (CH, YU) peut être observée entre les époques (pré-)romane et gothique. La baisse est généralisée entre le gothique et le baroque pour les temps de réverbération (normalisés pour un volume de 5000 m^3). A l'exception de la Serbie (YU), le néoclassicisme entraîne une augmentation du temps de réverbération alors que la transition à l'époque moderne a introduit des variations plus contrastées. L'évolution liturgique (dans l'histoire et selon les confessions) permet d'expliquer en partie les diverses tendances observées.

L'étude de l'évolution fréquentielle du temps de réverbération montre que les volumes importants ($> 10000 \text{ m}^3$) entraînent une baisse importante de la réverbération aux hautes fréquences ($f \geq 2000 \text{ Hz}$) et une augmentation aux basses fréquences. Cette caractéristique fréquentielle se retrouve plutôt dans les églises romanes et gothiques (et dans une moindre mesure celles de l'époque moderne), dans les édifices orthodoxes et en Pologne. Une baisse du temps de réverbération aux basses fréquences s'observe plutôt dans les églises de moyenne taille, dans les édifices baroques et néoclassiques et plutôt dans les temples réformés.

3.4 Bibliographie du chapitre 3

- [1] **Keibs, L. et Kuhl, W.** (1959). *Zur Akustik der Thomaskirche in Leipzig*. *Acustica*, Vol. 9, pp. 365-370.
- [2] **Lewers, T. H. et Aderson, J. S.** (1984). *Some acoustical properties of St. Paul's cathedral, London*. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 92(2), pp. 285-297.
- [3] **Shankland, R. S. et Shankland, H. K.** (1971). *Acoustics of St. Peter's and Patriarchal Basilicas in Rome*. *Journal of the Acoustical Society of America*, Vol. 50(2), pp. 389-396.
- [4] **Lubman, D. et Wetherill, E. A.** (1985). *Acoustics of worship spaces*. Acoustical Society of America, New York.
- [5] **Zeller, W.** (1960). *Zur raumakustischen Gestaltung von Kirchen. Lärmbekämpfung*, Vol. 4(4), pp. 80-84.
- [6] **Fearn, R. W.** (1975). *Reverberation in Spanish, English, and French churches*. *Journal of Sound and Vibration*, Vol. 43(3), pp. 562-567.
- [7] **Lottermoser, W.** (1952). *Nachhallzeiten in Barockkirchen*. *Acustica*, Vol. 2, pp. 109-111.
- [8] **Angélini, T., Dumas, A. et Santon, F.** (1975). *L'acoustique des trois abbayes cisterciennes de Provence*. *Revue d'acoustique*, Vol. 34, pp. 1-7.
- [9] **Tzekakis, E.** (1979). *Data on the Acoustics of the Byzantine Churches of Thessaloniki*. *Acustica*, Vol. 43, pp. 275-279.
- [10] **Hartmann, G.** (1982). *Über den optimalen Nachhall in kleinen bis mittelgrossen Kirchen*. *Applied acoustics*, Vol. 15, pp. 41-48.
- [11] **Hammad, R. N. S.** (1990). *RASTI measurements in mosques in Amman, Jordan*. *Applied acoustics*, Vol. 30(4), pp. 335-345.
- [12] **Carvalho, A. P. O.** (1994). *Relationships between objective acoustical measures and architectural features in churches*. Wallace Clement Sabine centennial symposium, Cambridge, USA, pp. 311-314.
- [13] **Fasold, W., Sonntag, E. et Winkler, H.** (1987). *Bau- und Raumakustik*. Müller.
- [14] **Beranek, L.** (1996). *Concert and Opera Halls. How they sound*. Acoustical Society of America. Woodbury
- [15] **Knudsen, V. et Harris, C.** (1951). *Acoustical designing in architecture*. John Wiley & Sons, New York.
- [16] **Everest, A.** (1994). *The Master handbook of Acoustics*. 3rd ed TAB books.
- [17] **Eggenschwiler, K.** (1993). *Akustische Probleme in Kirchen* EMPA, Dübendorf.
- [18] **Pierce, A.** (1989). *Acoustics - An introduction to its physical principles and applications*. Acoustical Society of America. Woodbury
- [19] **Pyshin, A., Solovejtchik, L., Tikhomirov, Y., et al.** (2001). *Acoustics of the Smolny Cathedral in St. Petersburg*. *Building Acoustics*, Vol. 8(1), pp. 75-82.
- [20] **Léwy, S.** (2001). *Acoustique industrielle et aéroacoustique*. Hermes, Paris.
- [21] **Jouhaneau, J.** (1997). *Acoustique des salles et sonorisation*. Lavoisier, Paris.
- [22] **Carvalho, A. P. O.** (1994). *Objective Acoustical Analysis of Room Acoustic Measurements in Portuguese Roman Catholic Churches*. NOISE-CON '94, Fort Lauderdale, USA, pp. 805-810.
- [23] **Carvalho, A. P. O.** (1995). *Prediction of Acoustical Measures in Churches*. *Sound & Video Contractor*, Vol. 13(1), pp. 62-68.

- [24] **Carvalho, A. P. O. et Morgado, A. E.** (1996). *Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 100(4), pp. 2707.
- [25] **Carvalho, A. P. O. et Morgado, A. E.** (1997). *Relationships between speech intelligibility and objective acoustical parameters for architectural features in catholic churches*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 101(5), pp. 3051-3052.
- [26] **Carvalho, A. P. O., Morgado, A. E. et Henrique, L.** (1997). *Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches*. Building Acoustics, Vol. 4(1), pp. 1-20.
- [27] **Venzke, G.** (1959). *Raumakustik der Kirchen verschiedener Baustilepochen*. Acustica, Vol. 9, pp. 151-155.
- [28] **Raes, A. C.** (1964). *Isolation sonore et acoustique architecturale*. Chiron, Paris.
- [29] **Houtgast, M. et Steeneken, H.** (1985). *The modulation transfer function in room acoustics*. Brüel & Kjaer Technical Review, Vol. 3, pp. 3-12.
- [30] **Carvalho, A. P. O. et Lencastre, M. M. F.** (1999). *How does RASTI change with Sound-reinforcement Systems in Churches?* 6th ICSV, Copenhagen, pp. 157-164.
- [31] **Kenneth, D. J.** (1989). *Correlation of speech intelligibility tests in reverberant rooms with three predictive algorithm*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 37(12), pp. 1020-9.
- [32] **Trochidis, A.** (1982). *Reverberation time of Byzantine churches of Thessaloniki*. Acustica, Vol. 51, pp. 299-301.
- [33] **Carvalho, A. P. O.** (1994). *Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*. Thesis in Philosophy, University of Florida, USA.
- [34] **Mijic, M.** (1998). *Reverberation time in Serbian orthodox worship spaces*. Joint meeting of 16th ICA and 135th meeting of the Acoustical Society of America, Seattle, USA, pp. 2137-218.
- [35] **Otonello, T., Dassori, E. et Trucco, A.** (1998). *Estimation and analysis of acoustic parameters of ancient churches for concert performances*. Joint meeting of 16th ICA and 135th meeting of the Acoustical Society of America, Seattle, USA, pp. 2145-2146.
- [36] **Sendra, J. J., Zamarreno, T. et Navarro, J.** (1998). *Acoustical behaviour of churches : Gothic-Mudejar churches*. Joint meeting of 16th ICA and 135th meeting of the Acoustical Society of America, Seattle, USA, pp. 2127-2128.
- [37] **Galindo, M., Zamarreno, T., Giron, S., et al.** (1999). *Simulated acoustic field in mudejar-gothic churches*. J. of the Acoust. Society of America, Vol. 105(2), pp. 1045.
- [38] **Magrini A., R. P.** (2000). *Acoustical parameters distribution in historical buildings with a complex geometry*. Inter-noise, Nice, France.
- [39] **Wroblewska, D.** (2000). *Akustyka w architekturze wspolczesnych kosciolow rzymskokatolickich*. Thesis in Architecture, Polytehnika Gdanska, Gdanska.
- [40] **Desarnaulds, V., Eggenschwiler, K. et Bossoney, S.** (1998). *Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen*. DAGA, Zürich, pp. 710-711.
- [41] **Magrini A., R. P.** (2000). *Preliminary investigation on acoustical parameters in churches*. Seventh International Congress on Sound and Vibration, Garmisch-Partenkirchen, Germany, pp. 1653-1660.
- [42] **Tzekakis, E. G.** (1981). *The Acoustics of the early-Christian monuments of Thessaloniki*. Archives of Acoustics, Vol. 6(1), pp. 3-12.
- [43] **Galindo, M., Zamarreno, T. et Giron, S.** (2000). *Speech intelligibility in Mudejar-gothic churches*. Acustica, Vol. 86, pp. 381-384.

4. DISPOSITIFS ACOUSTIQUES DANS LES ÉGLISES

4.1 Introduction

4.1.1 Une liturgie adaptée à l'acoustique ?

Il est difficile, à partir des mesurages objectifs des conditions acoustiques actuelles des églises, de trancher sur l'origine des influences mutuelles observées dans le domaine de la liturgie et de l'acoustique. L'évolution de la liturgie a-t-elle suivi celle de l'acoustique des églises? L'acousticien Lubman [1-3], soutient ainsi par exemple, sur la base de la théorie de l'information¹, que le choix du modèle basilical à l'époque constantinienne, effectué pour des raisons pratiques, a profondément influencé le type de liturgie qui pouvait s'y dérouler. L'utilisation du chant monodique (et en particulier grégorien) ainsi que le peu de communication basée sur l'intelligibilité de la parole entre les participants (clergé et laïcs) seraient, selon lui, les conséquences logiques de ce type d'architecture. Cette théorie est cependant critiquable sur plusieurs points². La question de l'origine des évolutions observées peut porter non seulement sur la liturgie en général et son évolution entre les pôles d'intelligibilité et d'affectivité, mais également plus précisément sur l'influence entre l'acoustique des églises et l'évolution du style déclamatoire et de la musique sacrée. On peut affirmer avec certitude que les prédicateurs et les lecteurs ont, avant l'avènement de la sonorisation, toujours su adapter leur voix à l'acoustique réverbérante des églises. En effet, Green [4], qui a étudié en détail la déclamation baroque, a montré comment la rhétorique et l'éloquence de la parole déclamée à cette époque adaptaient subtilement la rythmique, les accents d'intensité, de hauteur, la ponctuation pour se faire non seulement comprendre, mais également, comme lieu d'épiphanie pour manifester et révéler la présence divine cachée.

4.1.2 Influence de l'acoustique sur la musique sacrée

L'analyse de l'histoire de la musique sacrée montre quant à elle plus clairement une adaptation aux conditions acoustiques des églises à travers les siècles. Comme le note Thurston [5], "même une étude superficielle montre que les compositeurs du

¹ Lubman a tenté de démontrer [3], comment, pour toute communication, il existe un type de codage optimum qui maximise le transfert d'information. Ainsi la parole, dont le signal varie rapidement dans le temps, nécessite un milieu temporel non dispersif qui correspond, au niveau acoustique, à un faible temps de réverbération. Au contraire, la musique monodique du premier millénaire, qui est relativement lente, est parfaitement adaptée aux églises réverbérantes qui constituent un milieu temporel dispersif. Les syllabes chantées, utilisant une bande fréquentielle nettement plus étroite que les syllabes parlées, correspondent mieux à un codage non dispersif au niveau du spectre. Le chant grégorien est ainsi vu comme une forme de codage adaptée à ce type d'acoustique.

² La parole et non le chant était cependant bien le moyen utilisé dans les applications profanes (par exemple pour la justice) qui ont bénéficié du style basilical avant l'édit de Milan (313). Par ailleurs, la majorité des églises du premier siècle étaient de petites ou moyenne taille avec une acoustique pas particulièrement réverbérante. Les cathédrales ne constituent qu'un exemple particulier d'église de cette époque. Leur grandeur et leur beauté leur ont permis de mieux traverser les siècles.

passé étaient très attentifs aux effets sur leur musique de l'ambiance dans laquelle elle était jouée, et ils modelaient délibérément leur musique par rapport à elle". Plusieurs auteurs [6-11] se sont penchés sur les relations entre la musique et le milieu acoustique qui la voit naître. Le survol historique, présenté au deuxième chapitre, nous a effectivement montré, à travers divers exemples, comment la musique sacrée s'est adaptée au cours des siècles à l'évolution de l'acoustique des églises (cf. Figure 1, Figure 2 et Figure 3). Le chant grégorien a vu le jour dans les églises réverbérantes du Moyen Age, alors que les psaumes huguenots et les fugues baroques se sont adaptées à l'acoustique sèche des premiers temples réformés. Le classicisme rationaliste s'est épanoui dans le même type d'acoustique, favorable à la parole, alors que le romantisme, désirant exprimer et susciter l'émotion et le sentiment religieux des fidèles, a profité de l'augmentation de la réverbération durant l'époque néoclassique. Enfin l'époque moderne, héritière de ce riche legs musical et architectural, cherche encore son mode d'expression entre le passé et l'avenir, dans des églises aux caractéristiques acoustiques très variées. Comme l'a mis en évidence Winckel [6], l'adaptation de la musique à l'acoustique ne porte pas seulement sur l'évolution de la réverbération des églises, mais également sur l'organisation spatiale³ et les conditions de diffusion, qui sont particulièrement importantes au niveau de l'écoute musicale.

L'adaptation entre musique sacrée et acoustique n'est cependant pas unilatérale. Comme les compositeurs ont essayé de s'adapter aux églises de leurs temps, de leur côté "les architectes ont tenté de concilier forme et fonction en concevant leurs édifices selon les besoins musico-acoustiques particuliers" de leur époque [11].



Figure 1 *Eglise St-Marc de Venise, dont les nombreuses galeries contribuèrent au développement de la polychoralité, notamment avec Gabrieli et Monteverdi*

³ On rappellera ainsi par exemple l'importance de St-Marc pour le développement de la polychoralité.



Figure 2 Heinrich Schütz dans la chapelle du palais de Dresde qui avait, selon lui une acoustique « de grotte ». Il composa plusieurs œuvres en tenant compte de ces conditions acoustiques [11]



Figure 3 L'église St-Thomas de Leipzig (avant la restauration de 1885) fut une des églises pour laquelle J.-S. Bach composa de nombreuses œuvres. Le temps de réverbération y était assez court (env. 1.6 s) et permettait une grande clarté d'exécution [7; 8; 11]

4.1.3 Une acoustique adaptée à la liturgie?

Si l'on revient à la question plus générale des influences réciproques entre liturgie et acoustique, force est de reconnaître que ce sont plutôt les édifices religieux qui se sont logiquement adaptés aux changements culturels. L'église est faite pour la célébration et non la célébration pour l'église ! Le survol historique ne nous a-t-il pas montré à plusieurs reprises comment les églises ont été construites ou transformées en fonction des besoins liturgiques et de leur évolution ? Il semble ainsi peu plausible que la liturgie se soit réellement pliée aux contraintes acoustiques des églises, comme l'affirme Lubman. L'étude des dispositifs mis en place intentionnellement dans les églises pour en améliorer l'acoustique apporte des éléments indiscutables sur les influences directes de la liturgie et de ses besoins sur l'acoustique dans les églises.

Nous présenterons, dans ce chapitre, l'analyse de deux dispositifs acoustiques utilisés dans les églises, en évoquant d'une part leur évolution historique et en étudiant d'autre part scientifiquement leur efficacité. L'un de ces dispositifs, les vases acoustiques, fut utilisé, surtout au Moyen Age, pour améliorer les conditions pour la musique. Les chaires et les abat-voix, employés pour permettre de favoriser l'intelligibilité de la parole, est l'autre moyen, nettement plus connu et répandu, qui sera étudié.

4.2 Vases acoustiques

4.2.1 Aspect historique

Du XI^e au XVI^e siècle, certaines églises furent dotées de pots encastrés dans les murs ou dans les voûtes. La plupart de ces « vases acoustiques » (cf. Figure 4) se trouvent dans des églises gothiques et romanes.

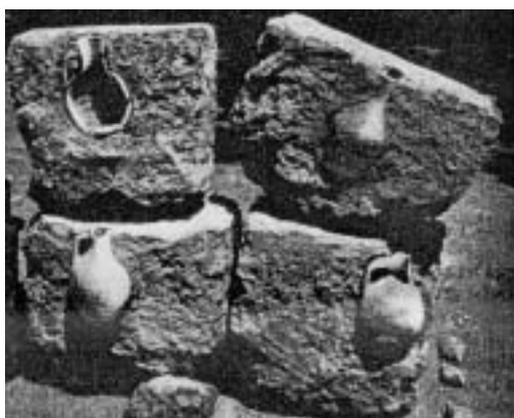


Figure 4 Vases acoustiques encastrés dans des blocs de pierre [12]

Bien que déjà décrite par Thorschmid en 1725 [13], l'utilisation des vases acoustiques dans les églises ne donna lieu qu'à des publications marginales jusqu'au milieu du XIX^e siècle, notamment de la part de Rahn [14-17]. A cette époque, divers travaux de transformation ou restauration permettent de mettre au jour quelques vases acoustiques. Un engouement s'empare alors de toute l'Europe pour redécouvrir de tels vases dans des églises en France [18; 19], en Scandinavie [20; 21], en Allemagne [22], en Angleterre [23; 24], en Suisse (cf. Annexe B) ainsi qu'en Italie [25] et dans les pays de l'est [26; 27]. Mais c'est seulement dans la deuxième moitié du XX^e siècle que ces vases acoustiques firent l'objet des premières recherches scientifiques [12; 21; 27-31].

Les nombreux pots acoustiques répertoriés alors soulèvent plusieurs questions. D'où vient cette pratique destinée essentiellement aux églises ? La mise en place de ces poteries suit-elle des règles précises ? Y a-t-il en particulier des spécificités quant à la localisation géographique, la forme, la période et la position de ces vases ? Quelle est l'utilité attribuée et réelle de ces vases ?

4.2.1.1 Les echea, ancêtres des vases acoustiques ?

Durant l'antiquité, pour des raisons acoustiques, des poteries furent enterrées et des vases en airain (plus rarement, en terre cuite), appelés echea, furent disposés dans des cellules pratiquées sous les gradins de la cavea de certains théâtres et temples.

Ces dispositifs, aujourd'hui disparus⁴, contribuèrent à améliorer l'acoustique des amphithéâtres gréco-romains, dont la réputation reste aujourd'hui excellente. Il est fort probable que les architectes du Moyen Age se sont inspirés de ce savoir antique, décrit par des auteurs célèbres comme Aristote⁵ ou Vitruve⁶, dont les ouvrages furent maintes fois copiés au cours du Moyen Age. Mais aucune preuve d'une quelconque continuité de la tradition antique n'a, à ce jour, pu être mise en évidence. Il n'a pas été découvert, en Europe, de monuments dotés de vases acoustiques antérieurs au XI^e siècle, qui auraient pu assurer une transition avec l'époque paléochrétienne. Plusieurs spécimens de poteries encastées, dont divers indices suggèrent clairement la fonction acoustique, ont cependant été mis en évidence en Egypte, dans des monastères chrétiens du V^e siècle.



Figure 5 Essai de reproduction d'une planche représentant un echea [30]

Il faut néanmoins faire attention et distinguer les vases gréco-romains des poteries du Moyen Age. Partant du même objectif (amplifier la voix), leur mise en place et leur mode de fonctionnement sont en effet assez différents. Les echea, disposés dans des niches ouvertes de théâtres en plein air (cf. Figure 5) visent à allonger la réverbération qui est très faible, alors que les vases acoustiques, emmurés dans des églises très réverbérantes, devaient éclaircir la voix.

On peut avancer certaines hypothèses pour comprendre d'où viennent les vases acoustiques et comment la connaissance de leur utilisation s'est transmise. A l'époque de l'apparition des vases dans les églises au XI^e siècle, l'Europe finit d'être harcelée par les invasions barbares, alors que dans l'Orient byzantin et dans le monde musulman l'architecture se développe de manière admirable en utilisant

⁴ A part les vases en terre cuite enfouis dans le sol du théâtre de Nora en Sardaigne et le vase du trésor de Vix, il ne semble pas que l'on soit en mesure d'indiquer un seul monument grec ou romain comportant des vases en place

⁵ Aristote décrit, dans son ouvrage *Problemata* [32], l'utilisation de pots à des fins acoustiques. Ces derniers étaient enterrés et donnaient plus de résonance à la construction. Une pratique similaire semble avoir été utilisée au Moyen Age. Des poteries ont été retrouvées enfouies sous le dallage du chœur de certaines églises. Ces vases auraient eu pour effet de résonner sous les pas du clergé et d'amplifier le bruit des crosses et des hampes, au cours des cérémonies du culte.

⁶ Vitruve consacre un chapitre de son ouvrage *De Architectura* aux vases acoustiques [33], où il décrit comment les vases devaient être fabriqués : « On fait des vases d'airain en rapport avec la grandeur du théâtre, et on les fabrique de façon que, quand on les frappe, ils rendent, l'un le son de la quarte, l'autre le son de la quinte,... » et comment il fallait les disposer pour obtenir le résultat escompté : « Ces vases doivent être placés, suivant les règles de la musique, dans des niches pratiquées entre les sièges du théâtre, et de manière qu'ils ne touchent point aux murs, mais qu'ils aient tout autour et par-dessus un espace vide... Au moyen de cette disposition, la voix, qui viendra de la scène comme d'un centre, s'étendra en rond, frappera dans les cavités des vases, et en sera rendue plus forte et plus claire... ».

parfois des pots acoustiques [34]. L'art roman est certainement un mélange des architectures antiques qui avaient fleuri sur le sol européen et des architectures de l'ensemble de l'empire grec et de l'Asie⁷. La plupart des églises bâties alors sont du type de la basilique latine, parfois des imitations de plans byzantins. La transmission de l'usage des vases acoustiques pourrait s'être opérée via l'architecture byzantine. La découverte de vases acoustiques dans des mosquées en Hongrie et dans des bains turcs tend à donner raison à cette théorie. Au Moyen Age, on peut imaginer plusieurs voies de transmission par lesquelles l'utilisation des vases acoustiques aurait pu transiter de l'Asie vers l'Europe. Ces dernières correspondent généralement aux voies commerciales. La voie byzantine circule par Venise vers le Nord jusqu'au Rhin et au sud jusqu'à l'océan. L'Asie nous atteint également par le Nord, une ligne de commerce remontait les fleuves tributaires de la mer Noire jusqu'aux confins des régions scandinaves. Enfin, mentionnons le Rhône qui est une autre voie possible.

4.2.1.2 Localisation géographique des vases

4.2.1.2.1 En Europe

Les vases acoustiques étaient utilisés à peu près dans toute l'Europe⁸ (cf. Figure 6). On remarque que les provinces du Rhin, profondément byzantines, sont des régions riches en vases acoustiques. La Normandie, également bien dotée en vases acoustiques, fut par contre en dehors des grands courants et n'a pratiquement pas subi l'influence de l'Orient. L'irruption des vases acoustiques en Europe dès le XI^e siècle reste donc partiellement mystérieuse.

La disparition des vases acoustiques et le subit arrêt de leur utilisation au XVII^e siècle est aussi inexplicable que leur apparition. Il semble étrange qu'après six siècles les architectes et maîtres d'œuvre aient soudainement conclu à l'inutilité des vases et aient cessé de les encaster dans les parois des églises.



Figure 6 Carte de l'Europe centrale avec l'emplacement d'églises comportant des vases [28]

⁷ « Ainsi se forma vers le XI^e siècle un art où l'on saisit à la fois les initiatives provinciales et toutes les influences qu'apportent les courants émanant de l'Asie. L'art roman est bien celui d'une société qui renaît et puise au fond des vieilles civilisations qui l'entourent. Il emprunte les principes, mais dans l'application il montre une verve originale, un charme de naïveté qui attache » [35].

⁸ Floriot [28] puis Loerincik [12] ont recensé les principaux sites européens comportant des vases acoustiques.

4.2.1.2.2 En Suisse

On dénombre au total 21 églises en Suisse comportant des poteries acoustiques⁹. Les édifices concernés, qui datent du XI^e au XVII^e siècle, sont principalement situés dans le nord et l'ouest de la Suisse. Ces églises et leurs vases sont présentés en annexe B.

4.2.1.2.3 Recensement dans le canton de Vaud

Afin d'étudier les caractéristiques acoustiques des vases acoustiques utilisés dans les églises Suisse, nous avons fait effectuer un recensement¹⁰ des vases se trouvant dans les chœurs, construits entre le XIII^e et le XIV^e siècle, de quatre églises situées dans le canton de Vaud [37]. Nous ne présenterons ci-après que les deux églises de Syens et Villette, qui ont fait l'objet de mesurages acoustiques. La présentation des deux autres églises (Granges-près-Marnand et Grandson) et de leurs vases se trouve en annexe B.

4.2.1.2.3.1 Eglise de Syens

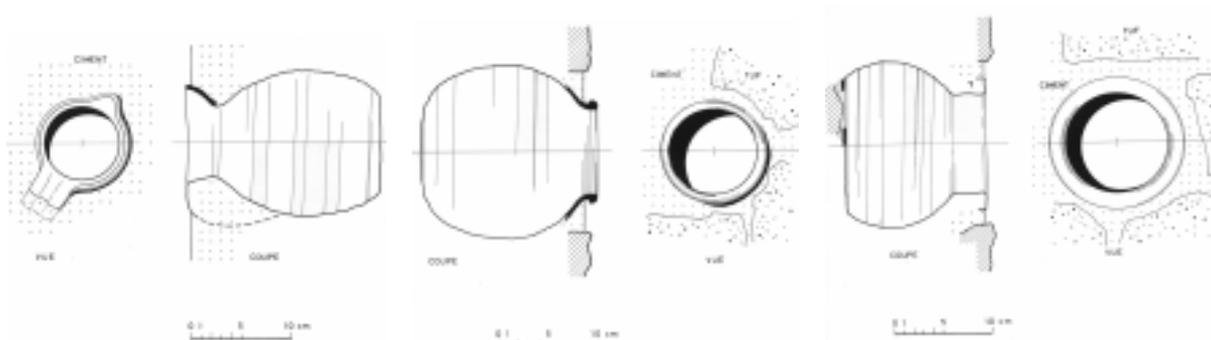


Figure 7 Relevé de 3 des vases encastrés dans la voûte de l'église de Syens

L'église paroissiale de Syens possède une nef de 1787 et un chœur datant du XIII^e siècle, construit en tuf, dans lequel on a découvert, lors de la restauration de 1897, cinq vases en argile. A cette époque, un des pots a été dégagé de la maçonnerie, mais il a été perdu. Il reste aujourd'hui trois pots utilitaires en céramique au nord (hauteur de 14.2 à 17.6 cm, orifice de 8.6 à 10.2 cm) et une cruche au sud (cf. Figure 7). A une époque inconnue, ces pots ont été fermés avec des fragments de brique. Trois vases sont en bon état, le dernier n'a pas de fond.

⁹ Ces églises sont décrites par Stöckli [36] et Loerincik [12].

¹⁰ Ce recensement a été effectué par Stöckli de l'Atelier d'Archéologie de Moudon [37].

4.2.1.2.3.2 *Eglise de Villette*

L'église paroissiale Saint-Saturnin de Villette possède un chœur datant des XIII^e-XIV^e siècles dans lequel cinq vases acoustiques ont été découverts par Albert Naef lors de la restauration de 1927 (cf. Figure 8). L'un d'eux a été extrait à cette époque pour servir de modèle à l'ameublement du château de Chillon. Parmi les quatre vases encore en place, qui ont chacun une forme spécifique, trois sont en bon état, le quatrième est fêlé (cf. Figure 9).



Figure 8 Ouvertures des vases dans l'église de Villette

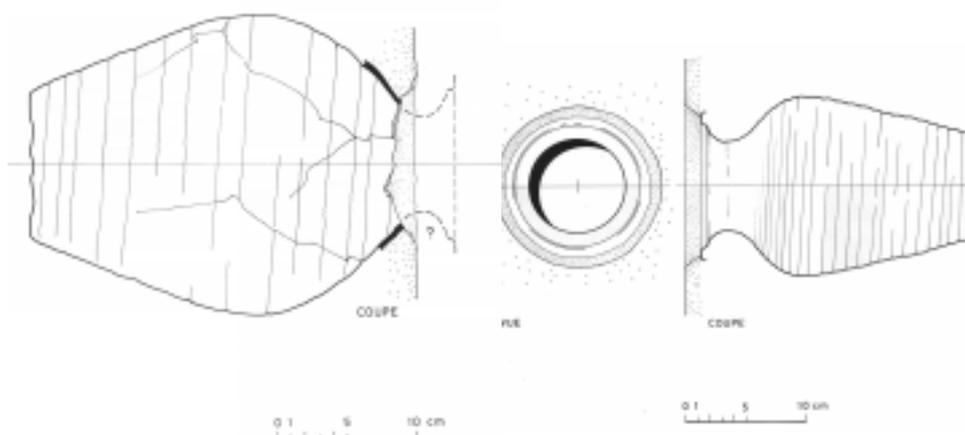


Figure 9 Vases acoustiques de l'église de Villette

4.2.1.2.4 Disposition des vases dans les églises

Il ne semble pas que les architectes du Moyen Age aient suivi une méthodologie très précise pour choisir le positionnement des vases. On peut cependant relever quelques principes qui semblent, le plus souvent, respectés. Les pots sont dispersés dans la partie supérieure de l'église, dans les voûtes ou dans le haut des murs, en particulier près des angles ou autour des fenêtres, et souvent dans des environnements en tuf (matériau acoustiquement absorbant). Ils sont soit alignés,

soit disposés suivant des formes géométriques simples (par ex. en zig-zag). De plus, on les trouve plus facilement dans certaines parties des églises, vers le chœur (souvent à la hauteur du célébrant ou des chanteurs), face à la chaire et au-dessus de la tribune. Les vases acoustiques sont toujours encastrés dans les murs ou voûtes avec l'orifice ouvert visible (éventuellement intégré à la décoration), ou protégé par un motif perforé en bois (en particulier en Scandinavie), et placé dans le plan du mur. Dans certains cas, des vases furent mis en place non pas lors de la construction, mais ajoutés par la suite. Le nombre de vases mis en place dans une église est en moyenne d'une vingtaine, mais il peut varier de 5 (Villette) à 83 (à Oberwinterthur, cf. Figure 10) et il est en général proportionnel au volume couvert.

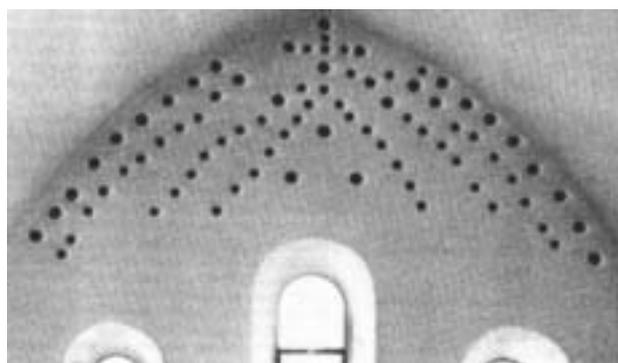


Figure 10 Position des vases acoustiques dans l'église d'Oberwinterthur [38]

4.2.1.2.5 Forme des vases

L'examen de documents bibliographiques [22; 28; 30; 39], ainsi que des relevés effectués dans plusieurs églises [37] nous apprennent que des vases de formes très différentes ont été utilisés dans les églises du Moyen Age (cf. Figure 11). On y trouve généralement des vases, des cruches, des pots avec ou sans anses, parfois usés, fêlés ou cassés. Ces formes communes tendent à prouver que, dans la plupart des cas, les poteries utilisées étaient initialement destinées à d'autres usages. Ces pots utilitaires sont généralement en céramique à pâte rouge ou grise, parfois vernissés. Les poteries d'une même église présentent souvent des formes variées (par exemple deux petits vases à col étroit, un grand vase ventru, un vase bouteille et une grande cruche pour les cinq pots de l'église de Villette). Généralement, les pots ont une hauteur d'environ 10 à 25 cm avec un orifice de 7 à 10 cm. Une dépendance de la forme en fonction de la région est observée, les vases trouvés en Suisse étant différents de ceux d'Allemagne, d'Angleterre, de Scandinavie ou de France.

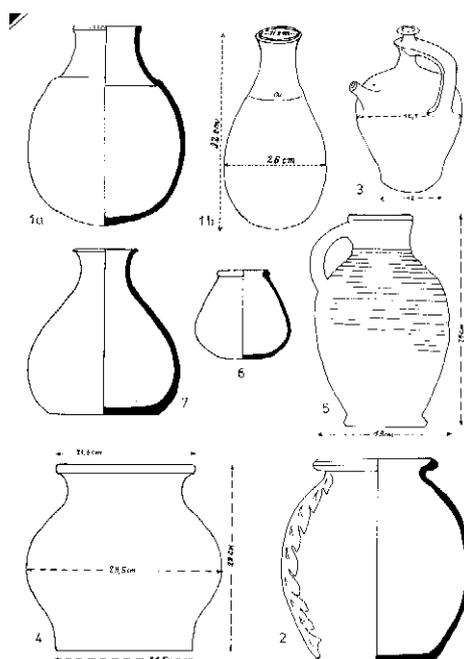


Figure 11 Diverses formes de vases acoustiques [40]

4.2.1.2.6 Rôle des vases

4.2.1.2.6.1 Fonctions des trous ou des poteries

Dans de nombreuses églises, on peut observer des ouvertures dans les parois ou les voûtes. Ces ouvertures ne correspondent cependant pas toujours à la présence de vases acoustiques. Diverses fonctions ont été attribuées à ces trous¹¹ qui ne contiennent pas de vases.

Des poteries ont été utilisées à des fins diverses dans les églises du Moyen Age. Mentionnons ici les pots, totalement noyés dans la maçonnerie, destinés à alléger les voûtes. Ces derniers, contrairement aux vases acoustiques, ne peuvent avoir de répercussion sur l'acoustique. Cette technique remontant aux romains peut laisser penser que les vases acoustiques avaient la même fonction.

Certains auteurs ont vu dans ces pots une technique pour évacuer l'humidité. Cependant, comme le remarque Stöckli [36], les vases seraient plus efficaces, dans ce cas, s'ils étaient placés dans la partie inférieure des parois, ce qui n'a jamais été remarqué. D'autre part, la seule ouverture qu'ils possèdent est visible et il n'y a aucun moyen pour l'eau de s'écouler du mur dans le vase. Mis à part les deux interprétations du rôle des vases citées ci-dessus, de nombreuses autres hypothèses ont été formulées au sujet de leur utilité¹².

¹¹ Ventilation, écoulement, sacarium, fixation de luminaires ou d'échafaudages, passage des cordes des cloches ou pour monter des objets, orgues à écho, lâcher de colombes à Pentecôte (dès le XIV^e siècle), clef de voûte percée (dès le XIII^e siècle).

¹² Vases percés pour éviter le frottement des cordes des cloches, joints de dilatation, système d'accrochage, vases chaufferettes ou système de chauffage, niche, reliquaire.

4.2.1.2.6.2 *Rôles attribués aux vases acoustiques au cours de l'histoire*

Quelques textes historiques, rapportés notamment par Floriot [28], mentionnent les vases acoustiques et mettent en évidence le rôle attribué aux vases acoustiques : ils étaient censés principalement amplifier et faire résonner la voix.

- On peut lire dans la chronique de 1432 du couvent des Célestins de Metz, rapporté par E. de Bouteiller « En cest année dessus dit, ou mois d'aoust, le vigile de l'Assumption Nostre-Dame, aprez ceu que frère Ode le Roy, priour de seans, fuit retourné du chapitre gral de dessus dit, il fit ordonnoit de mettre les pots au cuer de leglise de seans, portant qu'il avoit vu altepart en aucune église et pensant **qu'il y fesoit milleur chanter et que il y resonneroit plus fort**. Et y furet mis tuis en ung jour on point tant douvrier quil souffisoit. Mais ie ne seay si on chante miez que on ne fasoit. Et cest une chose à croire que lez murs furet bien merveillez que y soit fait. Et dixent aucune foix qui valeoit mieux quil furet aprésent dehors, portant que bon ponsoyt il seroit là mis pour en prendre et jouyr à plaisir aux foulx. ».
- Les comptes du diocèse de la Côte d'or mentionnent en 1616 : « Payé 24 sols au tupinier (potier) pour trois douzaines de petits pots pour mettre dans la muraille du chœur, propres **à faire résonner la voix** ».
- En 1587, on monta des ponts dans le temple de Lutry afin que le maçon Jacques Bodmer puisse « fayre des pertuis ès vottes du templ, **afin que la parole de Dieur qui y est annoncée soit tant plus facilement entendue** »
- En 1665, l'Abbé de Saint-Léger écrivait que « De cinquante choristes que le public entretient dedans telle maison, quelquefois ils ne seront pas six à l'office, les chœurs sont accommodés avec des pots dans la voûte et dans les murailles, **de sorte que six voix y feront autant de bruit que quarante ailleurs**. ».
- Les comptes de fabrique de l'église de Trégourez font mention d'une commande datant de 1666, de dix pots à mettre dans les murs de l'église **pour faire écho**.
- En 1869, Viollet-le-Duc affirmait [41] que « Les architectes du Moyen Age ont placé parfois à l'intérieur des édifices religieux, dans les parements de murs, des pots acoustiques de terre cuite, probablement **pour augmenter la sonorité des vaisseaux** ».
- Enfin en 1980, l'acousticien Thfoin [10] déclarait que « Les recherches se poursuivront désormais et malgré les détracteurs. On sait aujourd'hui de façon sûre que ces dispositifs **améliorent l'acoustique d'une salle et surtout l'intelligibilité de la parole**. Les modifications du rite, des chants et de la place du prédicateur atténuent leur efficacité aujourd'hui. »

4.2.1.2.7 Polémique sur l'utilité des vases

L'utilité de ces vases acoustiques a cependant souvent été mise en doute. En fait le débat sur leur efficacité n'est pas nouveau. On trouve à toute époque dans les témoignages historiques des avis divergents sur le sujet. Ainsi la chronique du couvent des Célestins de Metz (1432) met déjà en opposition le prier qui est persuadé de l'amélioration que va apporter l'installation des vases et le chroniqueur qui tourne en dérision ce procédé.

Comme nous l'avons vu dans les citations précédentes, on trouve à toutes époques d'ardents défenseurs de ce procédé. Mais au cours des siècles les détracteurs ne manquèrent pas non plus. Ainsi le chanoine Bourbon, affirme en 1898 dans le courrier de Genève que « *Les moines et les chapitres redoublaient d'efforts pour chanter harmonieusement les louanges de Dieu. On voulut charger les voûtes mêmes de l'église de répéter les suaves accents du chant sacré. A cette fin, on les a armées de pots de résonance qui eurent pour un temps un grand succès. Cependant, les principes de l'acoustique ne se sont pas pliés à cette ingénieuse invention. L'expérience n'a pas tardé à prouver que ces pots de résonance étaient des meubles inutiles.* » [42]. Les conclusions que l'on peut tirer de ces opinions variées portent plus sur le rôle attribué aux vases que sur leur efficacité réelle. En fait, ni leur utilité ni leur inefficacité n'a été jusqu'à ce siècle formellement démontrée.

Si les vases étaient réellement efficaces, on peut se demander pourquoi on ne les trouve pas de manière plus systématique dans les églises du Moyen Age et pourquoi leur utilisation a soudainement été arrêtée ? S'ils sont inefficaces, on peut se demander alors pourquoi les architectes se sont obstinés à poser ces vases pendant plus de six siècles ? Car nous devons bien reconnaître avec Viollet-le-Duc [41] que « *Efficace ou non, il est certain que ce mode de sonorité était admis pendant le Moyen Age.* ».

Il est probable que l'emploi des vases acoustiques reposait plus sur une tradition empirique que sur une réelle connaissance des lois de l'acoustique. En effet, de récents travaux scientifiques ont montré que l'utilisation et l'optimisation de ces derniers sont délicates, et qu'elles font intervenir de nombreux paramètres. On peut cependant concevoir que les connaissances empiriques (peut-être jalousement gardées) ou le hasard aient parfois conduit à améliorer l'acoustique de certaines églises par l'insertion de pots acoustiques. Dans bien d'autres cas, l'utilisation inappropriée de vases n'a pu entraîner qu'une amélioration imperceptible de l'acoustique. Ceci expliquerait d'une part l'obstination de certains et d'autre part la réticence d'autres bâtisseurs à utiliser ou simplement conserver¹³ ce procédé.

4.2.2 Analyse théorique

4.2.2.1 Résonateurs Helmholtz

Helmholtz [43] fut le premier à décrire et formaliser, au XIX^e siècle déjà, les phénomènes physiques entrant en jeu dans les résonateurs acoustiques, qui portèrent par la suite son nom. Il constate en particulier que ces dispositifs possédaient chacun une fréquence de résonance spécifique et qu'ils pouvaient être utilisés comme des filtres fréquentiels. Toute cavité à paroi rigide de volume V , possédant un col, de longueur l et de section S , ouvert sur l'extérieur constitue en fait un résonateur de Helmholtz (cf. Figure 12).

¹³ Dans de nombreux cas les orifices des pots acoustiques ont été obturés plus ou moins longtemps après leur mise en place. Ainsi par exemple les 113 vases de la Sainte-Chapelle de Riom (F) ont été bouchés en 1971. Le sacristain de cet édifice remarqua alors que « depuis ces travaux (vases bouchés), la chapelle « résonne » beaucoup plus et on se comprend avec peine... » [30].

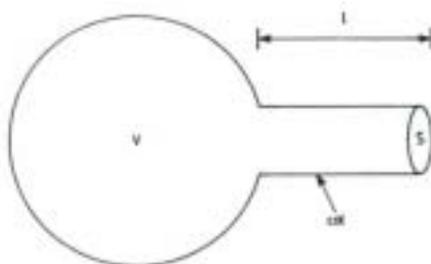


Figure 12 Schéma d'un résonateur de Helmholtz [12]

Les vases acoustiques sont donc des résonateurs de Helmholtz d'un type particulier, dont la forme n'est généralement pas sphérique et dont le col n'est généralement pas droit. La caractérisation des propriétés physiques des vases acoustiques passe donc à une application de la théorie des résonateurs Helmholtz à ces exemples particuliers. Après avoir brièvement présenté les phénomènes physiques qui entrent en jeu dans un résonateur, nous exposerons les principes de modélisation des vases et les hypothèses de notre approche théorique puis nous énumérerons les principales grandeurs acoustiques liées à ces vases. Nous nous pencherons tout particulièrement sur la fréquence de résonance et les propriétés d'absorption ainsi que sur les possibilités d'optimiser les performances des vases acoustiques.

4.2.2.2 Phénomènes physiques

Pour comprendre les phénomènes physiques qui entrent en jeu au niveau acoustique, on peut faire une analogie mécanique. Pour les ondes dont la longueur d'onde est grande devant les dimensions du résonateur, l'air enfermé dans la cavité agit comme un ressort, et l'air contenu dans le col comme une masse. On se trouve donc en présence d'un dispositif masse-ressort, ou oscillateur dont la fréquence de résonance dépend donc des caractéristiques du col (en particulier sa surface d'ouverture S , et sa longueur l) et du volume V .

Un résonateur de Helmholtz est donc un circuit oscillant (présentant alors une fréquence de résonance) qui a pour propriété d'absorber une partie de l'énergie incidente et de réémettre des ondes acoustiques présentant une structure temporelle, fréquentielle et spatiale particulière.

En présence d'un résonateur, on peut assister aux divers phénomènes physiques suivants :

- une absorption d'énergie acoustique entraînant une diminution de la réverbération à certaines fréquences (autour de la fréquence de résonance).
- une amplification acoustique à certaines fréquences, qui ne provient pas d'un accroissement de l'énergie mais plutôt de la mise en résonance du système (autour la fréquence de résonance).
- une modification de la structure temporelle du son à certaines fréquences par le mécanisme de réémission. Ce phénomène peut se traduire par une prolongation du son et une modification des transitoires (en cas d'inversion de phase, le résonateur fonctionne comme un anti-bruit passif, créant une atténuation à certaines fréquences).
- Une diffusion acoustique au niveau spatial par le mécanisme de réémission. L'onde réémise par le vase possède des caractéristiques temporelles et fréquentielles différentes de celle qui serait réfléchié par une paroi rigide.

L'apparition et l'importance des phénomènes susmentionnés dépendent non seulement des caractéristiques géométriques du résonateur (en particulier son impédance) mais également du milieu dans lequel il est disposé. Ainsi les *echea* utilisés dans les théâtres gréco-romains, en plein air, avaient pour but d'amplifier et de prolonger le son à certaines fréquences. La modification de la voix des acteurs (surtout au niveau des formants) permet de donner ainsi une ampleur et une texture particulières.

Les conditions acoustiques dans les églises, qui ont une réverbération généralement élevée, sont bien différentes. Les phénomènes physiques qui s'y déroulent risquent de porter davantage les propriétés d'absorption et de diffusion des vases acoustiques. Ils peuvent alors contribuer à atténuer certaines fréquences par effet d'absorption. Comme nous allons le voir par la suite, les vases acoustiques absorbent d'autant plus d'énergie que leur impédance est forte (col étroit et profond). Si l'impédance est faible (par rapport à l'impédance caractéristique de l'air), l'énergie absorbée est cependant presque intégralement réémise avec une coloration et un certain retard. Dans ce cas, le vase aura plutôt tendance à augmenter la réverbération.

4.2.2.3 Modélisation des vases et hypothèses

Vu l'abondance des publications scientifiques sur les résonateurs Helmholtz [27; 34; 44-55] et pour ne pas alourdir inutilement cette étude, nous ne présenterons ici que les principaux résultats théoriques issus de la littérature ainsi que les applications plus spécifiques aux vases acoustiques, sans nous attarder sur les démonstrations techniques qui permettent de les obtenir. Un exposé plus détaillé de nos recherches théoriques, menées avec M. Loerincik, sont présentées dans un rapport spécifique [12]. Par souci de concision, la description des paramètres utilisés dans les formules qui suivent n'est pas toujours explicitée au niveau du texte mais figure dans le glossaire technique (cf. annexe C).

4.2.2.3.1 Caractérisation des vases

Nous avons vu dans l'approche historique que les vases acoustiques présentaient des formes très diversifiées. Pour modéliser l'effet des vases, il est nécessaire de pouvoir les décrire de façon simple. Les vases ont ainsi été catégorisés à partir des caractéristiques de leur col et de leur cavité.

4.2.2.3.1.1 Col

La longueur l du col est définie par la distance entre les deux points A et B où A est le point le plus à l'extérieur du vase et B l'intersection d'une droite parallèle à l'axe du vase passant par A et la surface intérieure de la poterie (cf. Figure 13). La surface S du col est la moyenne entre la plus grande surface (calculée à partir de OA) et la plus petite (calculée à partir de O'C). Le volume du col est défini par le produit de la surface et de la longueur soit $V_c = S \cdot l$

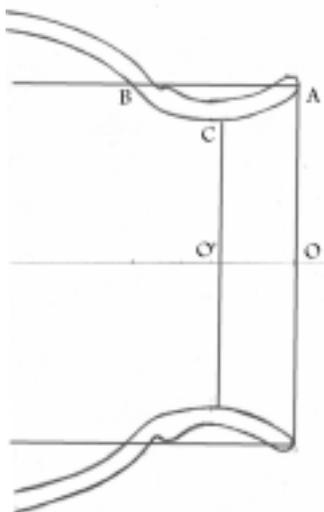


Figure 13 Description schématique du col

Nous distinguerons les cols suivant leur longueur et leur forme (cf. Figure 14).

Le col est appelé **long** si $l \geq 1$ cm et **court** si $l < 1$ cm

Le col est appelé **ouvert** si $OA-O'C \geq 0.5$ cm et **droit** si $OA-O'C < 0.5$ cm



Figure 14 Exemple de col droit, court et ouvert (de gauche à droite)

4.2.2.3.1.2 Cavité

En considérant R_{\max} , le rayon maximum intérieur du vase et d , la longueur de la cavité (longueur totale du vase moins la longueur du col), une cavité sera appelée **sphérique** si $R_{\max} \geq d/2$, **standard** : si $d/2 > R_{\max} > d/2.5$ et **cylindrique** si $R_{\max} \leq d/2.5$. Le cas d'une cavité standard est de loin celui qui est le plus rencontré, les deux autres correspondant à des vases de formes plus particulières (cf. Figure 15).

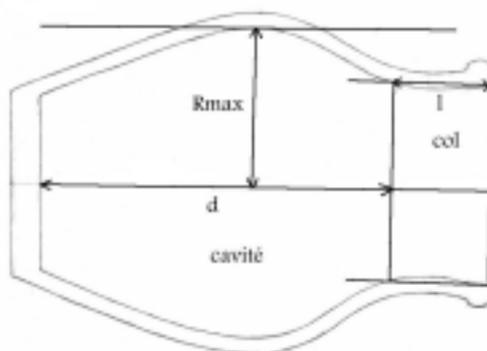


Figure 15 Grandeurs caractéristiques de la cavité

4.2.2.3.2 Modélisation

Le col des vases est modélisé par un cylindre de section constante égale à la section du col et de longueur l . Les vases sont modélisés par des résonateurs de Helmholtz à cavité cylindrique ou sphérique. Les deux cas sont étudiés pour tous les vases.

Modélisation cylindrique

Les dimensions de la cavité cylindrique modélisée doivent respecter le mieux possible les caractéristiques du vase. Pour cela, on utilise le volume du vase V mesuré sur les relevés. La longueur du cylindre correspond à la longueur de la cavité du vase d . Le rayon du cylindre est tiré de ces deux grandeurs.

Modélisation sphérique

Le volume de la cavité sphérique modélisée est prise égale au volume du vase. La relation entre volume et rayon pour une sphère donne la valeur du rayon.

4.2.2.3.3 Hypothèse simplificatrice du modèle

Pour modéliser les vases, nous avons considéré les hypothèses simplificatrices suivantes:

1. Les longueurs d'onde considérées sont beaucoup plus grandes que les dimensions des vases (pour une dimension typique de 20 cm, la fréquence supérieure d'analyse est donc de 1700 Hz).
2. Le fluide dans le col est considéré comme incompressible.
3. Le système a un seul degré de liberté (une particule d'air qui se trouve dans le col ne se déplace que dans la direction de l'axe du vase).
4. Le système est linéaire (absence de régimes tourbillonnaires dans le col).

4.2.2.4 Principales grandeurs acoustiques

4.2.2.4.1 Compliance acoustique

Dans un système masse-ressort, la compliance peut être comparée à la constante du ressort qui exprime sa raideur. Dans notre cas, c'est l'air enfermé à l'intérieur de la cavité, en se compressant, qui joue le rôle du ressort. En supposant que les compressions et dilatations successives s'effectuent rapidement et qu'il n'y a pas d'échanges de chaleur avec le reste du fluide, c'est-à-dire que les transformations sont adiabatiques, la compliance acoustique d'une cavité de forme quelconque est donnée par [30] :

$$C_a = \frac{V}{\rho c^2}$$

4.2.2.4.2 Inductance acoustique

Dans un système masse-ressort, l'inductance acoustique peut être comparée à la masse. Dans le cas d'un résonateur, en supposant que les dimensions du col sont petites par rapport à celles de la cavité, seul l'air contenu dans le col est en mouvement.

Pour un col de section constante, l'inductance acoustique est définie par :

$$L_{\text{col}} = \frac{\rho l_e}{S}$$

l_e est la longueur effective du col, $l_e = l + l_c$ où l_c est la correction de bout qui doit être introduite pour tenir compte des effets d'inertie aux ouvertures du col.

On pose en général $l_c = \varepsilon b$, où b est le rayon du col si celui-ci est circulaire et ε un coefficient, qui peut être évalué à 1.32 sur la base des travaux de Ando [47] dans le cas des vases acoustiques cloisonnés. Ce coefficient peut se décomposer en deux contributions ($\varepsilon = \varepsilon_1 + \varepsilon_2$) pour tenir compte des corrections extérieures (ε_1) et intérieures (ε_2). Les coefficients ε_1 et ε_2 , qui dépendent de paramètres géométriques, prennent la valeur de $\varepsilon_1 = 0.61$ et $\varepsilon_2 = 0.82$ pour un vase libre et $\varepsilon_1 = 0.85$ et $\varepsilon_2 = 0.82$ pour un vase cloisonné.

4.2.2.4.3 Résistance acoustique

On estime la résistance acoustique en étudiant la dissipation de l'énergie dans le résonateur. Les travaux de Ingard [45; 46] et Cummings [48] tendent à montrer qu'il y a principalement trois contributions à la perte d'énergie :

1. Les frottements visqueux
2. Les pertes dues aux radiations
3. Les pertes thermiques

D'après les travaux susmentionnés, les pertes thermiques sont négligeables.

4.2.2.4.3.1 Effets visqueux

Pour des modélisations cylindriques et sphériques, où le col est un cylindre de longueur l et de surface S , la résistance visqueuse, due aux frottements contre les bords du col du résonateur, est donnée par l'expression :

$$R_{\text{visc}} = \rho \omega d_v \left(\frac{2}{S} + \frac{1}{bS} \right)$$

4.2.2.4.3.2 Résistance de rayonnement

Pour un vase libre, la résistance de rayonnement R_{ray} , qui dépend uniquement de la fréquence, a été déterminée par Levine [56] sous la forme :

$$R_{\text{ray}} = \frac{\rho \omega^2}{4\pi c}$$

4.2.2.4.4 Impédance acoustique

L'impédance acoustique Z_a , qui correspond à la résistance à l'excitation, est égale au rapport de la pression sur la vitesse de l'air à l'ouverture du résonateur¹⁴. Elle est donnée par la formule suivante :

$$Z_a = \left(R_a + i\omega L_{col} - \frac{i}{\omega C_a} \right)$$

4.2.2.4.5 Fréquence de résonance

4.2.2.4.5.1 Formule classique

La valeur de la fréquence de résonance est donnée par l'élimination de la partie imaginaire de l'impédance acoustique. Cette condition nous donne la formule classique de la fréquence de résonance :

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{l_c V}}$$

Dans notre cas, la longueur effective est donnée par $l_e = l + l_c$, où l_c est la longueur de correction définie plus haut.

4.2.2.4.5.2 Formule d'Alster

Dans la formule ci-dessus, la fréquence de résonance ne dépend pas de la forme de la cavité, c'est l'idée générale qui prévaut lorsque l'on parle des résonateurs. Or, Alster a montré [49], en utilisant une bouteille à moitié remplie dont il a fait varier l'inclinaison, que la valeur de la fréquence dépend de la forme. Il a dérivé une nouvelle formule pour la fréquence de résonance:

$$f_r = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{S}{1.21(V + V_c) \left\{ \frac{v}{V + V_c + V_{01}} \frac{d}{d + l + l_{01}} \left[1 + (1 + l_{01}) \left(1 + \frac{1}{2} \left[\frac{V_c + V_{01}}{v} + \frac{l + l_{01}}{d} \right] + \frac{1}{3} \frac{V_c + V_{01}}{v} \frac{l + l_{01}}{d} \right) \right] + l_{02} \right\}}}}$$

où V_c est le volume du col,

d est la hauteur du résonateur du fond jusqu'au col,

V_{01} volume de l'élongation hypothétique du vase ($V_{01} = S \cdot l_{01}$),

l_{01} , l_{02} deux parties de la correction de bout (les mesures d'Alster donnent $l_{01} = l_{02} = 0.24 \cdot b$), et

l_v est un facteur de forme qui tient compte de la forme du résonateur.

¹⁴ La partie réelle de l'impédance est la résistance, sa partie imaginaire la réactance.

Pour un résonateur sphérique, on trouve [12]:

$$l_v = \frac{b^2}{R} \frac{1}{2-H} \left[\frac{1}{3} - \frac{1}{2(H+1)} - \frac{2}{(H+1)^2} + \frac{4}{(H+1)^3} \ln \frac{2}{1-H} \right]$$

Avec $H = \sqrt{1 - \left(\frac{b}{R}\right)^2}$ et R est le rayon du résonateur sphérique (cf. Figure 16).

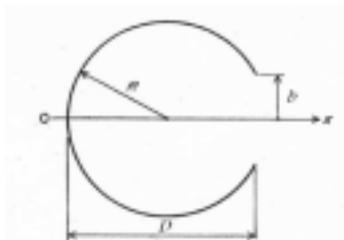


Figure 16 Schéma d'un résonateur sphérique

Pour un résonateur cylindrique, on a

$$l_v = \frac{S}{S_{cy}} \frac{h}{3}$$

Avec S_{cy} la section du cylindre, et S la surface d'ouverture (du col).

4.2.2.4.5.3 Vase cloisonné

Dans les églises, les vases sont emmurés, il est donc important d'étudier les changements qui pourraient se produire entre un vase cloisonné et un vase libre. Le cloisonnement d'un résonateur induit un changement de la valeur de la fréquence de résonance qui provient de la variation de la correction de bout extérieure (coefficient ϵ_1). La variation de la fréquence de résonance entre un vase libre ($f_{r\text{libre}}$) et cloisonné ($f_{r\text{cloi}}$) peut donc s'exprimer par la formule suivante:

$$\frac{f_{r\text{libre}} - f_{r\text{cloi}}}{f_{r\text{libre}}} = 1 - \frac{\sqrt{1 + \epsilon_1^{\text{libre}} b + \epsilon_2 b}}{\sqrt{1 + \epsilon_1^{\text{clois}} b + \epsilon_2 b}}$$

On constate, en calculant les valeurs limites, que lorsque la longueur du col l devient grande, le cloisonnement ne change plus la fréquence de résonance. Lorsque l'ouverture du col b devient grande, le cloisonnement induit une baisse de la fréquence de résonance d'environ 5%.

4.2.2.4.6 Facteur de qualité

Le facteur de qualité (Q) est une mesure de l'étroitesse du pic de la réponse fréquentielle d'un vase et correspond au rapport de l'inductance sur la résistance, soit:

$$Q = \frac{\omega L_{col}}{R_a} = \frac{\omega_r \rho l_e}{S(R_{ray} + R_{visc})}$$

Si la valeur du facteur de qualité est élevée, le système sera très sélectif. En reprenant les expressions utilisées ci-dessus pour la fréquence de résonance, la résistance de rayonnement et la résistance due à la viscosité, l'expression pour le facteur de qualité devient assez compliquée.

4.2.2.4.7 Pression à l'intérieur d'un vase

4.2.2.4.7.1 Modes propres

Un résonateur de Helmholtz étant une cavité présentant une ouverture, il possède des modes propres qui sont liés à sa géométrie. En modélisant simplement celui-ci par un tuyau fermé à un bout (comme un tuyau d'orgue fermé), les conditions aux limites impliquent (cf. Figure 17) :

$$L = \frac{n\lambda}{4}$$

avec L est la longueur du tuyau et n, un nombre impair qui indique l'ordre du mode¹⁵, Avec cette approximation, les fréquences propres sont donc données par :

$$f_n = \frac{nc}{4L}$$

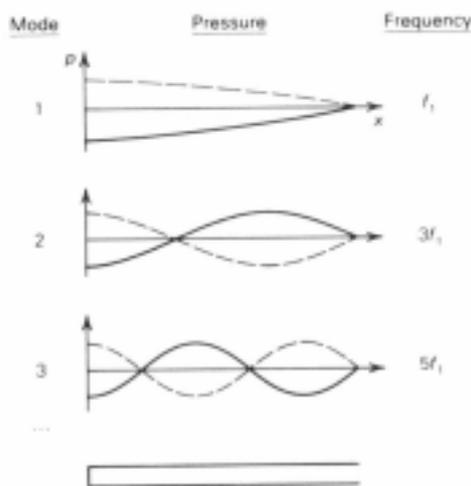


Figure 17 Modes propres dans un tuyau fermé à un bout [12]

¹⁵ n = 1 correspond au mode fondamental, n = 3 au premier harmonique, n = 5 au deuxième harmonique et ainsi de suite.

4.2.2.4.7.2 Equation d'onde

On peut calculer la pression à l'intérieur d'un vase à partir de la démarche proposée par Cummings [57] pour calculer les variations de la pression à l'intérieur d'une bouteille de vin. A partir de l'équation d'onde à une dimension (valable à basse fréquence), de la conservation de la masse et en supposant que la dépendance temporelle de la pression est du même type que pour un oscillateur harmonique, on aboutit à l'équation suivante :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \frac{1}{S(x)} \frac{dS(x)}{dx} \frac{\partial p}{\partial x} + k_0^2 p = 0$$

Cette équation ne possède pas, en général, de solution analytique. Par contre il est possible de la résoudre de manière numérique en modélisant la surface de notre vase.

4.2.2.4.8 Temps de réverbération

En considérant le taux de décroissance de l'énergie, Fontaine [30] déduit la valeur du temps nécessaire pour que les oscillations libres décroissent de 60 dB, soit :

$$T_R = \frac{6.909}{\omega^2 C (R_{\text{visc}} + R_{\text{ray}})}$$

La valeur du temps de réverbération des vases doit être mise en rapport avec celle du milieu dans lequel ceux-ci sont mis en place. Dans un local, les vases auront plutôt tendance à diminuer la réverbération alors qu'en extérieur, ils tendent à l'augmenter.

4.2.2.4.9 Absorption

La section efficace d'absorption (A_a) est donnée par le rapport de l'énergie absorbée et de l'intensité incidente, soit :

$$A_a = \frac{\rho c R_{\text{visc}}}{|Z_a|^2}$$

Ce quotient représente la section efficace d'absorption, exprimée en m^2 . Un système ayant $A=1$ absorbe donc une énergie équivalente à celle incidente sur une surface de $1 m^2$. Le paramètre A peut donc être vu comme le coefficient d'absorption d'une paroi où serait présent un vase par m^2 . Il est tout à fait possible et plausible de rencontrer des cas où cette section efficace est supérieure à 1. En général, la distance entre les vases est suffisamment importante pour que le A_a total (correspondant à la somme des A_a pour chaque vase) soit nettement inférieur à la surface totale de la paroi. Des vases ayant la même fréquence de résonance placés trop près risquent de se « gêner ».

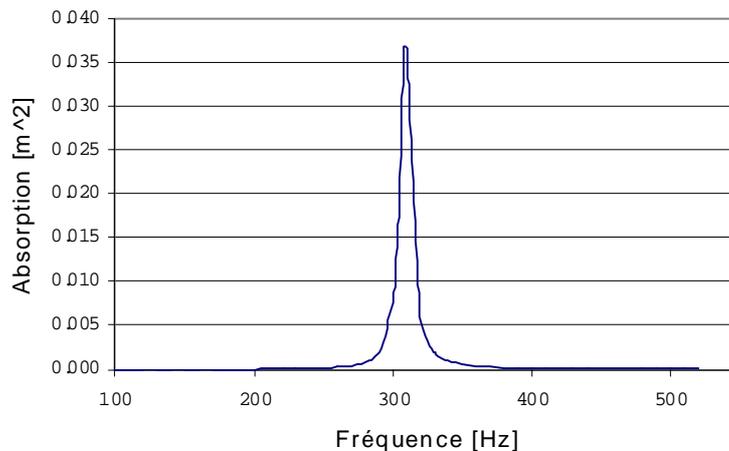


Figure 18 Variation en fréquence de la section efficace d'absorption (pour les données géométriques du vase 2, cf. Figure 23)

La dépendance de la section efficace d'absorption avec la fréquence montre que le maximum d'absorption correspond à la fréquence de résonance du vase. En calculant l'absorption pour un vase acoustique, nous constatons (cf. Figure 18) que la valeur maximale reste relativement faible et que l'effet d'absorption du vase se situe dans une bande étroite d'environ 20 Hz (le système, avec un facteur de qualité élevé est donc assez sélectif).

4.2.2.4.9.1 Optimisation de l'absorption

A la fréquence de résonance, la partie imaginaire de l'impédance étant nulle, la section efficace d'absorption est maximale et vaut :

$$A_a = \frac{\rho c R_{\text{visc}}}{(R_{\text{visc}} + R_{\text{ray}})^2}$$

En faisant varier les grandeurs géométriques du résonateur, on ne modifie que la résistance due aux pertes par viscosité (nous avons vu que la résistance de rayonnement R_{ray} ne dépendait que de la fréquence). Pour optimiser l'absorption, on pose alors :

$$\frac{\partial A}{\partial R_{\text{visc}}} = 0 \Rightarrow R_{\text{visc}} = R_{\text{ray}}$$

Ce qui donne après calcul, pour la fréquence de résonance, l'expression suivante :

$$\frac{b^{\frac{9}{2}}}{(2b+1)(1_e V)^{\frac{3}{4}}} = \frac{4}{\pi^{\frac{3}{4}}} \left(\frac{2\mu}{c\rho} \right)^{\frac{1}{2}}$$

Un vase dont les caractéristiques géométriques satisfont la condition ci-dessus possède une section efficace maximale pour la fréquence de résonance correspondante.

De la même façon, on peut étudier (et optimiser) l'évolution de la fréquence de résonance et de la section efficace d'absorption (cf. Figure 19) en fonction de la longueur du col (ce qui revient à varier par exemple la profondeur de l'encastrement).

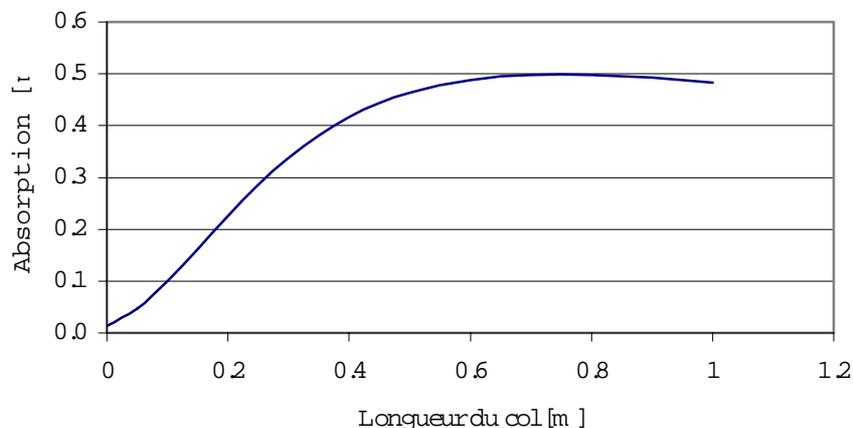


Figure 19 Section efficace d'absorption à la fréquence de résonance en fonction de la longueur du col (pour les données géométriques du vase 2, cf. Figure 23)

4.2.2.4.9.2 Vases cloisonnés

Pour un vase cloisonné, les résultats ci-dessus sont valables à condition d'effectuer deux changements [45; 46]. La pression contre une paroi est le double de la pression incidente (à l'ouverture du résonateur on a donc $P=2*P_i$). D'autre part, la résistance de rayonnement du vase est multipliée par deux [58].

Un développement similaire à celui effectué pour les vases libres nous montre [12] que la section efficace d'absorption maximale est multipliée par deux lorsque le vase est cloisonné par rapport au même vase libre. Par ailleurs, l'optimisation de l'absorption d'un vase cloisonné aboutit à la même condition d'égalité des résistances que dans le cas d'un vase libre.

A partir de la condition d'égalité entre les résistances ($R_{\text{visc}} = R_{\text{ray}}$) et l'expression de la fréquence de résonance, on peut également calculer le maximum d'absorption pour une fréquence de résonance particulière pour un vase cloisonné (cf. Figure 20).

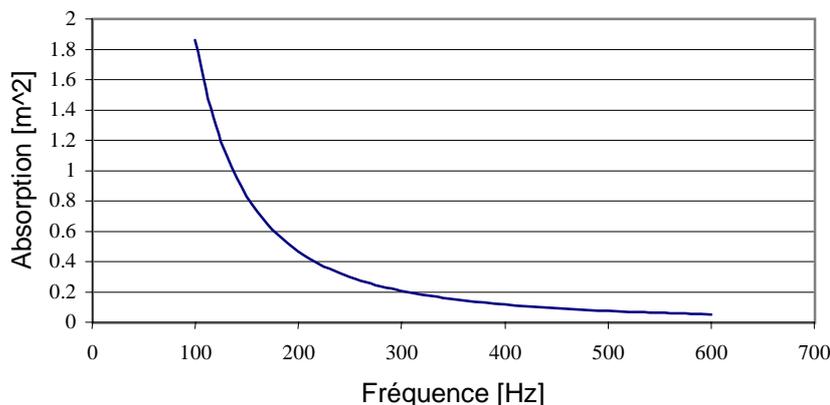


Figure 20 Section efficace d'absorption maximale pour un vase cloisonné en fonction de la fréquence de résonance

4.2.2.4.10 Diffusion

Selon une démarche analogue à celle entreprise pour calculer l'absorption, on peut exprimer la section efficace de diffusion par le rapport de l'énergie rayonnée par le vase et de l'intensité de l'onde incidente.

$$A_s = \frac{\rho c R_{\text{ray}}}{|Z_a|^2}$$

4.2.2.4.11 Directivité

Ingard et Morse [58] donnent une expression du champ de pression résultant d'un piston dans un mur infini qui permet de calculer le rayonnement de l'intensité acoustique. En considérant les dimensions des vases étudiés et les longueurs d'onde à la résonance (on a $\lambda \gg 5b$), on peut qualitativement assimiler le rayonnement du vase à une radiation omnidirectionnelle.

4.2.3 Résultats expérimentaux

4.2.3.1 Etude bibliographique

Quelques scientifiques ont étudié empiriquement l'effet des vases acoustiques. Avant d'exposer nos propres résultats de mesurages, nous présentons donc brièvement les résultats expérimentaux obtenus par nos prédécesseurs.

4.2.3.1.1 Floriot

La thèse de doctorat du père Floriot, présentée en 1964 [28], comporte, après de riches informations historiques, de très nombreux résultats expérimentaux, issus de multiples années d'investigations qui sont cependant basées sur des techniques de

mesurages relativement simples. Le principal procédé de mesure utilisé par Floriot consiste à "étudier le champ sonore dans un local doté de vases acoustiques que l'on bouche et débouche au cours d'une même mesure".

Les mesurages portent principalement sur le niveau sonore de sons purs, de sons complexes et de paroles et musiques en faisant varier les positions du micro et du haut-parleur ainsi que le type de salle (salle réverbérante, anéchoïque, salle de conférence, maquette, ainsi que plusieurs églises).

4.2.3.1.1.1 Conclusion des mesures en laboratoire

- A la fréquence de résonance, les vases créent une amplification de quelques décibels dans une zone rapprochée (jusqu'à 1-2 m).
- Dans une zone éloignée, on observe plutôt un effet d'absorption.
- L'effet est moins important en présence d'un son complexe.
- Si l'on accorde soigneusement les vases avec les fréquences propres de la salle, on note une régularisation, c'est-à-dire une atténuation des irrégularités (brèves variations de la pression), de l'onde qui suit l'extinction du son (cf. Figure 21).
- Les sons avec des transitoires importants (percussion, début et fin d'émission) sont, en général, beaucoup plus régularisés que les sons permanents.
- La disposition des vases semble avoir de l'importance, les pots proches semblent se « gêner » mutuellement.

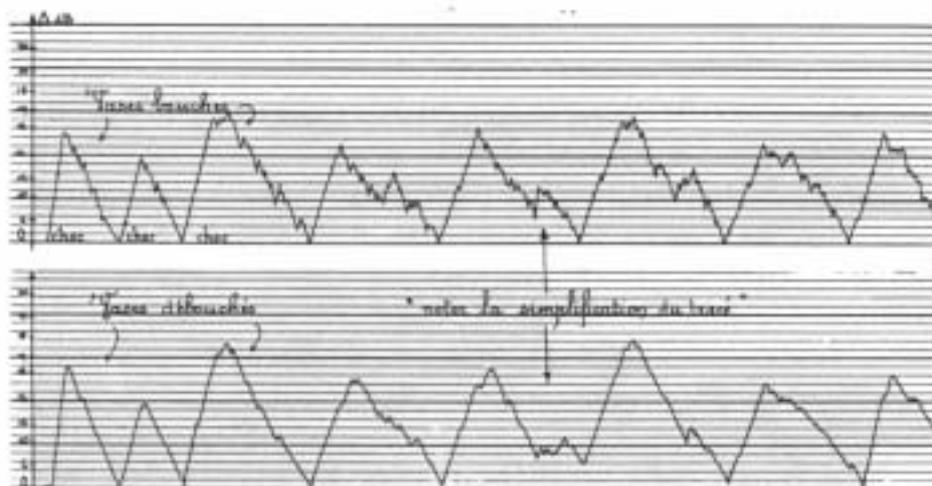


Figure 21 Mise en évidence par Floriot des effets de régularisation [28]

4.2.3.1.1.2 Conclusion pour les mesures in situ

Les vases acoustiques mis en place dans les églises peuvent, lorsqu'ils présentent des caractéristiques bien définies :

- Régulariser les décroissances.
- Diminuer le temps de réverbération.
- Augmenter la diffusion (diminution des focalisations, en particulier issues des voûtes et coupoles).

Et Floriot de conclure, « *Peut-on affirmer que les poteries médiévales ont amélioré la qualité sonore des édifices en remplissant essentiellement le rôle de régulateurs ? Oui, et cette conclusion reste valable en dépit des tentatives infructueuses, explicables par un manque de technique appropriée au but envisagé. Les bâtisseurs médiévaux des églises romanes sont parfois arrivés à une connaissance purement expérimentale de certaines lois de l'acoustique, cela était suffisant pour appliquer le « mode d'emploi » : alors les vases acoustiques n'ont pas failli à leur mission.* ».

4.2.3.1.2 Fontaine

Le mémoire présenté par Fontaine au CNAM en 1979 [30], comporte, après un long développement théorique sur les résonateurs, quelques résultats expérimentaux basés sur des investigations avec un tube de Kundt et un banc stroboscopique sur des modèles réduits de vases ainsi que l'analyse du spectre fréquentiel et du temps de réverbération de quelques églises.

4.2.3.1.2.1 Conclusion des mesures en laboratoire

Les principaux résultats obtenus en laboratoire sont les suivants :

- Bonne corrélation entre théorie et mesures pratiques pour l'évaluation de la fréquence de résonance.
- Les vases sont très sélectifs en fréquences (facteurs de qualité élevés).
- L'état de surface du col (vernis ou non) a peu d'influence sur le taux d'absorption.
- La résistance totale du système est relativement faible ce qui implique des possibilités d'absorption restreintes.
- Les vases induisent une augmentation de l'état de diffusion.

4.2.3.1.2.2 Conclusion des mesures in situ

Les principaux résultats obtenus dans des églises sont les suivants :

- Les effets fréquentiels et temporels des vases sont difficilement généralisables (une analyse expérimentale s'impose pour chaque cas).
- Les vases peuvent entraîner en certaines places une modification sensible du temps de réverbération.
- Au niveau de la réponse spectrale, on constate souvent un renforcement des basses (50-200 Hz) en présence des vases.
- Aucun « lissage » de la courbe d'extinction n'a été mis en évidence.

4.2.3.1.3 Autres auteurs

En étudiant l'effet de bouteilles de lait dans une salle ayant un temps de réverbération court, Rschevkin [59] parvient à mettre en évidence (cf. Figure 22) une augmentation importante du temps de réverbération à la fréquence de résonance des bouteilles. Dans le même registre, Cummings s'est également penché sur les phénomènes acoustiques des bouteilles de cidre [48] et de vin [57].

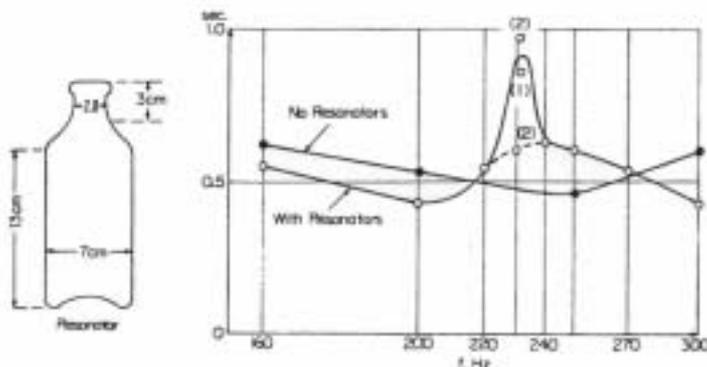


Figure 22 Augmentation de la réverbération par la mise en place de bouteilles dans une salle peu réverbérante [59]

A la fin des années 80, Leguy s'est plus particulièrement penché sur la mise en évidence en laboratoire des caractéristiques physiques (relation de phase) de l'onde de retour réémise par le résonateur [60]. Ces analyses du comportement des vases, mesuré en régime transitoire dans une chambre sourde, lui ont permis de mettre en évidence les phénomènes et conclusions suivants:

- Un changement brutal de phase de l'onde réémise à la coupure du signal exciteur.
- L'amplitude et la décroissance de l'onde réémise sont liées à la géométrie du résonateur et à sa position dans la salle.
- Si le temps de réverbération du résonateur T_r est plus grand que celui de la salle T_s , on aura une impression d'amplification naturelle, avec une excellente perception des transitoires.
- Un résonateur fonctionne également dans une bande de fréquence comprise entre 8 et 20 fois la fréquence de résonance de base, des modes de résonance propres de cavité ou de col étant alors mis en jeu.

Selon Leguy [61], lorsque le résonateur entre en action, le niveau augmente dans les premières millisecondes puis décroît brutalement mais de façon régulière. La pente de décroissance est ensuite plus lente et rejoint celle du temps de réverbération initial. Les "accidents" sont atténués de sorte que la décroissance est plus régulière. Persuadé de l'utilité de ces dispositifs, Leguy a largement promu et utilisé les résonateurs comme correction acoustique dans des salles [62].

4.2.3.2 Mesurages en laboratoire

Ces mesures ont pour but de vérifier les phénomènes physiques associés aux vases acoustiques et de les comparer avec les prévisions théoriques.

4.2.3.2.1 Description des vases utilisés

8 vases, soit 6 pots en terre (cf. Figure 23) et 2 vases vernis (cf. Figure 24), de tailles et de formes variées, semblables à ceux relevés dans des églises en Suisse ont été utilisés pour effectuer les mesurages en laboratoire.



Figure 23 Exemples (1 à 6) des pots en terre utilisés lors des mesures en laboratoire

Les investigations détaillées ont été effectuées sur le vase numéro 2 du fait de sa géométrie qui est très proche de plusieurs vases emmurés dans les églises qui seront également évaluées.



Figure 24 Exemples (7 et 8) des vases vernis utilisés lors des mesures en laboratoire

4.2.3.2.2 Fréquence de résonance

Pour évaluer la fréquence de résonance, on mesure la réponse fréquentielle du vase en chambre anéchoïque (EPFL) avec le micro placé à l'intérieur du vase (en déduisant la réponse mesurée sans vase pour faire abstraction des caractéristiques du micro et du haut-parleur). Ces mesurages ont été effectués pour chaque vase afin de déterminer la fréquence de résonance (maximum du pic) et le facteur de qualité (largeur du pic, cf. Figure 25).

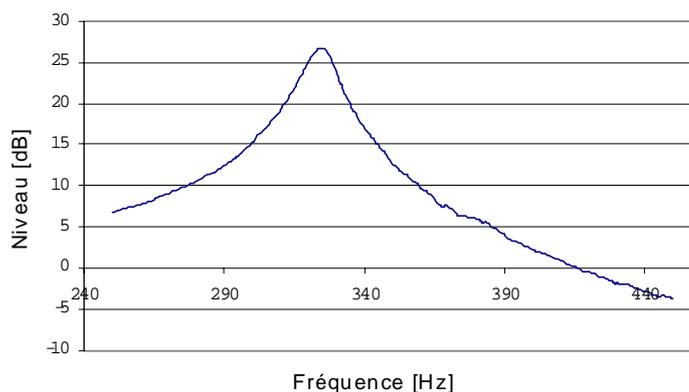


Figure 25 Réponse fréquentielle du vase 2

4.2.3.2.2.1 Formule classique

Les valeurs déterminées expérimentalement sont comparées aux valeurs théoriques obtenues par la formule classique ($f_{r, \text{class}}$, cf. Tableau 1).

Tableau 1 Fréquences de résonance mesurées (f_{mes} , avec l'écart type σ entre mesurages) et calculées par la formule classique

Vase No	Col	Cavité	Fréquences mesurées f_{mes} (Hz)	$f_{r, \text{class}}$ (Hz)	$\pm \sigma$	Différence $f_{\text{class}} - f_{\text{mes}}$ (Hz)	Différence (%)
1	droit	standard	325	354	27	29	9.1
2	droit	standard	297	309	24	12	4.1
3	court	standard	444	474	40	30	6.8
4	ouvert	standard	369	380	29	11	2.9
5	ouvert	standard	237	246	19	9	3.8
6	court	standard	393	425	34	32	8.0
7	court	cylindrique	435	538	43	103	23.8
8	ouvert	standard	343	337	26	-6	-1.9
Moyenne					30	27	7.1
Ecart type					8	33	7.6

La formule classique permet de prédire correctement la fréquence de résonance avec une erreur maximale de 10 % si l'on excepte le vase 7. L'écart moyen entre théorie et pratique est de 7.1 % (27 Hz) et reste dans la marge d'incertitudes (30 Hz). L'erreur systématique, relativement élevée, doit venir de la sous-estimation de la correction de col. La forme intérieure en pavillon des parties intérieures et extérieures du col peut ainsi induire une augmentation du coefficient ε . En optimisant ce paramètre ($\varepsilon = 1.78$), on réduit l'erreur moyenne à -0.05 % et l'écart type de 5.9%.

4.2.3.2.2 Formule d'Alster

Les valeurs déterminées expérimentalement sont également comparées aux valeurs théoriques obtenues par la formule de Alster pour une modélisation cylindrique et sphérique (fr_{cyl} et fr_{sph} cf. Tableau 2).

Tableau 2 Fréquences de résonance mesurées et calculées par la formule de Alster.

Vas e No	Col	Cavité	fr mes. (Hz)	fr cyl (Hz)	$\pm \sigma$	Diff. (Hz)	Diff. (%)	fr sph (Hz)	$\pm \sigma$	Diff. (Hz)	Diff. (%)			
1	droit	standard	325	337	44	12	3.7	338	57	13	3.9			
2	droit	standard	297	302	42	5	1.8	295	48	-2	-0.6			
3	court	standard	444	438	82	-6	-1.4	449	100	5	1.1			
4	ouvert	standard	369	364	54	-5	-1.4	362	63	-7	-1.9			
5	ouvert	standard	237	241	31	4	1.9	235	35	-2	-0.7			
6	court	standard	393	401	67	8	2.0	404	82	11	2.8			
7	court	cylindrique	435	422	72	-13	-2.9	526	115	91	20.9			
8	ouvert	standard	343	331	47	-12	-3.5	321	54	-22	-6.4			
					Moyenne	55	-0.7	0.04				69	11	2.4
					Ecart type	17	9.5	2.7				27	34	8.1

Avec la formule de Alster, les paramètres l_{01} et l_{02} ont été ajustés afin de minimiser l'erreur entre mesures et calculs. On obtient alors $l_{01} = l_{02} = 0.36 \cdot b$, pour la modélisation cylindrique et $l_{01} = l_{02} = 0.5 \cdot b$, pour la modélisation sphérique.

La formule de Alster utilisant la modélisation cylindrique permet de prédire la fréquence de résonance avec une erreur inférieure à 3 % et sans erreur systématique. Cette formule semble bien appropriée à la plupart des vases.

La modélisation sphérique donne de très bons résultats si l'on exclut le vase 7. La formule de Alster donne dans le cas de cette modélisation une incertitude plus élevée que la formule classique, car elle est plus sensible aux paramètres géométriques.

4.2.3.2.3 Vases cloisonnés et libres

Les mêmes mesures que décrites précédemment sont effectuées avec le vase cloisonné à l'aide d'une planche en bois (cf. Figure 26 et Figure 27).



Figure 26 Mesurages en chambre anéchoïque avec un vase cloisonné

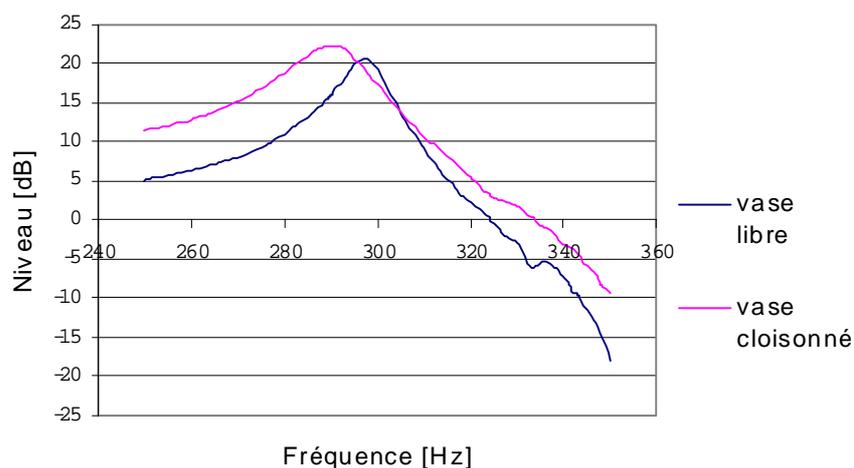


Figure 27 Détermination de la fréquence de résonance d'un vase libre puis cloisonné

La fréquence de résonance de chaque vase a été mesurée dans l'état libre puis cloisonné (cf. Tableau 3).

Tableau 3 Comparaison de la fréquence de résonance entre vases libres et cloisonnés.

Vase no	Col	Cavité	f_r vases libres (Hz)	f_r vases cloisonnés (Hz)	Différence (%)	Différence théorique (%)
1	droit	standard	325	316	2.8	3.0
2	droit	standard	297	291	2.0	3.2
3	court	standard	444	433	2.5	4.5
4	ouvert	standard	369	359	2.7	3.3
5	ouvert	standard	237	234	1.3	2.6
6	court	standard	393	384	2.3	4.7
7	court	cylindrique	435	424	2.5	5.0
8	ouvert	standard	343	336	2.0	3.2

Nous constatons, avec le cloisonnement, une baisse de la fréquence de résonance légèrement inférieure à celle prévue théoriquement mais toujours située dans les limites prévues par le calcul (< 5%).

4.2.3.2.3 Facteur de qualité

Le facteur de qualité Q est mesuré expérimentalement en déterminant les valeurs de la fréquence f_1 et f_2 au niveau efficace (soit une valeur de $A_m/\sqrt{2}$, où A_m est le niveau maximum à la fréquence de résonance). Le facteur de qualité est alors défini par la relation

$$Q = \frac{|f_1 - f_2|}{f_r}$$

Tableau 4 Comparaison entre le facteur de qualité mesuré et calculé

vase No	Col	Cavité	Q _{calculé}	± σ	Q _{mesuré}	± σ	Différence	Différence (%)	
1	droit	standard	5.36	1.5	5.24	0.4	0.1	2	
2	droit	standard	5.55	1.8	5.94	0.5	-0.4	-7	
3	court	standard	3.55	2.4	5.28	0.3	-1.7	-49	
4	ouvert	standard	4.47	1.4	4.53	0.4	-0.1	-1	
5	ouvert	standard	7.72	1.6	6.77	0.6	0.9	12	
6	court	standard	3.17	1.7	4.32	0.3	-1.1	-36	
7	court	cylindrique	2.42	1.3	5.58	0.4	-3.2	-130	
8	ouvert	standard	4.59	1.5	6.35	0.5	-1.8	-38	
Moyenne				1.7			0.4	-0.8	-29.9
Ecart type				0.3			0.1	1.4	49.3

La correspondance entre théorie et pratique est très bonne pour les vases 1, 2, 4 et 5 (cf. Tableau 4). En effet, pour ces pots, l'erreur, qui est inférieure à 12 %, est comprise dans la marge d'incertitude. En ce qui concerne les quatre autres vases, le calcul théorique sous-estime nettement le facteur de qualité. Cela peut s'expliquer par les caractéristiques de ces vases qui ont des cols courts (vases 3, 6 et 7) ou sont vernis (vases 7 et 8). Ces deux caractéristiques conduisent probablement à une surestimation de la résistance de viscosité. Notons que le vase 7, qui présente le plus grand écart entre théorie et mesure, possède les deux caractéristiques susmentionnées.

On constate par ailleurs que le cloisonnement des vases induit une baisse du facteur de qualité, conformément aux prévisions théoriques. Cette diminution s'explique d'une part par la baisse de la fréquence de résonance et d'autre part par l'augmentation de la résistance de rayonnement.

4.2.3.2.4 Temps de réverbération

Le temps de réverbération des vases est mesuré en calculant le temps nécessaire à une diminution du niveau de 60 dB à l'intérieur du vase lorsque le signal exciteur

est coupé. Le Tableau 5 présente, pour chaque vase, la moyenne des résultats de mesurages ainsi que la valeur théorique.

Tableau 5 Comparaison entre les valeurs mesurées et calculées du temps de réverbération des vases

vase No	Col	Cavité	T _R calculé (s)	± σ	T _R mesuré (s)	± σ	Différence (s)	Différence (%)
1	droit	standard	0.26	0.03	0.16	0.01	0.10	39
2	droit	standard	0.28	0.03	0.17	0.01	0.11	39
3	court	standard	0.13	0.02	0.11	0.002	0.02	15
4	ouvert	standard	0.18	0.02	0.15	0.01	0.03	15
5	ouvert	standard	0.48	0.06	0.38	0.007	0.11	22
6	court	standard	0.13	0.01	0.13	0.02	0.00	-1
7	court	cylindrique	0.12	0.008	0.15	0.02	-0.03	-26
8	ouvert	standard	0.20	0.02	0.18	0.03	0.02	9
Moyenne							0.04	14
Ecart type							0.05	21

A l'exception de trois cas (vases 1, 2 et 5), les résultats des mesurages concordent avec les valeurs théoriques qui surestiment en général le temps de réverbération.

4.2.3.2.5 Absorption

La section efficace d'absorption des vases a été mesurée d'une part avec un tube de Kundt, d'autre part en chambre réverbérante.

4.2.3.2.5.1 Tube de Kundt

Le tube de Kundt, qui permet de mesurer l'impédance acoustique et le coefficient d'absorption¹⁶, est peu adapté à la mesure des vases acoustiques de taille réelle¹⁷ car l'ouverture sur laquelle doit être adapté le vase est trop petite. Il a donc seulement été possible de mesurer le coefficient d'absorption pour le vase 3 dont l'embouchure est assez petite pour permettre cette mesure (cf. Figure 28).

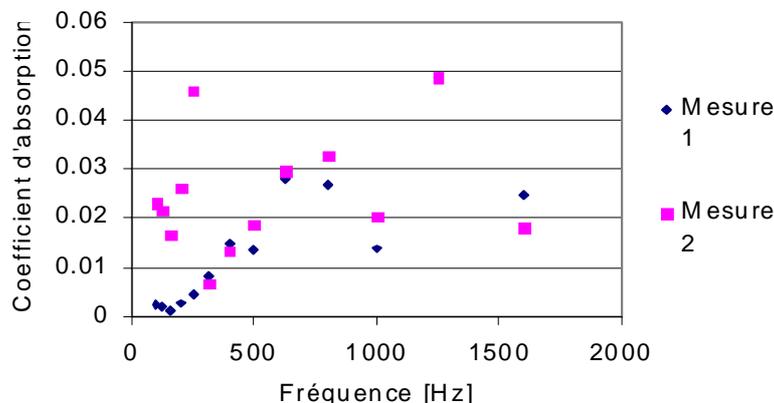


Figure 28 Coefficient d'absorption du vase 3 avec le tube de Kundt

¹⁶ Le coefficient d'absorption est le rapport de l'énergie absorbée à l'énergie incidente

¹⁷ Fontaine a contourné cette difficulté en utilisant, dans son étude [30], des modèles réduits de vases.

Les résultats des mesures montrent que cette technique de mesurage est peu reproductible dans ce cas, surtout en basses fréquences. Vu que la dimension de l'embouchure du vase 3 est proche du diamètre du tube de Kundt, celui-ci agit comme une prolongation du tube et le coefficient mesuré représente plutôt l'absorption du matériau constituant le fond du vase que le coefficient que l'on cherche à déterminer. La configuration du tube de Kundt ne permet donc pas de tenir compte correctement des effets de bord du vase, en particulier de l'augmentation de la vitesse (et des frottements visqueux) dans le col. L'analyse théorique a cependant montré que ces effets étaient déterminants pour les phénomènes d'absorption des vases libres ou cloisonnés.

Par ailleurs, nous avons vu que les valeurs théoriques des coefficients d'absorption d'un résonateur de Helmholtz sont particulièrement faibles lorsque la géométrie de ce dernier n'est pas adaptée pour maximiser l'absorption. Il est alors difficile de mesurer ces coefficients très faibles, car l'absorption du matériau devient plus grande que celle liée au phénomène de résonance. Cela explique pourquoi les valeurs mesurées pour le coefficient d'absorption ne correspondent pas aux prévisions théoriques. Par ailleurs, cette méthode ne s'applique que pour des absorptions en incidence normale.

4.2.3.2.5.2 Salle réverbérante

Pour mesurer la section efficace d'absorption d'un matériau dans une salle réverbérante, il était nécessaire d'avoir à disposition un grand nombre de vases. Nous avons ainsi effectué les mesurages avec trente vases du type du vase 2 (cf. Figure 29) dont la fréquence de résonance est d'environ 300 Hz. Leur facture artisanale impose cependant de petites différences géométriques entre eux, impliquant un changement de la fréquence de résonance. L'absorption a pu être mesurée à différentes fréquences ainsi que pour différentes dispositions des vases.



Figure 29 Mesurage en chambre réverbérante de l'absorption de 30 vases éparpillés

Les premiers résultats de mesurages montrent (cf. Figure 30), de façon surprenante, que l'effet des vases retournés (ouverture contre le sol) est, en dessous de la fréquence de résonance, nettement plus important que lorsque les vases sont debout (ouverture visible). L'effet mécano-acoustique des vases semble donc particulièrement important.

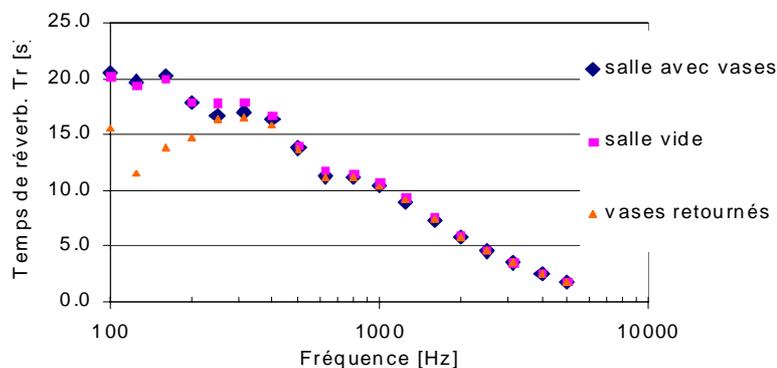


Figure 30 Mesurage de l'absorption de 30 vases ouverts puis retournés

Les résultats des mesurages aux basses fréquences¹⁸ des vases selon diverses configurations montrent (cf. Figure 31) que l'absorption augmente lorsque ceux-ci sont situés aux coins de la salle réverbérante. Cette conclusion confirme la pertinence de la tradition qui conduit souvent à disposer les vases acoustiques dans les angles des églises.

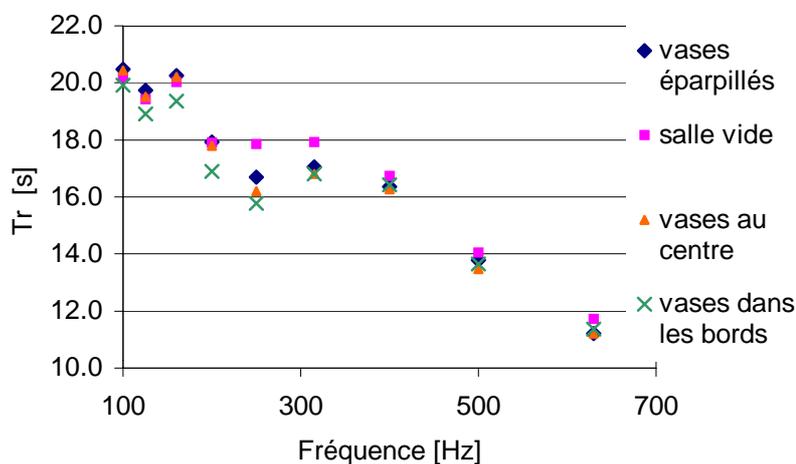


Figure 31 Mesure en chambre réverbérante de 30 vases dans diverses configurations

Pour étudier plus précisément l'absorption autour de la fréquence de résonance, nous avons effectué des mesurages en bande fine (10 Hz) en utilisant les fréquences comprises dans les bandes de 1/3 d'octave centrées à 250 et 315 Hz. Nous constatons (cf. Figure 32) que la courbe théorique et la courbe des valeurs mesurées présentent toutes deux une forme gaussienne, mais elles sont décalées

¹⁸ Aux fréquences supérieures à 630 Hz les temps de réverbération deviennent identiques

en fréquence et n'ont pas la même amplitude. Ces remarques s'expliquent par la fabrication artisanale des vases qui induit des variations de leur fréquence de résonance. La moyenne des fréquences de résonance a été calculée à $f_r \text{ moyenne} = 276 \pm 11 \text{ Hz}$. La différence entre les fréquences de résonance des vases utilisés explique également la forme plus aplatie de la courbe mesurée. Vu que la fréquence de résonance moyenne des vases est plus faible que la fréquence de résonance du vase témoin (307 Hz), la valeur mesurée de l'air d'absorption moyenne des vases de type 2 ($A_a=0.05 \text{ m}^2$) est légèrement supérieure à la valeur théorique ($A_a=0.43 \text{ m}^2$).

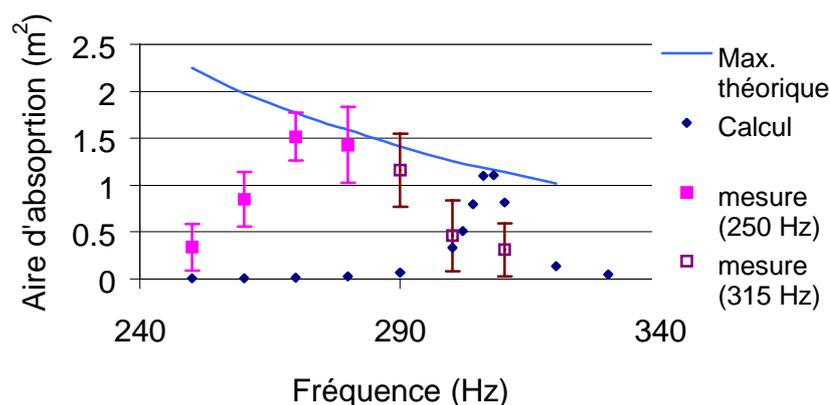


Figure 32 Mesurage de l'aire d'absorption des 30 vases autour de leur fréquence de résonance

Ne disposant pas de nombre suffisant de copies pour les autres types de vases, nous avons calculé les valeurs théoriques de leur section efficace d'absorption à la fréquence de résonance des vases.

Tableau 6 Sections efficaces d'absorption théoriques des divers vases.

vase No	Col	Cavité	$A_a \text{ (m}^2\text{)}$	\pm erreur
1	droit	standard	0.033	0.001
2	droit	standard	0.043	0.002
3	court	standard	0.015	0.001
4	ouvert	standard	0.021	0.001
5	ouvert	standard	0.089	0.003
6	court	standard	0.015	0.0005
7	court	cylindrique	0.008	0.0002
8	ouvert	standard	0.023	0.001

Nous constatons (cf. Tableau 6) que les sections efficaces d'absorption sont faibles, particulièrement pour les vases à col court et lorsque la fréquence de résonance est élevée. Ceci s'explique par des pertes par viscosité le long du col beaucoup plus faibles que pour les vases ayant des cols assez longs.

4.2.3.2.6 Variation de pression à l'intérieur d'un vase

4.2.3.2.6.1 Modes propres

Pour déterminer les modes propres d'un vase, on mesure la réponse fréquentielle de la même manière que pour la mesure de la fréquence de résonance, mais avec le micro au fond du vase, où l'on a un nœud de vitesse et un ventre de pression. Les maxima obtenus pour le niveau de pression correspondent à la fréquence de résonance et aux harmoniques supérieurs (cf. Figure 33).

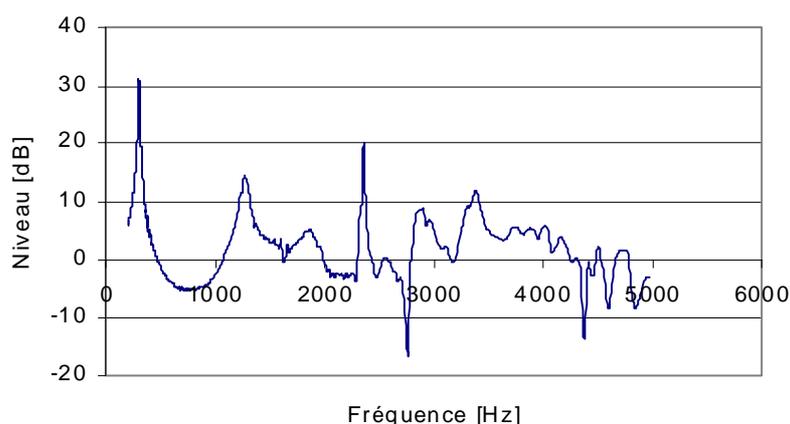


Figure 33 Réponse au fond du vase 2 pour en déterminer les modes propres

On peut alors calculer, à partir des fréquences ainsi déterminées, les rapports au mode fondamental et à la longueur du tuyau équivalent

Tableau 7 Fréquences des modes propres du vase 2 et longueur d'un tuyau équivalent

f (Hz)	$n_{\text{mes}} = f/297$	$n_{\text{thé}}$	L (m)
297	1.0	1	0.285
1260	4.2	3	0.200
1870	6.3	5	0.227
2350	7.9	7	0.253
2900	9.8	9	0.260
3370	11.3	11	0.280

On constate (cf. Tableau 7) que pour le mode fondamental, la longueur L du tuyau équivalent correspond approximativement à la longueur effective du vase 2, soit 0.27 m (20 cm plus la correction de bout). Les valeurs de la fréquence qui aux premiers harmoniques supérieurs ($n = 3$ et 5) sont plus élevées que celles obtenues pour un tuyau. Cette différence va cependant en diminuant puisque qu'au dernier mode analysé ($n_{\text{thé}} = 11$) on trouve $n_{\text{mes}} = 11.3$. Le vase se comporte comme si la correction de bout dépendait de la fréquence. Ces conclusions sont confirmées par des mesurages analogues sur le vase 8.

4.2.3.2.7 Variation de pression à l'intérieur d'un vase

Pour expliquer ce résultat, on peut préciser les mesurages en évaluant la variation de pression dans le vase lorsque ce dernier est excité par un son pur correspondant à une fréquence propre. Pour effectuer ces mesures, on déplace simplement un micro à différentes profondeurs dans l'axe d'un vase.

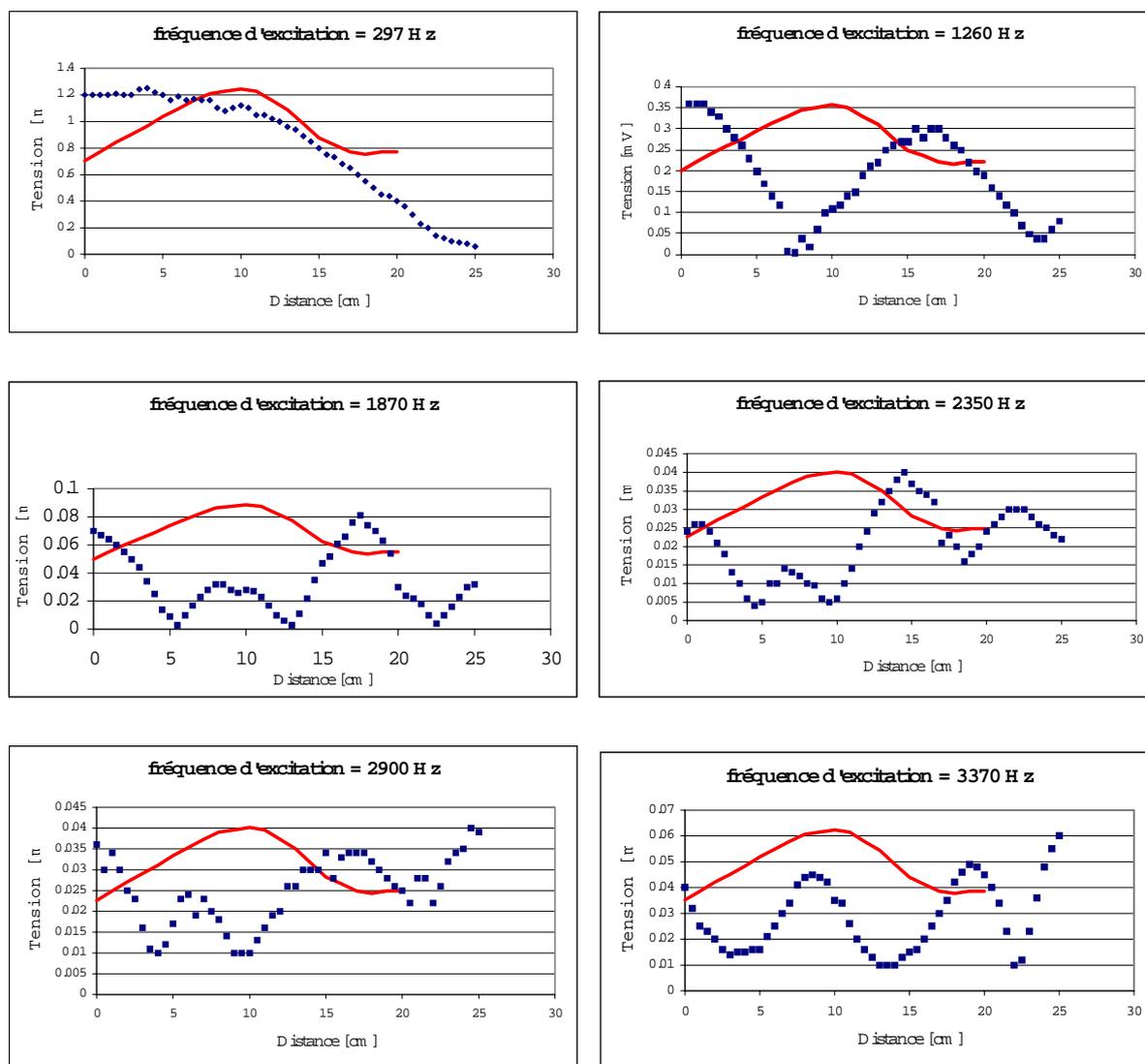


Figure 34 Variation de pression dans le vase 2 aux fréquences propres (la ligne en trait plein représente l'approximation de la forme du vase)

On constate (cf. Figure 34) que les quatre premières fréquences analysées (297 Hz, 1260 Hz, 1870 et 2350 Hz) correspondent assez bien aux modes $n=1, 3, 5$ et 7 (soit 1, 2, 3 et 4 pics) pour un tuyau fermé à un bout d'une longueur d'environ 25 cm. Pour

les fréquences plus élevées (2900 Hz et 3370 Hz), la correspondance avec les modes 9 et 11 est moins évidente.

Pour vérifier plus précisément la correspondance des résultats de mesurages avec la théorie développée pour les vases acoustiques, il faut résoudre l'équation d'onde différentielle (cf. §4.2.2.4.7.2) en modélisant la section $S(x)$ du vase. On constate (cf. Figure 35) que l'utilisation d'un polynôme de degré 4 pour cette modélisation permet d'obtenir une estimation théorique déjà satisfaisante.

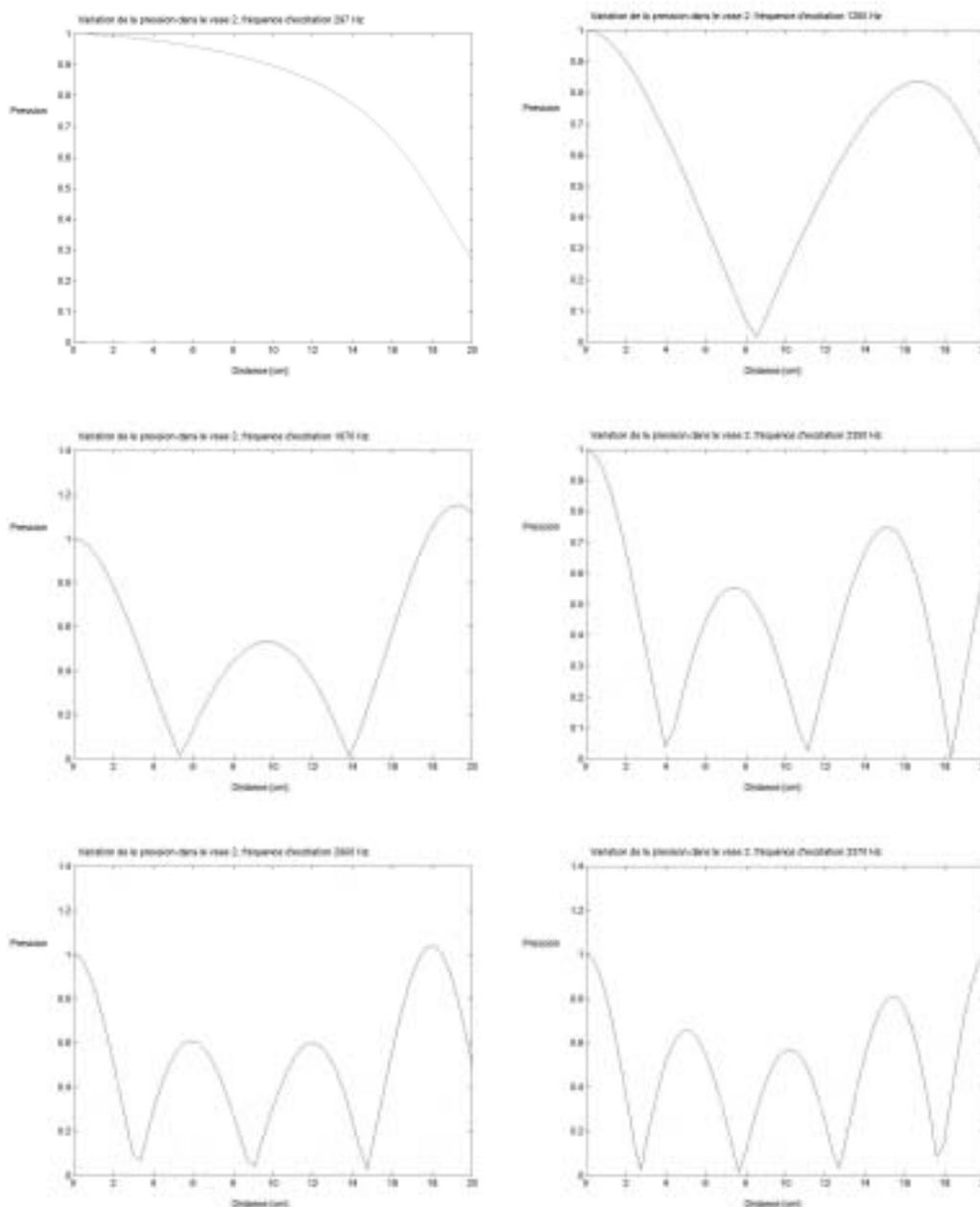


Figure 35 Modélisation théorique de la variation de pression à l'intérieur d'un vase aux fréquences propres

Les quatre premiers graphiques correspondent très bien aux valeurs mesurées. Pour ces quatre premiers modes, la théorie, basée sur l'équation d'onde, explique non seulement le nombre et la position des maxima observés expérimentalement mais également les différences d'amplitude entre eux. Pour les modes supérieurs (mode 9 et 11), le mauvais accord avec les données expérimentales (cf. Figure 34) s'explique par le fait que le domaine fréquentiel concerné (2.9 kHz et 3.37 kHz) sort de celui imposé par les hypothèses considérées¹⁹.

4.2.3.2.7.1 Changement de la réponse des vases

D'après ce qui précède, la réponse d'un vase doit varier suivant la position du microphone dans ou à l'extérieur du vase.

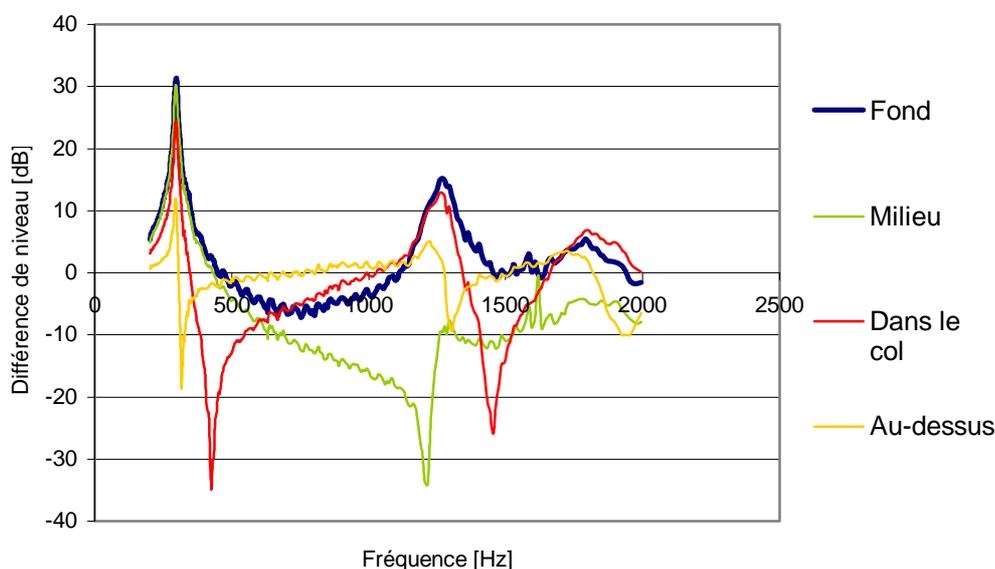


Figure 36 Réponse fréquentielle avec diverses positions de microphone dans le vase 2

En effectuant la mesure de la réponse à différentes profondeurs d'un vase, on constate effectivement (cf. Figure 36) une variation de la position des maxima et minima. On peut remarquer la décroissance du niveau de pression acoustique en s'éloignant du fond du vase pour une fréquence de 297 Hz, en accord avec les mesures de pression à l'intérieur du vase. Les minima observés (pics négatifs), d'abords au-dessus du vase, dans le col puis au milieu à mesure que la fréquence augmente peuvent être expliqués par le déplacement du premier minimum de pression. Celui-ci se trouve au-dessus du vase pour le mode fondamental et se rapproche du centre du vase pour le premier harmonique. Cette remarque permettra d'optimiser par la suite la position des mesurages.

¹⁹ les longueurs d'onde considérées deviennent plus petites que les dimensions des vases

4.2.3.2.8 Signal réémis

Pour analyser le rayonnement d'un vase, on excite celui-ci par un bruit (son pur ou bruit rose) de courte durée et on mesure, dans la chambre anéchoïque de l'EPFL, la réponse à l'ouverture du vase après la disparition du signal d'excitation. L'analyse par un logiciel de traitement de données (CoolEdit Pro) porte ensuite sur la structure temporelle et fréquentielle du signal réémis. Les mesurages qui suivent concernent le vase 2.

4.2.3.2.8.1 Son pur

Lorsque le signal d'excitation est un son pur accordé à la fréquence de résonance (297 Hz pour le vase 2), le signal réémis par le vase contient une forte composante à la fréquence de résonance ainsi qu'une contribution plus faible à 1260 Hz qui correspond au deuxième mode du vase. On observe également la disparition de contributions harmoniques (600, 900, 1200 Hz), issues des phénomènes de distorsion du haut-parleur.

A la coupure du signal, on remarque au niveau temporel un changement de phase du signal (cf. Figure 37).

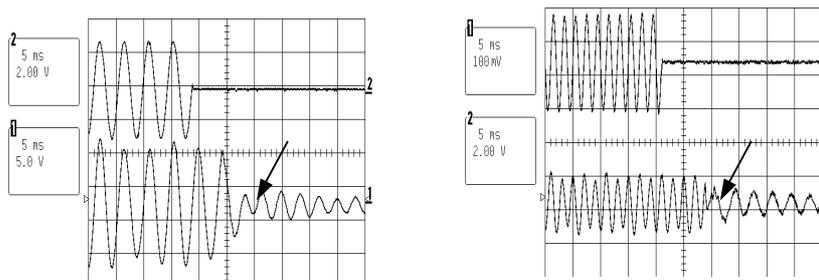


Figure 37 Réponse temporelle du vase 2 à la coupure du signal d'excitation à 125 et 500 Hz (les flèches indiquent le changement de phase)

Lorsque la fréquence du signal d'excitation (par exemple 500 Hz) est différente de la résonance du vase, le signal temporel après la coupure du signal, montre (cf. Figure 37) en plus d'un changement de phase, un changement fréquentiel du signal. L'analyse de la réponse fréquentielle met en effet en évidence (cf. Figure 38) en plus de la composante émise (pic à 500 Hz) des contributions aux fréquences propres du vase situées en dessous (297 Hz pour le mode fondamental) et en dessus (1260 et 1870 Hz) de cette fréquence, ainsi que des pics étroits, correspondant aux multiples de la fréquence émise (1000, 1500 et 2000 Hz) et issus de la distorsion du haut-parleur. On observe également des minima qui correspondent, comme nous l'avons vu précédemment, à des nœuds de pression au niveau de l'ouverture du vase juste après ses fréquences propres.

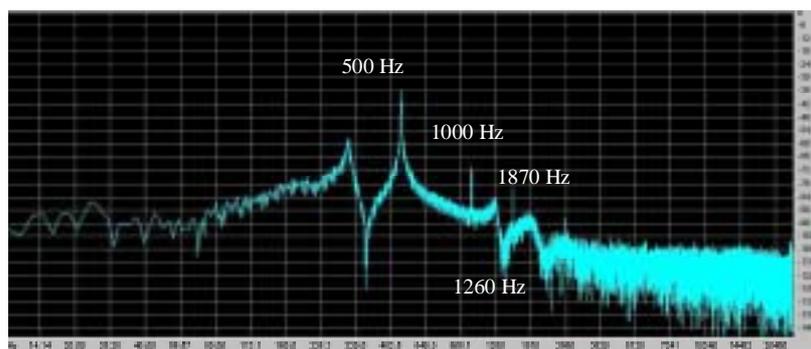


Figure 38 Réponse fréquentielle avec un signal d'excitation à 500 Hz

L'évolution temporelle de la réponse fréquentielle peut être mise en évidence par l'analyse du sonogramme (cf. Figure 39) qui permet de mettre en évidence le fait que l'on trouve momentanément une composante à la fréquence de résonance (297 Hz) peu après le début de l'excitation. Le régime excitateur semble ensuite prendre le dessus et on retrouve la fréquence de résonance du vase lorsque l'excitation est coupée. Ce phénomène s'explique par les propriétés des oscillateurs forcés qui présentent, à la fréquence de résonance, une décroissance exponentielle du niveau de pression acoustique avec le temps.

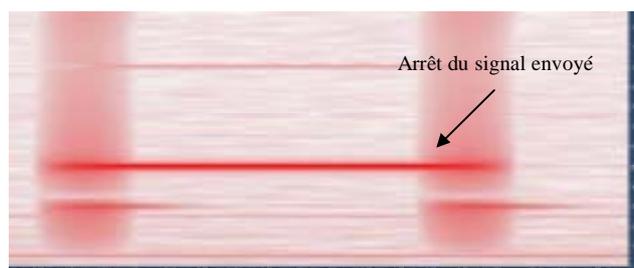


Figure 39 Sonogramme avec un signal d'excitation à 500 Hz

Lorsque la fréquence d'excitation devient élevée (par exemple 1100 Hz) on observe une faible composante à la fréquence de résonance (297 Hz) et une contribution plus importante au deuxième mode du vase (1260 Hz).

4.2.3.2.8.2 Bruit rose

Lorsque le signal d'excitation est un bruit rose, on observe après l'apparition et encore plus après l'extinction du signal d'excitation, comme avec les sons purs, la présence de la fréquence de résonance du vase (297 Hz) ainsi que ses harmoniques impaires (1260, 1870 et 2350 Hz, cf. Figure 40 et Figure 41).

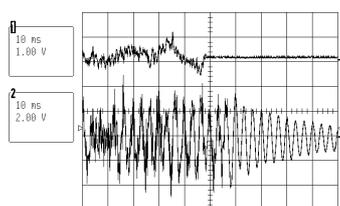


Figure 40 Réponse temporelle du vase 2 à la coupure du bruit rose

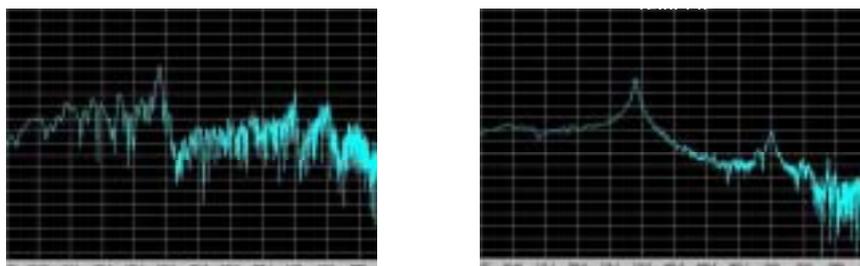


Figure 41 Réponse fréquentielle pendant et après l'excitation par un bruit rose

4.2.3.2.8.3 Rayonnement à différentes positions

Les mêmes mesures ont été répétées avec le micro non plus à l'ouverture mais au milieu et au fond du vase (cf. Figure 42).

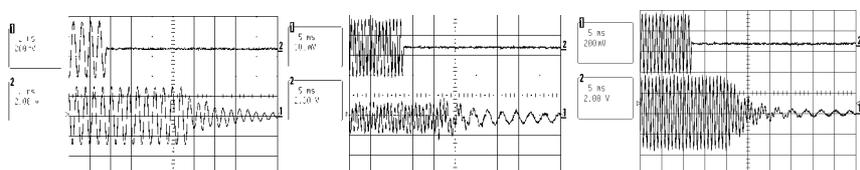


Figure 42 Réponse temporelle à la coupure de l'excitation (1200 Hz) à l'ouverture, au milieu et au fond du vase

Selon la position du micro, on constate que l'on favorise l'une ou l'autre des fréquences propres du vase, ce qui confirme les conclusions de l'expérience sur les variations de pression à l'intérieur des vases. Ainsi à l'ouverture du vase, on est à un endroit où la fréquence de résonance n'est pas au niveau le plus élevé, alors que, pour le deuxième mode, on est proche d'un maximum. Au centre du vase, les situations sont inversées. Remarquons enfin que l'on n'observe pas toujours d'importants changements de phase, contrairement à l'affirmation de Leguy.

4.2.3.2.9 Rayonnement

Pour déterminer la distance d'efficacité²⁰ et le type de rayonnement (directivité spatiale) des vases cloisonnés, nous avons enfin procédé à des mesurages

²⁰ La distance d'efficacité est définie comme la distance à laquelle on n'observe plus de différence entre vase ouvert et vase fermé.

intensimétriques en chambre anéchoïque en évaluant la différence d'intensité rayonnée entre le vase 2 ouvert puis fermé à l'aide d'un bouchon en liège.

4.2.3.2.9.1 Distance d'efficacité

Pour déterminer la distance d'efficacité du vase 2, des mesurages ont été entrepris à diverses distances le long de l'axe normal à l'ouverture. Lorsque le signal d'excitation est à la fréquence de résonance, on constate (cf. Figure 43), à certaines distances, une augmentation de l'intensité rayonnée par le vase ouvert par rapport au phénomène de réflexion dans la situation avec le vase fermé. L'efficacité du vase croît rapidement avec la distance pour atteindre un maximum à une distance d'environ 10-15 cm du vase, puis elle diminue ensuite linéairement pour devenir nulle à environ 30 cm. A cette distance, comme à une distance proche du vase (<5 cm où les phénomènes de réflexion sont les plus importants), l'intensité rayonnée est la même que l'intensité réfléchie lorsque le vase est bouché. Lorsque le signal d'excitation est différent d'une fréquence propre du vase, celui-ci n'entraîne aucune variation de niveau de pression acoustique entre l'intensité rayonnée par le vase ouvert et celle réfléchie lorsqu'il est fermé.

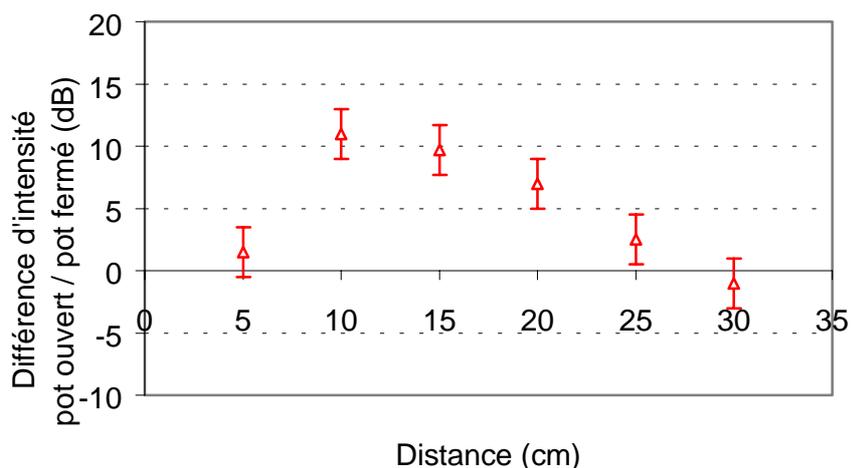


Figure 43 Rayonnement d'un vase en fonction de la distance perpendiculaire à l'ouverture

4.2.3.2.9.2 Type de rayonnement

Pour déterminer le type de rayonnement, des mesurages angulaires ont été entrepris en conservant une distance constante à l'ouverture de 20 cm. Lorsque le signal d'excitation est à la fréquence de résonance, nous constatons que l'intensité rayonnée par le vase est la même dans toutes les directions. Conformément aux prévisions théoriques, le vase se comporte donc comme une source secondaire omnidirectionnelle placée sur une paroi.

4.2.3.3 Conclusions des mesurages en laboratoire

Les mesures effectuées en laboratoire nous ont permis d'étudier les propriétés acoustiques des vases et de vérifier divers modèles théoriques.

Les mesurages des vases ont mis en évidence que le rayonnement d'un vase, qui apparaît au début et à la coupure de l'excitation est principalement composé de sa fréquence de résonance et dans une moindre mesure des modes supérieurs. La décroissance de ce rayonnement est exponentielle avec le temps.

L'analyse des facteurs de qualité a montré des valeurs relativement élevées (moyenne de 5.5) correspondant à une grande sélectivité en fréquence. Il est donc important de pouvoir déterminer la fréquence de résonance avec une bonne précision. En effet, l'absorption sonore très sélective (bande de 20-30 Hz) tolère une erreur inférieure à 7 % sur la détermination de cette fréquence. Les fréquences de résonance mesurées pour les vases (de 237 à 444 Hz) sont cependant assez bien prédites par les divers modèles utilisés. L'erreur moyenne est de 7.1 % (avec un écart type de $\pm 7.6\%$) pour la formule classique mais se réduit à -0.05 % (avec un écart type de $\pm 5.9\%$) si on optimise le choix des paramètres ($\varepsilon = 1.78$). La formule de Alster présente une erreur de 0.04 % (avec un écart type de $\pm 2.7\%$) avec une modélisation cylindrique et 2.4 % (avec un écart type de $\pm 8.1\%$) avec une modélisation sphérique.

Les textes historiques prêtent aux vases des propriétés amplificatrices qui n'ont pas été observées. En effet, d'après les mesures effectuées, le rayon d'action d'un vase, c'est-à-dire la distance maximale à laquelle on note un changement d'intensité entre vase ouvert et fermé, est de 30 cm pour le vase 2 à la fréquence de résonance. A des fréquences différentes d'une fréquence propre, le vase n'entraîne pas d'augmentation de niveau sonore. Le rayonnement réémis par le vase à sa fréquence de résonance est omnidirectionnel. Il semble, par conséquent, peu probable qu'un effet d'amplification soit observable dans une église. La focalisation d'une coupole (réflexion sur un point précis de la salle) pourrait être diminué par l'effet de diffusion des vases.

Les mesurages d'absorption en salle réverbérante ont mis en évidence de faibles valeurs, très sélectives en accord avec la théorie. L'absorption d'un vase peut être optimisée et devenir significative aux basses fréquences ($f < 200$ Hz). Le temps de réverbération très court des vases (env. 0.2 s) permet d'envisager un abaissement localisé de l'EDT et une augmentation de la clarté. L'absorption très sélective ainsi que le rayonnement omnidirectionnel pourraient provoquer une élimination partielle d'un mode propre de la salle. Cette utilisation demande cependant un « accordage » et du vase sur la salle et un positionnement judicieux.

Toutes ces caractéristiques tendent plutôt à améliorer l'intelligibilité dans une salle. Les mesures in situ nous permettront, par la mesure de différents paramètres de vérifier ou d'infirmer ces hypothèses.

4.2.4 Mesurages in situ

4.2.4.1 Méthodologie

Afin de mettre en évidence l'efficacité acoustique de ces dispositifs, des mesurages acoustiques ont été réalisés dans les églises vaudoises de Villette et de Syens dont les vases acoustiques, facilement accessibles mais peu nombreux, ont fait récemment l'objet de relevés archéologiques [37] qui en détaillent la forme, la composition et la position.

Les mesurages ont été effectués à l'aide d'un système MLSSA qui utilise une séquence MLS (Maximum Length Sequence). Cette méthode permet de déterminer différents paramètres acoustiques (TR, EDT, STI, C50, etc.) à partir de l'évaluation de la réponse impulsionnelle de la salle pour une position source/micro. Afin de réduire les temps de mesurages, ceux-ci ont été effectués de façon asynchrone à l'aide de deux enregistreurs DAT Casio DA-7, le dépouillement étant effectué en laboratoire. De cette manière, les conditions lors des mesures (humidité et température) restent relativement stables. Le principe de mesure est d'envoyer un signal pseudo-aléatoire MLS avec le premier enregistreur DAT et un haut-parleur. La réponse est enregistrée à l'aide du deuxième enregistreur DAT aux diverses positions de mesurages dans l'église. Les vases sont obturés à l'aide de bouchons en liège qu'une ficelle permet d'enlever rapidement pour permettre des mesures dans des conditions semblables avec les vases ouverts et fermés. Une moyenne sur six mesures a été réalisée en chaque position de mesurage.

Des mesures de niveau de pression acoustique par bandes de 1/3 d'octave, entre 10 et 70 cm d'un vase ouvert et fermé, ont également été effectuées à l'aide d'un sonomètre Rion NA-27. Le signal d'excitation est un bruit à large bande, afin de se rapprocher du spectre de la parole, très différent d'un signal sinusoïdal.

4.2.4.2 Eglise de Villette

L'église et ses vases ont été décrits précédemment (cf. §4.2.1.2.3.2).

4.2.4.2.1 Fréquence de résonance

Pour des questions théoriques, le système de mesure MLSSA ne permet pas d'obtenir une grande précision pour la détermination de la fréquence de résonance en basses fréquences. Le second mode, souvent beaucoup plus marqué, a donc parfois été utilisé pour déterminer une valeur de la fréquence de résonance. Le mauvais état de certains vases explique par ailleurs la difficulté de la mesure. La méthode utilisée en laboratoire (micro au fond d'un vase et excitation avec un son pur de fréquence variable) n'a malheureusement pu être mise en œuvre pour des raisons logistiques.

Nous constatons (cf. Tableau 8) que les résultats de mesurages de la fréquence de résonance des vases correspondent relativement bien aux valeurs théoriques calculées avec la formule classique. Seul le vase 3, qui possède un col court, a une fréquence de résonance plus élevée que la prévision théorique, ce qui s'explique

dans ce cas par l'erreur sur l'estimation de la correction de bout. Les calculs avec la formule de Alster avec les modélisations cylindriques (différence moyenne de $-6\% \pm 7\%$) et sphériques (différence moyenne de $-10\% \pm 10\%$) n'apportent pas d'amélioration dans l'estimation de la fréquence des vases sur place.

Tableau 8 Fréquences de résonance mesurées et calculées pour les vases de Villette

vase	col	cavité	fr _{mes.} (Hz)	$\pm \sigma$	fr _{clas} (Hz)	$\pm \sigma$	Différence (Hz)	Différence (%)	
1	ouvert	standard	268	10	258	20	-10	-4	
2	ouvert	cylindrique	261	10	275	21	14	5	
3	court	standard	207	10	177	15	-30	-17	
4	droit	cylindrique	253	10	237	18	-16	-7	
							Moyenne	-10	-6
							Écart type	18	9

4.2.4.2.2 Absorption

Malgré l'impossibilité de faire des mesurages sur place, la section efficace d'absorption, le facteur de qualité ainsi que le temps de réverbération ont été calculés pour chaque vase pour en estimer les performances (cf. Tableau 9).

Tableau 9 Absorption et réverbération des vases de l'église de Villette

vase	col	cavité	A (m ²)	$\pm \sigma$	Q	$\pm \sigma$	Tr (s)	$\pm \sigma$
1	ouvert	standard	0.080	0.001	3.7	1.0	0.20	0.01
2	ouvert	cylindrique	0.066	0.001	3.6	1.0	0.18	0.01
3	court	standard	0.281	0.003	4.0	2.8	0.31	0.04
4	droit	cylindrique	0.176	0.002	5.5	2.3	0.32	0.02

Les valeurs du facteur de qualité et du temps de réverbération sont semblables à celles calculées pour les vases utilisés en laboratoire. La section efficace d'absorption, par contre, est plus élevée, en particulier pour les vases 3 et 4 qui possèdent des fréquences de résonance plus basses que celles des pots étudiés en laboratoire. D'autre part, nous avons vu que le cloisonnement des vases entraînait une augmentation de la valeur de la section efficace d'absorption.

4.2.4.2.3 Niveau sonore

En laboratoire, une légère augmentation de l'intensité a pu être mise en évidence localement pour la fréquence de résonance du vase. Dans l'église, aucune différence significative n'a pu être mise en évidence quelle que soit la distance (cf. Figure 44). Cela s'explique par la sélectivité en fréquence du vase (seules les fréquences de résonance du vase sont amplifiées) et le dispositif de mesurages large bande utilisé (émission d'un signal MLS et analyse par tiers d'octave). Seule une analyse en bande fine, en particulier autour de la fréquence propre du vase, permettrait éventuellement de mettre en évidence des phénomènes d'amplification localisés.

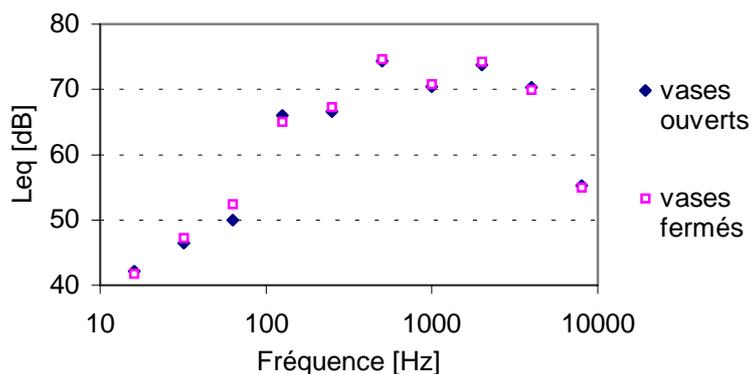


Figure 44 Niveaux sonores à Villette dans les deux configurations

4.2.4.2.4 Clarté C50

Les mesures sont prises à différents emplacements dans l'église à une hauteur de 1.50 m du sol (mis à part la position 1 qui se situe au niveau des vases à 4 m de hauteur; cf. Figure 45).

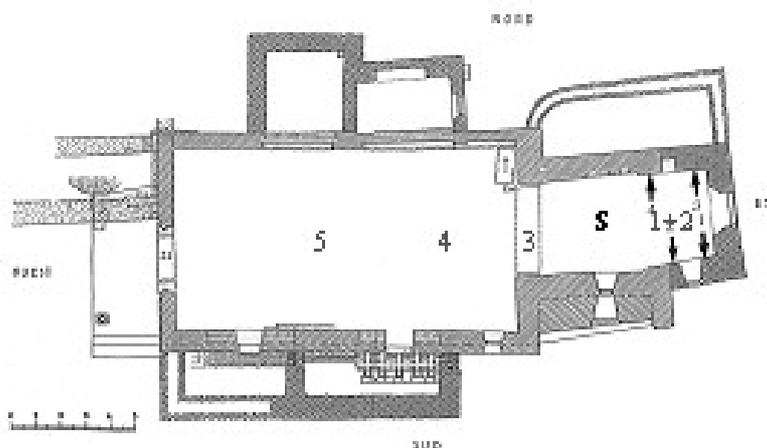


Figure 45 Emplacement des mesurages à Villette

Les résultats de mesurages mettent en évidence une faible action des vases proches dans une zone rapprochée (cf. Figure 46). En effet, les valeurs du paramètre C50 pour les bandes de 250 et 500 Hz (où se trouvent les fréquences de résonance des vases) sont légèrement plus faibles lorsque les vases sont ouverts en particulier en position 1 (à la hauteur des vases).

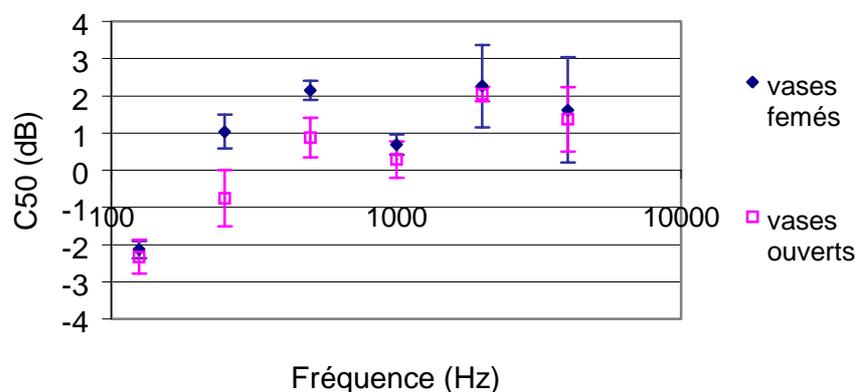


Figure 46 C50 à la hauteur des vases (position 1 – église de Villette) dans les deux configurations

Dans les autres positions dans le chœur, un abaissement un petit peu moins marqué est observé. Dans la nef, par contre, aucune différence ne peut être mise en évidence.

L'abaissement du C50 peut être expliqué par le rôle de sources secondaires et donc de diffuseurs que jouent les vases. En effet, l'introduction de sources secondaires aurait tendance à générer un retard dans l'énergie qui arrive au micro et ainsi à diminuer la grandeur C50. Notons que la diminution du C50 conduit plutôt à une diminution de l'intelligibilité.

4.2.4.2.5 Intelligibilité (STI)

Les résultats des mesures de l'indice d'intelligibilité STI (Speech Transmission Index), calculés à partir de la réponse impulsionnelle, sont présentés dans le Tableau 10.

D'une manière générale, on remarque un très faible abaissement des deux coefficients du STI lorsque les vases sont ouverts. Cette diminution n'est pas plus significative dans le chœur que dans la nef et l'écart est compris dans les incertitudes de mesurages.

Tableau 10 Intelligibilité (STI) avec les vases ouverts puis fermés.

Emplacement	STI vases fermés	$\pm \sigma$	STI vases ouverts	$\pm \sigma$	Différence
1	0.56	0.032	0.54	0.014	-0.02
2	0.54	0.018	0.53	0.056	-0.01
3	0.46	0.013	0.45	0.021	-0.01
4	0.37	0.028	0.36	0.020	-0.01
5	0.35	0.004	0.32	0.038	-0.03
Moyenne					-0.02
Ecart type					0.01

4.2.4.2.6 Temps de Réverbération.

Les résultats de mesurages ne montrent pas une diminution significative du temps de réverbération précoce EDT (Early Decay Time). La diminution de l'EDT, lorsque les vases sont ouverts, est à peine observable (elle se situe à la limite de l'audibilité) à la position 2 dans les bandes de 500 et 1000 Hz (cf. Figure 47).

Quasiment aucune différence n'est observée aux autres positions auxquelles ont été prises les mesures. Le nombre de vases est probablement insuffisant pour que les effets d'absorption et de réverbération puissent être audibles.

Il en est de même pour le temps de réverbération où aucun effet des vases n'a pu être mis en évidence. L'effet de lissage temporel, observé par Floriot [16], n'a également pas pu être mis en évidence.

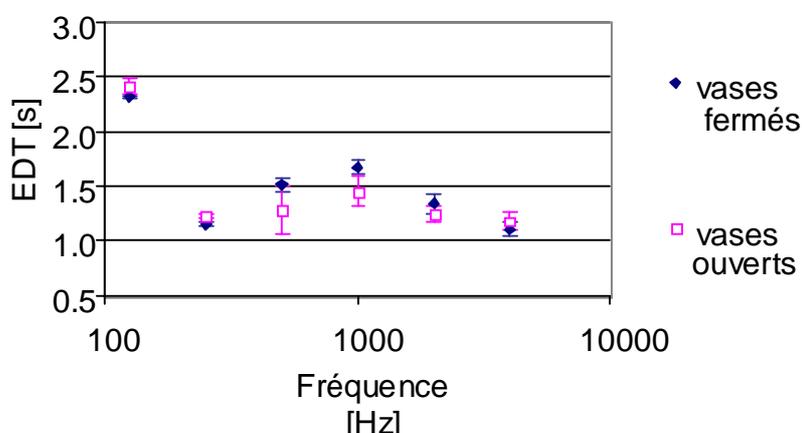


Figure 47 EDT en position 2 (église de Villette) dans les deux configurations

Dans cette église, la présence des vases, malgré parfois leurs bonnes caractéristiques d'absorption sonore, n'entraîne, au niveau des observations, qu'une faible baisse de la clarté dans une zone localisée au niveau spatial (proche des vase) et temporel (près des fréquences de résonance).

4.2.4.3 Eglise de Syens

L'église et ses vases ont été décrit précédemment (cf. §4.2.1.2.3.1).

4.2.4.3.1 Fréquence de résonance

Vu le temps de réverbération plus sec du chœur de cette église, la fréquence de résonance des vases fut plus facile à mesurer avec le système MLSSA (sauf pour le vase 3 qui est cassé et n'a plus de fond).

Tableau 11 Fréquences de résonance mesurées et calculées pour les vases de Syens

vase	col	cavité	fr _{mes.} (Hz)	± σ	fr _{clas} (Hz)	± σ	Différence (Hz)	Différence (%)	
1	ouvert	sphérique	256	10	251	19	-5	-2.0	
2	court	sphérique	270	10	266	21	-4	-1.5	
3	droit	sphérique	-	-	316	24	-	-	
4	ouvert	sphérique	365	10	371	28	6	1.6	
							Moyenne	-1.0	-0.6
							Ecart type	6.1	2.0

On constate (cf. Tableau 11) que les résultats de mesurages de la fréquence de résonance des vases correspondent relativement bien aux valeurs théoriques calculées avec la formule classique qui donne une erreur inférieure à 2%. Les calculs avec la formule de Alster avec les modélisations cylindriques (différence moyenne de 3.2% avec un écart type de ± 1.8%) et sphériques (différence moyenne de -4.7 % avec un écart type de ± 1.7%) donnent dans ce cas une moins bonne estimation de la fréquence des vases.

4.2.4.3.2 Absorption

Malgré l'impossibilité de faire des mesurages sur place, la section efficace d'absorption, le facteur de qualité ainsi que le temps de réverbération ont été calculés pour chaque vase de Syens pour en estimer les performances (cf. Tableau 12).

Tableau 12 Absorption et réverbération des vases de l'église de Syens

vase	col	cavité	A (m ²)	± σ	Q	± σ	T _r (s)	± σ
1	ouvert	standard	0.12	0.0012	4.8	1.3	0.27	0.011
2	ouvert	cylindrique	0.06	0.0005	2.8	1.2	0.15	0.010
3	court	standard	0.03	0.0002	2.3	0.7	0.10	0.005
4	droit	cylindrique	0.01	0.0001	1.9	0.7	0.07	0.004

A l'exception du vase 1, les performances d'absorption et le facteur de qualité sont moins bonnes que pour ceux de l'église de Villette ce qui s'explique partiellement par des fréquences de résonance plus élevées.

4.2.4.3.3 Clarté C50

Les mesures ont été prises à cinq positions de l'église :

1. au milieu du chœur à la hauteur des vases (environ 4 m),
2. au milieu du chœur au sol,
3. entre le chœur et la nef,
4. dans la nef, au niveau du premier banc,
5. dans la nef, au niveau du cinquième banc.

A l'exception d'une faible augmentation (de l'ordre de 1 dB) du C50 au début de la nef (position 4) dans la bande d'octave centrée sur 250 Hz (qui contient les fréquences propres des vases), les résultats de mesurages de clarté dans l'église de Syens ne montrent aucune différence significative entre la situation avec les vases ouverts et celle avec les vases fermés (cf. Figure 48). Ce faible effet des vases s'explique d'une part par leur faible nombre et d'autre part par leurs mauvaises performances acoustiques (cf. Tableau 12).

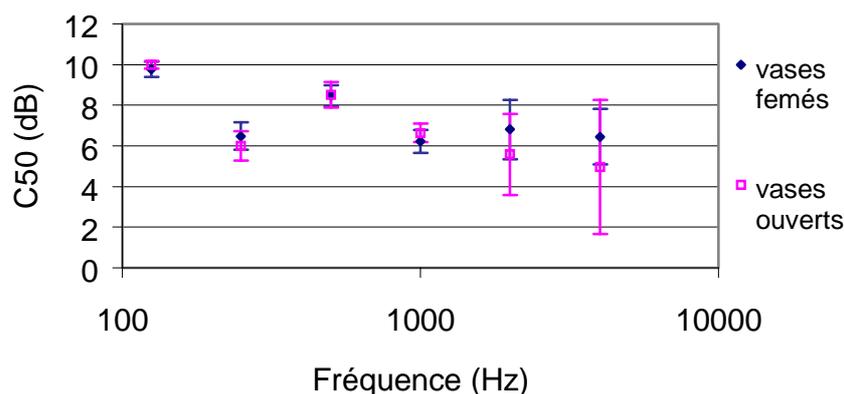


Figure 48 C50 dans la nef (position 4, église de Syens) pour les deux configurations

4.2.4.3.4 Intelligibilité (STI)

Les résultats des mesurages du STI (Speech Transmission Index) ne montrent aucune variation significative avec l'ouverture des vases qui semble plutôt diminuer l'intelligibilité (cf. Tableau 13)

Tableau 13 STI dans les 2 configurations, vase ouverts et fermés.

Emplacement	STI vases fermés	$\pm \sigma$	STI vases ouverts	$\pm \sigma$	Différence
1	0.61	0.032	0.61	0.014	0
2	0.65	0.018	0.64	0.056	-0.01
3	0.54	0.013	0.54	0.021	0
4	0.43	0.028	0.41	0.020	-0.02
5	0.44	0.004	0.42	0.038	-0.02
				Moyenne	-0.01
				Ecart type	0.01

4.2.4.3.5 Temps de réverbération

Les résultats de mesurages ne permettent pas de déceler un effet de l'ouverture des vases sur le temps de réverbération. Les valeurs du TR20 ou de l'EDT restent inchangées avec l'ouverture des vases (cf. Figure 49).

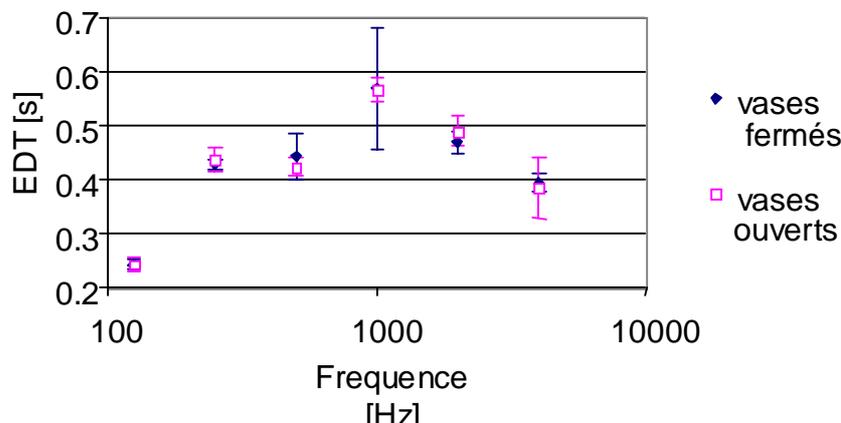


Figure 49 EDT à Syens dans les deux configurations

4.2.4.4 Conclusion des mesurages in situ

La fréquence de résonance des vases acoustiques ($f_r = 207$ à 365 Hz) mesurée dans les églises de Villette et Syens correspond bien aux prévisions faites par la formule classique, celle d'Alster donnant de moins bons résultats. La section d'absorption des vases (de 0.01 à 0.281 m²) augmente lorsque la fréquence de résonance diminue. Nos résultats de mesurages sur les caractéristiques acoustiques des églises dans lesquelles des vases acoustiques ont été mis en place au Moyen Age tendent cependant à montrer qu'ils n'ont pas d'effet significatif dans les deux cas mesurés. Mis à part une faible baisse de la clarté C50 (et dans une moindre mesure de l'intelligibilité STI), localisée en fréquence (autour de la fréquence de résonance) et dans l'espace (près des vases) dans l'église de Villette, aucune différence notable n'a été observée avec l'ouverture des vases. Les variations minimales observées ne suffisent pas à mettre en évidence une différence audible entre les configurations vases ouverts et fermés.

Il faut être cependant prudent de ne pas conclure trop vite à l'inefficacité des vases acoustiques mis en place dans les églises. L'efficacité de ces dispositifs dépend en effet du nombre des vases, de leur disposition, ainsi que des caractéristiques de l'édifice. Les deux églises étudiées dans le cadre de cette recherche sont petites (830 m³ pour Villette et 990 m³ pour Syens) et ne comportent chacune que 4 vases (soit 1 vase pour 200 - 250 m³). L'étude de Floriot [28] a montré qu'une église possédait en moyenne 25 vases ce qui est encore le cas de Grandson dont les 27 vases sont cependant difficilement accessibles. Ces résultats expérimentaux donnent donc uniquement des conclusions sur les cas particuliers étudiés mais ils ne permettent pas d'infirmier l'utilité des vases dans un cadre général. En effet, sur la base de nos investigations en laboratoire, il est fort possible que l'utilisation de vases, correctement positionnés et dimensionnés, puisse améliorer l'acoustique de certaines églises.

4.2.5 Conclusion sur les vases acoustiques

Les vases acoustiques, qui ont été insérés dans les murs et les voûtes des églises au Moyen Age pour amplifier le chant et faire résonner la voix, se retrouvent dans une vingtaine d'édifices en Suisse dont quatre dans le canton de Vaud (Villette, Syens, Grange-Marnand et Grandson) ont fait l'objet de relevés archéologiques.

L'approche théorique nous a permis de comprendre les phénomènes physiques entrant en jeu dans le fonctionnement d'un vase acoustique qui est en fait un résonateur de Helmholtz de type particulier, présentant toutes les caractéristiques d'un oscillateur. Sur la base de diverses hypothèses explicitées, d'une caractérisation et d'une modélisation des vases (col et cavité), nous avons présenté les valeurs théoriques des principales grandeurs acoustiques (compliance, inductance, résistance, impédance, fréquence de résonance, facteur de qualité, variation de pression à l'intérieur d'un vase, absorption, diffusion et directivité). Nous avons en particulier recherché plusieurs expressions pour la fréquence de résonance, et montré les possibilités d'optimiser l'absorption sonore en fonction des conditions géométriques d'un vase.

Les mesures effectuées en laboratoire nous ont permis de mettre en évidence les propriétés acoustiques des vases et de vérifier divers modèles théoriques.

- Les fréquences de résonances mesurées pour les vases sont assez bien prédites par les divers modèles utilisés (classique et Alster avec modélisation sphérique, celle cylindrique donnant de moins bons résultats dans certains cas).
- Les facteurs de qualité ont montré des valeurs relativement élevées (moyenne de 5.5) correspondant à une grande sélectivité en fréquence.
- Le rayonnement d'un vase, qui apparaît au début et à la coupure de l'excitation est principalement composé de sa fréquence de résonance et dans une moindre mesure des modes supérieurs qui décroissent exponentiellement avec le temps.
- Le rayonnement d'un vase à sa fréquence de résonance, est omnidirectionnel mais présente un faible rayon d'action (env. 30 cm).
- La section d'absorption d'un vase est, en accord avec la théorie, faible, très sélective, mais peut être optimisée et devenir significative aux basses fréquences ($f < 200$ Hz).
- Le temps de réverbération des vases est très court (env. 0.2 s) et coïncide avec les prévisions théoriques.

Les résultats de mesurages dans les églises de Villette et Syens ont montré que :

- la formule classique est adaptée pour calculer la fréquence de résonance des vases acoustiques ($f_r = 207$ à 365 Hz).
- La section d'absorption des vases est relativement faible (de 0.01 à 0.281 m²) mais elle augmente généralement lorsque la fréquence de résonance diminue.
- Les vases acoustiques n'ont pas d'effet significatif sur les grandeurs acoustiques des églises dans les deux cas mesurés. Seule une faible baisse de la clarté C50 (et dans une moindre mesure de l'intelligibilité STI), localisée autour de la fréquence de résonance et près des vases dans l'église de Villette a été observée.

- Les deux églises étudiées comportent trop peu de vases (4) pour avoir un effet audible. L'efficacité de ces dispositifs dépend en effet du nombre des vases, de leur disposition, ainsi que des caractéristiques de l'édifice.

Sur la base de nos investigations en laboratoire et de résultats de mesurages in situ publiés dans la littérature, il est cependant avéré que l'utilisation de résonateurs de Helmholtz correctement positionnés et dimensionnés, peut améliorer l'acoustique de certaines églises,

- En diminuant le temps de réverbération en basses fréquences (effet d'absorption)
- En amplifiant localement le niveau sonore à certaines fréquences (effet d'amplification).
- En diminuant les effets de focalisation (d'une voûte ou d'une coupole) par les ondes réémises de façon omnidirectionnelle avec un certain retard (effet de diffusion).
- En diminuant les phénomènes d'onde stationnaire (effets de diffusion et d'absorption).
- En régularisant les transitoires (phénomène de diffusion).

Les résonateurs Helmholtz correctement dimensionnés sont encore largement utilisés pour corriger l'acoustique des locaux, notamment dans les studios de petite taille. Mentionnons enfin que les vases acoustiques, présentant de bonnes caractéristiques acoustiques, sont parfois à nouveau employés dans certaines églises récentes de conception traditionnelle²¹ [63].

²¹ L'architecte Le Donné a ainsi fait mettre en place en 1948 environ 2500 vases acoustiques dans son église Notre-Dame du Rosaire au Havre [61].

4.3 Chaires et abat-voix

4.3.1 Introduction

Nous avons vu que l'usage des vases acoustiques dans les églises avait pour fonction d'en améliorer la qualité acoustique, en particulier pour le chant. De même, diverses techniques ont été développées pour que la parole soit comprise le mieux possible. De tout temps, les orateurs, qui se sont adressés à des foules, dans des cadres aussi bien laïcs (sur l'agora, dans un amphithéâtre) que religieux (dans une synagogue, une église ou une mosquée) ont non seulement travaillé et adapté leur voix aux conditions de l'auditoire mais ils ont surtout choisi avec attention le lieu et les conditions locales pour déclamer leurs messages. La position de l'orateur et des fidèles a en effet une très grande importance pour l'intelligibilité. Nous avons déjà vu, lors du survol historique, quels lieux et conditions astucieux et efficaces les juifs des temps bibliques, puis Jésus à leur suite, avaient utilisés. Pour obtenir une bonne intelligibilité il faut que le son atteigne chaque auditeur directement, sans être trop atténué par les auditeurs situés devant lui, qui agissent comme autant d'écrans et d'absorbeurs d'énergie acoustique, ni trop réfléchi par des surfaces éloignées (en particulier le plafond²²) pour éviter des échos tardifs et une réverbération élevée. Le moyen le plus simple est de surélever l'orateur par rapport à son auditoire et de surmonter d'une surface réfléchissante, ce qui revient à utiliser une chaire, munie d'un abat-voix.

4.3.2 Evolution historique

4.3.2.1 Pupitre, ambon et jubé

Dans une synagogue, les fidèles sont assis autour d'un pupitre surélevé (appelé *bèma* ou "chaire de Moïse"), situé au milieu de la nef. La position centrée de ce pupitre, déjà utilisé par Salomon et Esdras²³, permet au prédicateur d'être proche de l'assemblée répartie autour de lui, et du fait de son élévation, évite que sa voix ne soit étouffée par elle. Ces deux aménagements permettent de réduire au minimum l'affaiblissement du niveau sonore de l'orateur (par effet de distance et d'atténuation par l'assemblée) et de favoriser la compréhension de la parole²⁴. De tels dispositifs furent utilisés pour propager l'Évangile par les apôtres qui prêchaient dans les synagogues.

²² L'effet perturbateur d'une réflexion tardive issue du plafond a notamment été mise en évidence par Sabine [64], qui affirme que dans certain cas "un écho très prononcé descend du plafond vers l'auditoire. Une forme de plafond en cintres pénétrants est manifestement peu désirable". Dans d'autre cas, "l'absence d'un écho prononcé venant du plafond assurera un caractère acoustique très satisfaisant".

²³ Il est mentionné dans les Paralipomènes (cf. Par. VI, et Eccles. III) que "Salomon fit une tribune d'airain, la plaça au milieu du temple, et se tenant debout dessus et étendant la main, il parlait au peuple de Dieu". Esdras fit aussi un degré de bois pour y parler et lorsqu'il y montait, il était élevé au-dessus du peuple (cf. Esd. 8) [65].

²⁴ On retrouve aussi dans les mosquées une forme de chaire avec le Minbar, d'où est prononcée la prière de l'imam [66-69].

Durant les premiers siècles, les évêques prêchaient depuis les *cathèdres* épiscopales situées dans l'abside des basiliques. Les lectures des Écritures étaient faites à l'ambon (cf. Figure 50), situé à l'entrée du chœur. Dès le Moyen Age, l'ambon²⁵, est progressivement incorporé dans le dispositif qui délimite le chœur [70]. A l'époque carolingienne, la clôture du chœur, qui jusque là permettait aux fidèles de s'appuyer avec les coudes pour communier, devient plus monumentale et marque plus clairement l'isolement de la communauté ecclésiale. L'ambon y est alors intégré et se situe au-dessus de ce jubé, sous la forme d'un ou deux lutrins de lecture, souvent tournés vers le chœur²⁶ (cf. Figure 51). Ce *pulpitum publicum*, duquel l'évêque s'adresse à l'assemblée [71], est ainsi à l'origine de la chaire-jubé supportée par des colonnes²⁷. Selon Horat [70], cette tribune-jubé fut utilisée par les lecteurs mais également par les chœurs de chantres et comme passage lors des jeux liturgiques durant les grandes fêtes. A partir du XII^e siècle, on introduit le prône, qui résume le message en langue vulgaire et qui a lieu entre la première partie de la messe et l'offrande eucharistique [72]. Jusqu'à l'apparition des chaires, situées dans la nef, le prône semble avoir été dispensé du haut du jubé (cf. Figure 51 et Figure 52).



Figure 50 Ambon de l'abbatiale de Romainmôtier (env. 753) [70]

²⁵ L'évêque Guillaume Durand de Mende (XIII^e siècle) mentionne [65] qu'on donne encore à ce pupitre le nom d'analogium, parce qu'on y lit et qu'on y prononce la parole de Dieu, car logos en grec veut dire la parole ou règle, on l'appelle aussi ambon (ambo) de ambiendo qui veut dire entourer, parce qu'il entoure comme d'une ceinture celui qui y monte. On retrouve encore de tels ambons à Saint-Maurice, Baulmes, Aoste et Romainmôtier.

²⁶ Deux lutrins en pierre, tournés vers le chœur, sont encore visibles dans l'église de Valère (XIII^e siècle, cf. Figure 51). Notons que si les lutrins sont dirigés vers le chœur, cela signifie que, de cette place, l'orateur s'adresse aux chanoines et non à l'assemblée des laïcs.

²⁷ Un tel aménagement a été réalisé notamment dans la cathédrale de Coire (1178-1208).

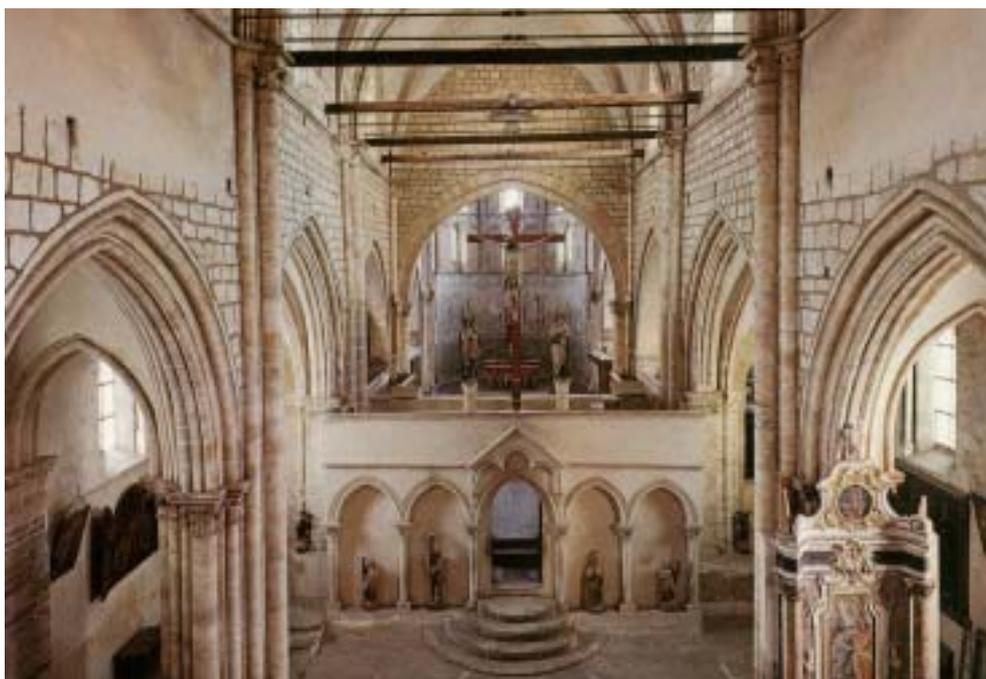


Figure 51 Jubé du XIIIe siècle de la cathédrale de Valère intégrant deux lutrins de lecture en pierre (orientés vers le chœur)

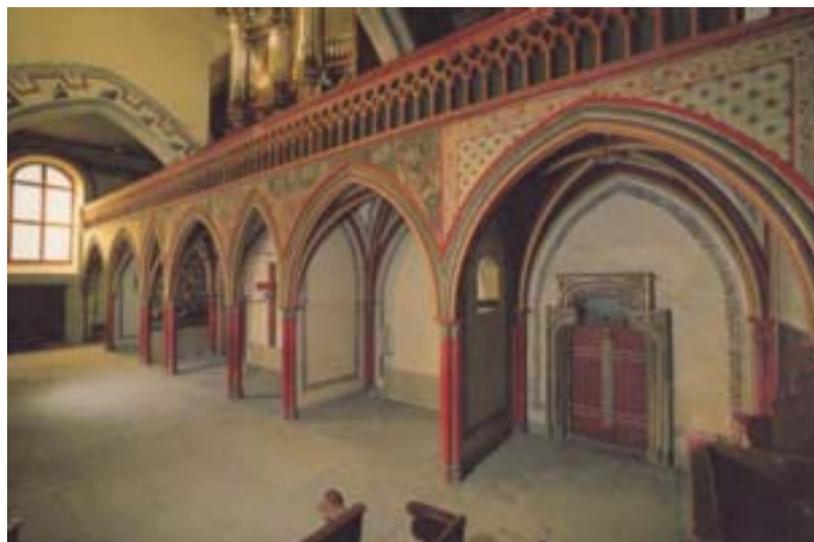


Figure 52 Jubé gothique de l'église française de Berne (ancien monastère dominicain env. 1269) [73]

Après la Réforme, les jubés furent souvent complétés par des murs, mais pour des raisons bien différentes des jubés traditionnels. Ces murs étaient alors plutôt destinés à condamner le chœur, devenu hors d'usage, et, dans certains cas²⁸, à supporter la chaire qui devient un élément central du culte (cf. Figure 53). Dans

²⁸ Zwingli fit ériger en 1526, pour des raisons d'organisation, un mur doté d'une chaire, en utilisant les pierres de l'ancien autel, sous l'arc triomphal du Grossmünster de Zürich.

certains cas, les protestants relient le jubé à la chaire préexistante²⁹. Ce n'est en général qu'au XIX^e siècle que les protestants éliminèrent les jubés. L'utilisation du jubé comme chaire à prêcher explique, peut-être en partie, la position frontale de la chaire dans les églises réformées, en particulier dans le bassin zurichois.



Figure 53 Chaire de Zwingli sur l'ancien jubé (à gauche). Ce modèle de chaire est repris dans l'église de St-Pierre à Zurich [74]

Le Concile de Trente préconisa la suppression des jubés qui furent remplacés par des grilles plus transparentes. La chaire fut alors généralement placée le long des murs de la nef³⁰.

4.3.2.2 Apparition de la chaire et de l'abat-voix

C'est à partir du XII^e siècle que l'utilisation de chaires mobiles ou fixes³¹, d'abord essentiellement situées sur la place publique³² ou à l'extérieur des églises³³ (cf. Figure 54), se propage sous l'influence des ordres mendiants (principalement les dominicains et les franciscains) qui luttent contre les hérésies [74].

²⁹ C'est le cas notamment de St-Jean à Schaffhouse.

³⁰ Selon Chédozeau [75], les chaires posttridentines sont conçues comme les prolongements de ce qui se passe à l'autel.

³¹ Pour plus de détails sur l'histoire des chaires, on consultera les ouvrages de Cox [76] et Poscharsky [77].

³² Selon Poscharsky [77], c'est sur les places publiques que "Les nouveaux prédicateurs populaires ont imaginé d'installer des sortes de caisses juchées sur quatre pieds (...). D'abord provisoires, ces chaires de plein air sont souvent devenues permanentes".

³³ Par exemple à St-Loup (FR)



Figure 54 *Chaire située contre le mur extérieur d'une église de Séville (à gauche) et chaire mobile (à droite) [74]*

Cette pratique conduisit à concevoir les grands sermons en dehors de la liturgie [72]. A partir du XIV^e siècle³⁴, elles sont disposées dans les églises, non pas comme les ambons et les jubés à la limite du chœur, mais dans l'espace destiné aux laïcs, à mi-longueur de la nef. Les fidèles se rassemblent alors debout ou sur des sièges de fortune autour de la chaire pour y écouter le prône (cf. Figure 55).



Figure 55 *Gravure luthérienne satirique (1529), à gauche le prédicateur de la grâce, à droite celui des pèlerinages et des indulgences*

Selon Bouyer [78], l'évêque prenait place sur un banc d'œuvre, situé en face de la chaire pour écouter la prédication, dispositif encore et toujours observable dans certaines églises catholiques (cf. Figure 56). C'est à l'époque du gothique tardif puis après la Réforme que les chaires furent systématiquement installées dans les églises [79]. Presque toutes les chaires étaient dotées d'un abat-voix [74]. Le rôle de l'abat-voix, comme celui de la chaire, se justifie d'abord pour des questions

³⁴ La chaire de l'église St. Pierre à Bâle est déjà mentionnée en 1388.

purement acoustiques³⁵ mais ils ont également un rôle symbolique important, comme l'a montré Reymond [74].

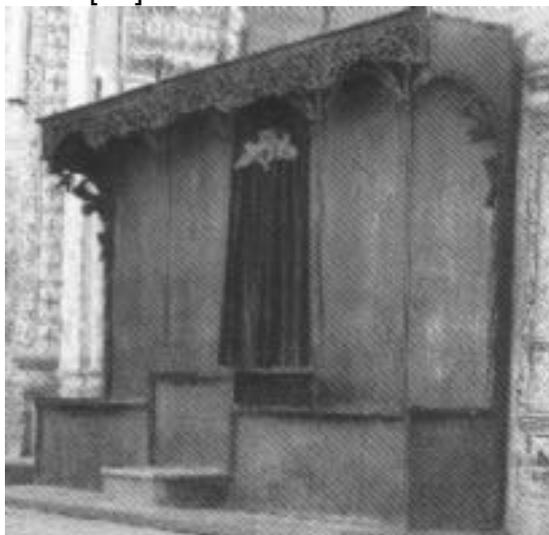


Figure 56 Siège à baldaquin de l'évêque, transférée de la cathédrale de Sion à la basilique de Valère (fin XV^e siècle) [70]

Dans certains cas, la chaire n'est surmontée que d'un dais³⁶, peu efficace du point de vue acoustique, mais dont la fonction était plutôt de mettre en évidence l'importance de la Parole³⁷ et du ministère de la prédication. La chaire, généralement assez simple, pouvait être déplacée ou reconstruite suivant les besoins de chaque époque³⁸. Pour les protestants, la chaire devient le symbole de la Parole et, dès le XVIII^e siècle, ils en grossissent l'importance. A partir de cette époque, la chaire devient un objet d'apparat³⁹ [80] et l'abat-voix un véritable couronnement, qui souligne le caractère royal, voir sacerdotal de la prédication [74]. Les chaires et leur abat-voix constituent alors un élément important du mobilier liturgique, et leur valeur artistique les font pleinement entrer dans le patrimoine architectural (cf. Figure 57 et Figure 58). La suppression du jubé après la Contre-Réforme mais le maintien du

³⁵ Grandjean [80] mentionne par exemple qu'en 1540 le prédicant exposa au conseil de la ville de Lutry que "quand il prêche, sa voix se perd, et il demande qu'on fasse sur la chaire un ciel de bois"

³⁶ Une gravure de 1654 du temple de Metz montre la chaire, qui ne comporte pas de paroi dorsale, surmontée d'un tissu, dont la fonction acoustique est contraire à celle d'un abat-voix.

³⁷ En 1683 le Conseil de La Chaux-de-fonds décide l'achat d'une Bible qui devait rester en chaire. "Par considération d'icelle, on couvrira le bord de la chaire d'un tapis avec des franges" [81].

³⁸ A La Chaux-de-Fonds, la construction d'une nouvelle galerie dans le Grand Temple en 1670, ne permettait plus, à ceux qui y étaient situés, de voir et d'entendre correctement le pasteur en chaire. On déplaça donc celle-ci dans l'axe de l'église [81].

³⁹ Urech [81], mentionne que le pasteur Perrelet de La Chaux-de-Fonds demanda en 1671 de "racomoder la chaire qui est incommode et trop petite". On décida d'en faire une neuve "au gré et contentement du dit Sieur Pasteur qui indiquera luy mesme comme il désire qu'on la fasse" En fait on lui en fit deux : l'une du haut de laquelle il prêchait et qui avait "un dais dessus" et une autre "pour entrer dans la première et qui servira on dit sieur Pasteur pour s'y mettre et reposer avant que de monter en chaire". La chaire de Bellelay fut déplacée en 1798 dans ce temple, mais cet ensemble sculpté "juraît par sa richesse avec la simplicité de l'église". Les paroissiens y voyaient au contraire un avantage: c'est la seule chose qu'il y avait à regarder, et cette attirance ramenait constamment la pensée de l'auditeur vers le centre du culte, vers cette Parole de Dieu qui y était prêchée.

prône, conduisit à faire les lectures dans la zone réservée aux prêtres⁴⁰, et l'homélie (et les prédications), en chaire [72].



Figure 57 Chaire en bois de l'église de Chêne-Paquier (1667, à gauche) ; chaire en pierre de l'église de Moudon (1695, à droite) [80]

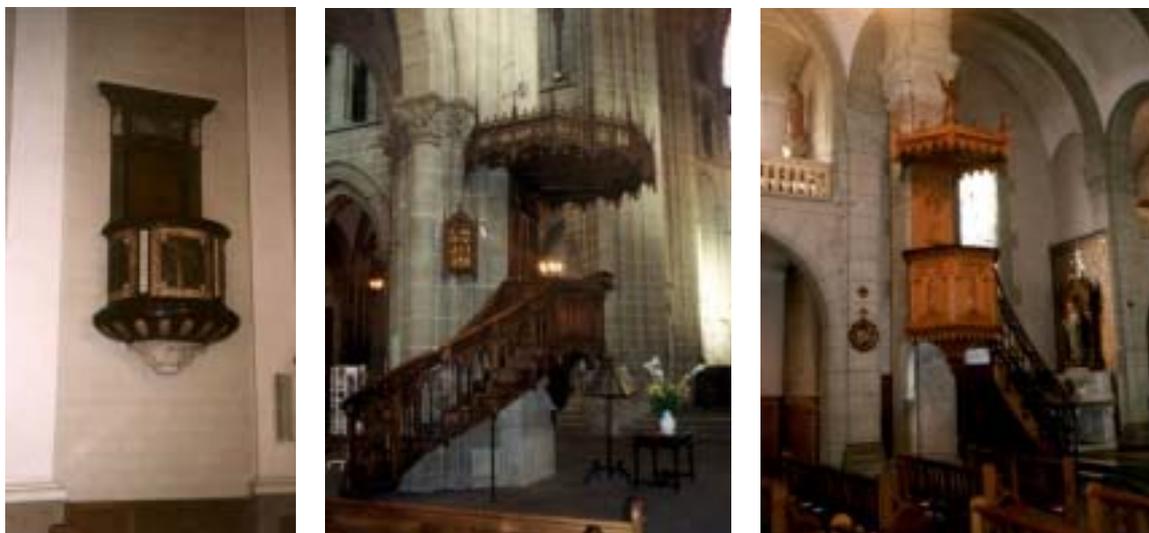


Figure 58 Chaire sans abat-voix, intégrée au mur dans l'église St-Pierre-aux-Liens à Bulle (1816, à gauche) ; chaire de la cathédrale St-Pierre de Genève avec un grand abat-voix (1864, au centre) ; chaire, haut placée, de l'église catholique de Montreux (1885 à droite)

⁴⁰ Cette distinction d'emplacement entre lectures bibliques et prédication met en évidence la différence de statut entre ces deux moments liturgiques. Le caractère sacré des lectures bibliques semble s'opposer à l'aspect moins exclusivement religieux du commentaire ou de l'exhortation.

4.3.2.3 Optimisation de la forme et de la position

Le siècle des Lumières conduit les scientifiques et les architectes à réfléchir sur le meilleur emplacement pour la chaire et l'abat-voix. Elie Bertrand [82] propose ainsi en 1755 "qu'on essayât de placer la chaire au foyer" des temples dont les murs sont définis par des paraboles. Il tente de démontrer les avantages acoustiques de cette configuration et affirme que "la chaire devrait toujours être placée dans une église parallélogramme, au milieu de la plus grande dimension, pourvu que cette chaire soit garnie ou fermée par derrière, suffisamment éloignée du mur, pas trop élevée et couverte ou surmontée par un dais convenable, et ayant vis-à-vis une surface qui ne donne lieu à aucun écho, ni à aucun retentissement".

Laugier préconise, en 1765 [83], de placer la chaire "dans un des entrecolonnements de la nef. Le plus convenable est l'entrecolonnement du milieu". Mais il précise que "l'on ne doit imiter nulle part ce qui a été pratiqué dans quelques-unes de nos églises, où l'on a rempli un entrecolonnement d'un grand ouvrage de menuiserie qui sert de fond à la chaire à prêcher". Jusqu'au siècle dernier, l'emplacement des chaires était très souvent déterminé empiriquement⁴¹ (cf. Figure 59).

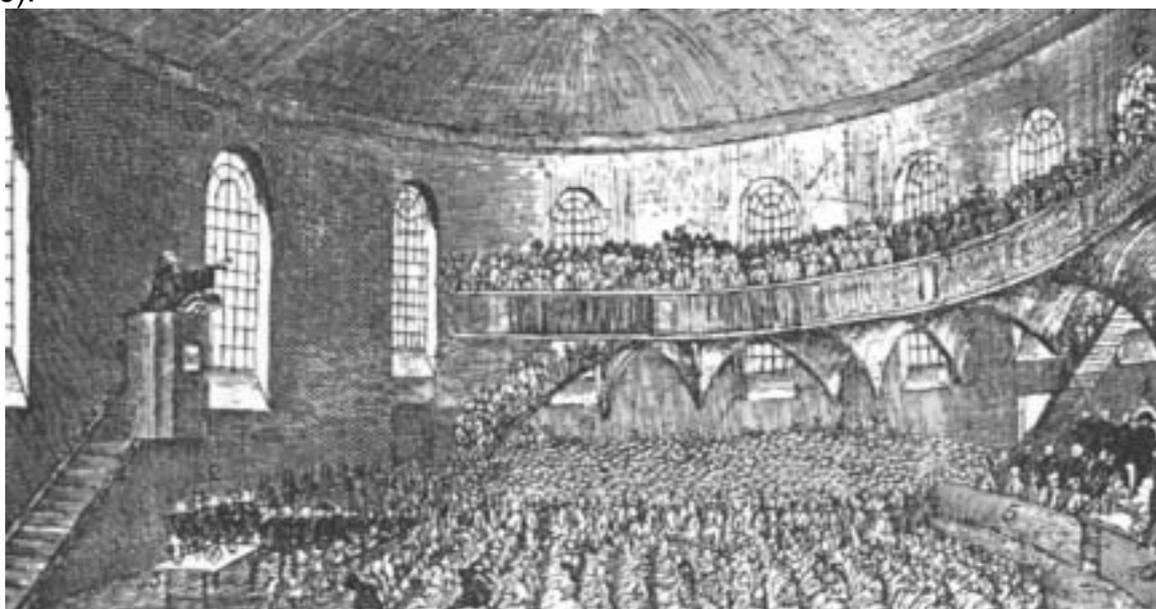


Figure 59 Position optimale de la chaire, déterminée empiriquement, dans le Grand Temple de La Chaux-de-Fonds (dédicace de 1796) [81]

Au XIX^e siècle, des scientifiques et des architectes continuent de rechercher la meilleure forme et l'emplacement idéal des chaires et des abat-voix. Radau [19], remarque en 1867 que "la parabole, qui rend parallèles les rayons divergents, se recommande davantage; la chaire ou la tribune de l'orateur se placerait au foyer de la courbe. (...) Des abat-voix ou dais de cette forme sont employés au-dessus de la chaire dans quelques églises". Smith [84] recommande à la même époque la mise

⁴¹ Urech [81] mentionne qu'à la reconstruction du grand Temple de La Chaux-de-Fonds, "on procéda empiriquement en construisant une chaire mobile qu'on essaya de placer ici et là dans le temple, et que l'on finit par choisir l'extrémité nord du petit axe; c'était de là que la voix portait le mieux sans provoquer trop d'écho".

en place de chaires à réflecteur parabolique, une solution qui fut réalisée à Attercliff (GB). Cet auteur préconise également l'emploi d'un réflecteur sur le pupitre de lecture comme assainissement dans la cathédrale de St. Paul à Londres, afin de "supprimer les échos perturbateurs issus du dôme important de cette église".

L'architecte Lachèz [85] rend attentif à l'importance des matériaux utilisés pour la construction de la chaire et de l'abat-voix: "Pour remplir efficacement le rôle auquel sont destinées les chaires à prêcher ou à lire, l'abat-voix et le dossier doivent présenter des surfaces de répercussion lisses, polies, et surtout construites en matières parfaitement résistantes et préférablement en marbre, en pierre ou en stuc; ces surfaces doivent être, en outre, convenablement orientées et paraboliques, de manière que la partie supérieure rabatte les sons de la parole sur l'auditoire, en les étendant de préférence dans le sens de la longueur du local où est située la chaire, et que le dossier ramène aussi les sons devant l'orateur ou le prédicateur, à moins toutefois que son auditoire ne soit en partie répandu derrière lui, circonstance dans laquelle il vaut mieux supprimer le dossier et laisser la voix s'étendre autant qu'elle le peut dans cette direction, qu'on sait être la moins favorable à l'audition". Durant le début du XX^e siècle⁴², les acousticiens ont continué, principalement sur la base des connaissances de l'acoustique géométrique, à rechercher la meilleure forme (cf. Figure 60 et Figure 61) et position pour la chaire et l'abat-voix⁴³.

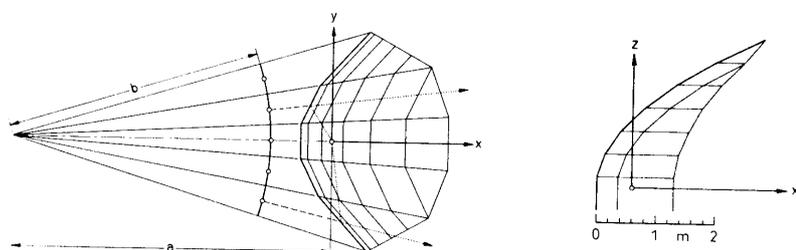


Figure 60 Schéma d'optimisation d'une chaire parabolique-hyperbolique et sa réalisation dans la cathédrale de Haarlem (NL) [89]

⁴² Il faut noter que certains auteurs [86; 87] ont défendu la pertinence des chaires et des abat-voix dans les églises jusqu'à la fin du XX^e siècle et ont encore formulé des recommandations sur leur emplacement et configuration pour en optimiser les effets.

⁴³ Glover [88] mentionne ainsi que l'abat-voix, suffisamment rigide, doit être positionné à 1.5 m au-dessus de la tête de l'orateur et bien se prolonger en avant pour permettre efficacement de former un écran par rapport au plafond et de renvoyer le son de façon renforcée vers l'assemblée.

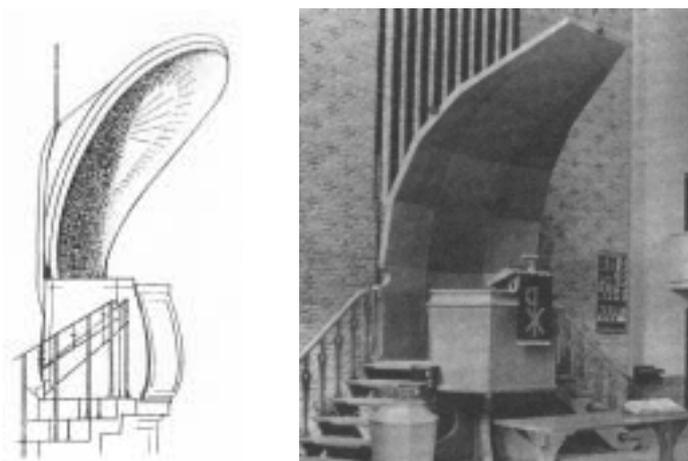


Figure 61 Schéma de la chaire parabolique d'une église d'Erfurt (à gauche) et photo de la chaire de Renkun (à droite)

Si plusieurs auteurs se sont penchés sur la position souhaitable de la chaire dans l'église, il faut relever également l'évolution de la disposition de l'assemblée relativement à la chaire. Comme nous l'avons vu lors du survol historique, l'évolution de la liturgie conduit à des modifications notables de la position de l'assemblée par rapport à la chaire (cf. Figure 63). À l'époque médiévale, les fidèles se réunissaient, debout (ou assis par terre ou sur des sièges de fortune), autour de la chaire pour écouter le prédicateur. Les bancs, mis en place dès le XV^e siècle dans certaines églises, seront orientés vers l'autel situé dans chœur, la chaire restant sur un des côtés de la nef. Cette position restera en usage dans l'église catholique jusqu'au concile Vatican II. En cas d'homélie, le prêtre se déplace dans la nef, où se trouve la chaire, placée ainsi sur le côté de l'assemblée. A la Réforme, la prédication prend une grande importance dans l'église protestante, et l'assemblée prend place sur des bancs disposés tout autour (sur trois voir quatre côtés) de la chaire. A partir du XVIII^e siècle, l'assemblée s'oriente progressivement, dans les églises réformées, non plus autour, mais face à la chaire, qui marque une empreinte confessionnelle (cf. Figure 62).



Figure 62 Chaire catholique (à gauche) et chaire protestante (à droite) de part et d'autre du chœur de l'église d'Assens

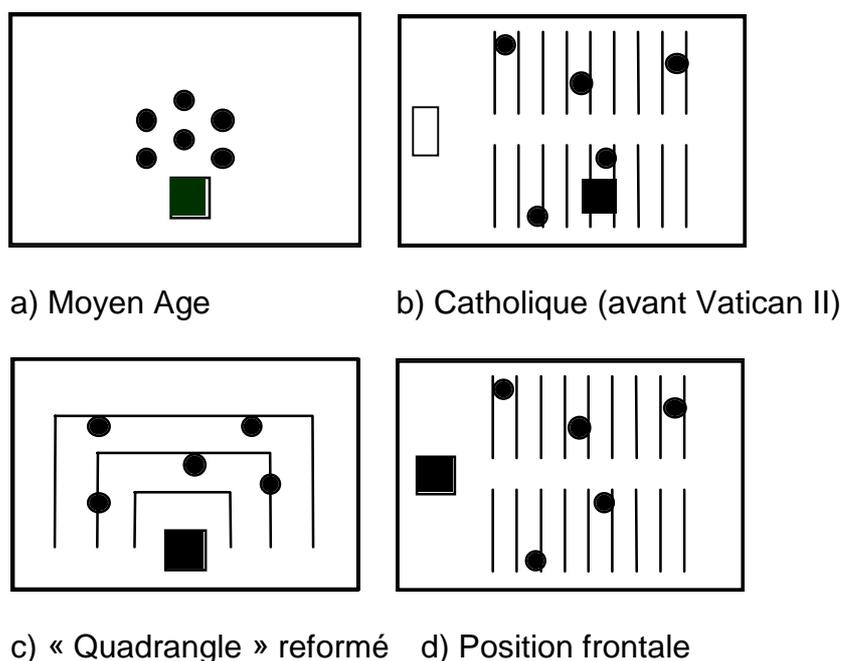


Figure 63 Evolution de la position de l'assemblée relativement à la chaire (carré noir)

4.3.2.4 Abandon progressif des chaires

Depuis l'avènement de la sonorisation⁴⁴, qui s'est généralisée pour les églises dans la deuxième moitié du XX^e siècle, le dispositif acoustique traditionnel qu'était la chaire munie de son abat-voix semble pour beaucoup être devenu un héritage encombrant du passé dont on a de la peine à percevoir l'utilité. Ainsi Turian [90] préconise en 1946 "qu'à l'entrée gauche ou droite du chœur se dresse la chaire. Non pas une chaire monumentale et vaine, plus appropriée au discours philosophique sur l'être suprême qu'à la prédication de l'Évangile, mais une sorte d'ambon sans l'abat-voix inutile. Il sert à la prédication seulement". Comme pour la chaire, il y a pour l'abat-voix une perte progressive de sens (fonctionnel et symbolique).

C'est que la chaire, par sa position dominante et son appareil solennel, peut sembler donner une place dominatrice à celui qui l'utilise⁴⁵. De nombreux ministres veulent au contraire se rapprocher de leurs fidèles et rester au même niveau qu'eux. Il y a là confusion malheureuse entre la position physique et son interprétation spirituelle ou plus simplement psychologique. L'utilisation exclusive d'un lutrin confine alors la

⁴⁴ Avec l'avènement de la sonorisation, la chaire ne devient plus une nécessité acoustique pour se faire comprendre des fidèles. Notons que l'utilisation combinée de la chaire munie d'un abat-voix et de la sonorisation peut créer une distorsion de la voix à cause du filtrage en peigne du aux réflexions précoces sur le pupitre et l'abat-voix.

⁴⁵ Roycien [91] se questionne ainsi "A quoi tient cette mode qui veut que nos pasteurs désertent de plus en plus leur chaire pour s'installer derrière un bête lutrin. Peur de toute hauteur? Difficulté à assumer leur identité? Disgrâce de la prédication réduite à un accessoire liturgique parmi d'autre?(...) On me disait "Rien de tout cela. C'est seulement pour être plus proche de leurs paroissiens, se mettre à leur niveau".

chaire, si elle est maintenue dans l'église, dans le rôle parfois peu compréhensible de vestige ornemental, de monument historique. Ramener cet élément de mobilier au niveau du sol semble être un mauvais compromis, car cette disposition la transforme en une sorte de "tonnelet", sans aucune utilité acoustique, et dont le sens devient difficilement compréhensible (cf. Figure 64). La qualité de communication (visuelle et acoustique) entre le ministre (au sol) et les fidèles s'en trouve, paradoxalement et contrairement à sa volonté, affaiblie. La chaire, garde une forte valeur symbolique⁴⁶ surtout dans l'Eglise réformée. L'avènement du "miracle" de la sonorisation et de la soi-disant liberté et proximité qu'elle promet, a cependant précipité "la chute de chaire" même dans sa fonction symbolique. L'apparition (comme la disparition) des abat-voix est liée à celle des chaires.



Figure 64 Chaire imposante, mais à faible hauteur, dans le temple de Clarens (à gauche); chaire ramenée au niveau du sol dans le temple St-Paul de Villeneuve (à droite)

⁴⁶ Rares sont ceux qui, aujourd'hui, dans l'Eglise, soutiennent avec Bouyer [78] que la chaire "devrait être plus qu'un simple lutrin ordinaire. Sa dimension et sa forme doivent bien montrer que c'est l'endroit de l'église le plus sacré après l'autel".

4.3.3 Analyse statistique des chaires en Suisse

4.3.3.1 Occurrences et dimensions des chaires et abat-voix

Les résultats de notre analyse statistique sur plus d'une centaine d'églises [92], montrent (cf. Tableau 14) que $\frac{3}{4}$ des églises en Suisse ont encore des chaires. Cette proportion varie cependant beaucoup en fonction de la confession. En effet, la quasi-totalité (94%) des églises réformées possèdent une chaire, alors que moins de la moitié des églises catholiques (42%) dispose encore d'un tel meuble. Cette forte distinction s'explique par les différences liturgiques entre confessions, qui ont été exposées au deuxième chapitre. On rappellera en particulier, d'une part, la place importante donnée à la prédication dans l'Eglise réformée, et d'autre part, la volonté, dans l'Eglise catholique d'après Vatican II, de rassembler l'espace liturgique au milieu des fidèles et l'usage d'un lutrin ou ambon pour effectuer l'homélie.

Tableau 14 Occurrences des chaires et abat-voix

	Catholique	Réformé	Total
Eglises avec chaire	42%	94%	76%
Eglises sans chaire	58%	6%	24%
Chaire avec abat-voix	67%	49%	53%
Chaire sans abat-voix	33%	51%	48%

Parmi les églises qui ont conservé une chaire, la moitié (53%) d'entre elles n'ont aujourd'hui plus d'abat-voix. Les abat-voix sont cependant conservés dans $\frac{2}{3}$ des églises catholiques, ce qui s'explique en partie par le fait que les chaires, rarement utilisées dans ces églises (cf. § 4.3.3.2), sont passées dans le patrimoine architectural et ont été délaissées (et souvent préservées) par l'évolution de la liturgie.

4.3.3.1.1.1 Dimension des chaires et abat-voix

Les mesurages des caractéristiques géométriques d'une cinquantaine de chaires nous apprennent (cf. Tableau 15) que celles-ci sont situées en moyenne à 1.3 ± 0.6 m du sol⁴⁷, ce qui est satisfaisant dans la plupart des cas pour favoriser l'écoute en procurant à chaque place une contribution suffisante en son issu directement de l'orateur. Notons que les chaires catholiques sont situées généralement beaucoup plus haut (hauteur moyenne de 2.3 ± 0.5 m) que les chaires réformées (hauteur moyenne de 1.2 ± 0.5 m). Ceci s'explique en partie par la hauteur moyenne des églises dans lesquelles sont mises ces chaires, qui est plus grande dans les églises catholiques (hauteur moyenne de 10.5 m) que réformées (hauteur moyenne de 7.5 m). Dans beaucoup d'églises réformées, la chaire, qui est encore utilisée, a été abaissée, voir même ramenée au niveau du sol⁴⁸, pour les raisons ecclésiologiques mentionnées précédemment (cf. §4.3.2.4).

⁴⁷ Certaines chaires son situées à des hauteurs beaucoup plus importantes comme au St-Esprit de Berne (3.5 m), à la cathédrale de Genève (2.8 m). Dans de nombreux cas, ce type de chaires était mis en place pour assurer une bonne visibilité et audition depuis les galeries.

⁴⁸ Par exemple à St. Paul (Villeneuve), Puidoux et Sevelin (Lausanne).

Les chaires sont toujours composées d'un tonnelet fermé (ou cuve) de forme cylindrique ou polygonale, plus ou moins décoré⁴⁹, et muni d'un pupitre de lecture. Les abat-voix couronnent généralement des chaires relativement hautes (hauteur moyenne de 1.7 m). Ils sont situés à une hauteur de 2.3 ± 0.1 m au-dessus de la chaire. Les abat-voix sont le plus souvent de taille relativement modeste (longueur 1.4 ± 0.5 m, largeur 1.3 ± 0.4 m).

Tableau 15 Dimension des chaires et abat-voix

	Chaire	Abat-voix			
	Hauteur sur sol	Hauteur	Hauteur sur sol	Longueur	Largeur
Nombre étudié	45	25	22	22	22
Maximum	3.5	2.5	5.2	2.5	2
Minimum	0.25	2	3	0.8	0.8
Moyenne	1.3	2.3	3.9	1.4	1.3
Ecart type	0.6	0.1	0.5	0.5	0.4

4.3.3.2 Utilisation des chaires

Sur la base de questionnaires adressés aux principaux utilisateurs (prêtre ou pasteur, cf. § 6.2.2.1.2 pour les détails méthodologiques), nous avons analysé les conditions d'utilisation des chaires lors de célébrations religieuses. Nous constatons (cf. Tableau 16) que, dans les églises disposant d'une chaire, celle-ci est inemployée dans 1/3 des cas. La chaire est principalement utilisée pour la prédication (49% des cas en moyenne) et plus rarement pour les lectures (18% des cas). L'utilisation de la chaire dépend beaucoup de la confession. En effet, on constate qu'elle est rarement utilisée dans les églises catholiques (26% des cas), alors qu'elle reste d'un emploi traditionnel (77% des cas), surtout pour la prédication (58% des cas) dans les églises réformées. Notons que dans les grandes églises⁵⁰, la chaire est souvent imposante et située au milieu de la nef, ce qui ne correspond plus aux besoins liturgiques actuels⁵¹. Elle est généralement inutilisée et est remplacée par un simple lutrin ou ambon au sol, ou légèrement surélevé, à l'entrée du chœur.

Tableau 16 Utilisation des chaires

Utilisation	Catholique	Réformé	Total
Prédication et lecture	13%	19%	18%
Prédication uniquement	13%	58%	49%
Chaire jamais utilisée	73%	23%	33%

⁴⁹ Les chaires catholiques sont souvent plus ornementées que les protestantes.

⁵⁰ C'est le cas dans beaucoup de grandes églises comme la cathédrale de Lausanne, les églises catholiques de Vevey, Montreux, N.-D. de Genève, etc.

⁵¹ Depuis la valorisation de l'homélie dans l'ordinaire de la messe, le prêtre ne se déplace plus au milieu de la nef pour prêcher mais il reste dans l'espace liturgique situé au milieu (ou devant) des fidèles et délivre son message depuis un lutrin ou un ambon. Dans certaines grandes églises réformées, la disposition centrée autour de la chaire est souvent abandonnée au profit d'une orientation en long face au chœur. Dans ces cas, la chaire située alors sur le côté des fidèles devient peu utilisable. Elle est alors également remplacée par un ambon ou lutrin situé face à l'assemblée.

4.3.4 Efficacité

4.3.4.1 Citations de textes sur les conditions d'efficacité des chaires

On a longtemps estimé que la chaire et l'abat-voix renforçaient toujours et de façon significative l'intelligibilité de la parole dans les églises. A partir du XIX^e siècle, on commence cependant à avoir des réserves sur la pertinence de tels dispositifs, surtout si leur conception et leur emplacement ne sont pas correctement étudiés. Ainsi Smith [84] remarque-t-il en 1861 que "la position de la chaire est un point qui demande une sérieuse attention, car elle peut aussi bien augmenter que diminuer la facilité à parler et à être entendu dans une église". L'utilisation d'une chaire peut permettre d'obtenir une assez bonne intelligibilité uniquement dans le cas d'une diction suffisante. Le même auteur remarque que, grâce à l'utilisation d'une chaire, "une voix modérée peut être entendue à 50 pieds devant le prédicateur, à 30 pieds de côté et à 20 pieds derrière la chaire; mais cela seulement si la prononciation est distincte et égale, sans diminuer la voix au dernier mot de la phrase, ce qui est courant lorsque le ton est emphatique". Peu de temps après, l'architecte Lachèz [85] rend attentif à l'importance de la conception de la chaire dans sa fonction acoustique et non purement décorative: " Les chaires d'église font commettre tous les jours des fautes contre les lois de l'acoustique. On a totalement perdu de vue les raisons qui ont donné lieu à la forme de la chaire destinée au prédicateur et au pasteur, dans les grands vaisseaux des églises. Ce n'est actuellement qu'un simple motif de décoration et d'ameublement, et non plus un instrument acoustique ayant un rôle important à remplir. Le dossier, au fond de la chaire, auquel est adossé le prédicateur, et le dais, ou espèce de baldaquin, placé au-dessus de sa tête, ont eu incontestablement pour but, dans l'origine, de répercuter et de rabattre sur l'auditoire tous les sons produits par la parole du prédicateur ou du lecteur : aussi le véritable nom de ce dais est-il abat-voix. Eh bien! que fait-on aujourd'hui avec peu de raison? Parfois des niches et souvent des pilastres, des consoles, des branchages et une foule d'autres ornements sont ajustés sur le dossier de la chaire; le plafond du dais (car alors ce n'est pas un abat-voix) est orné d'un soffite saillant, polygonal ou circulaire, de corniches et d'enfoncements quelconques, de draperies fantastiques, etc.; le tout est construit en bois mince, creux, et absorbant ou modifiant, par conséquent, une partie des ondulations sonores, au lieu de les répercuter d'une manière convenable au profit de l'auditoire".

L'efficacité acoustique d'une chaire dépend essentiellement de sa position dans l'église et de sa hauteur. C'est pour cela que les architectes ont pris grand soin à déterminer scientifiquement ou empiriquement la place idéale de la chaire et de son abat-voix dans l'église. Ainsi Reymond relève que "souvent, jusqu'au XIX^e siècle, leur emplacement et leur hauteur étaient choisis après plusieurs essais et tâtonnements à l'aide d'une chaire provisoire"[93]. En 1904, Greff [94] donne, sur la base d'une méthode de tracés de rayons pour déterminer les réflexions, des recommandations sur l'emplacement de la chaire pour faciliter le prône⁵². Une bonne position de la chaire n'étant pas suffisante pour se faire comprendre, il précise également la façon de parler en chaire, soit lentement, droit et sans éclats de voix, afin de favoriser l'intelligibilité et diminuer également la fatigue du

⁵² Il déclare même, qu'après la bonne réalisation de la chaire, "les hommes qui étaient au fond de l'église ne sortaient pas au commencement du prône".

prédicateur. Il constate en effet que "de tous les édifices destinés aux grandes assemblées, et de toutes les tribunes d'où l'on parle dans ces réunions, il n'y en a guère qui soient aussi défavorables à la parole que la plupart de nos églises et des chaires qui s'y trouvent".

4.3.4.2 Principe de fonctionnement

4.3.4.2.1 Chaire

L'amélioration de l'intelligibilité due à l'utilisation d'une chaire s'explique par trois phénomènes.

Le but premier de la chaire est de surélever l'orateur au-dessus de l'assemblée pour être mieux vu et entendu par elle grâce à une meilleure répartition du son direct sur l'assemblée (cf. Figure 65). Si le prédicateur ne dispose pas d'une chaire, ses paroles sont mal perçues par les auditeurs les plus éloignés, car elles ne leur parviennent qu'indirectement⁵³ et elles sont, par ailleurs, atténuées par les premiers rangs.

La mise en place d'une chaire permet non seulement de mieux répartir le son direct sur le public, mais également de «rapprocher l'orateur du plafond», et donc de diminuer le retard de la réflexion du plafond, qui, s'il est trop important, perturbe l'intelligibilité.

Dans le cas des églises catholiques, l'utilisation de la chaire, située au milieu de la nef, permet en outre de rapprocher le prêtre (dont la position principale se trouve dans le chœur près de l'autel) de l'assemblée. Carvalho [95] a montré que ce changement de position n'améliorait l'intelligibilité que de 2% en moyenne sur l'église (augmentation moyenne du RASTI de 0.01). Les places au milieu de la nef bénéficient d'une amélioration de 20% (augmentation du RASTI de 0.07) alors que celles situées devant (près du chœur) subissent une diminution de 18% (diminution du RASTI de 0.13). Le changement de position n'affecte enfin pas l'intelligibilité au fond de l'église. Carvalho [96], conclut donc que "l'utilisation d'une chaire, qui n'est pas munie d'un grand abat-voix au-dessus d'elle, augmente l'intelligibilité à cause de la diminution de la distance entre l'orateur et l'auditeur (...)".

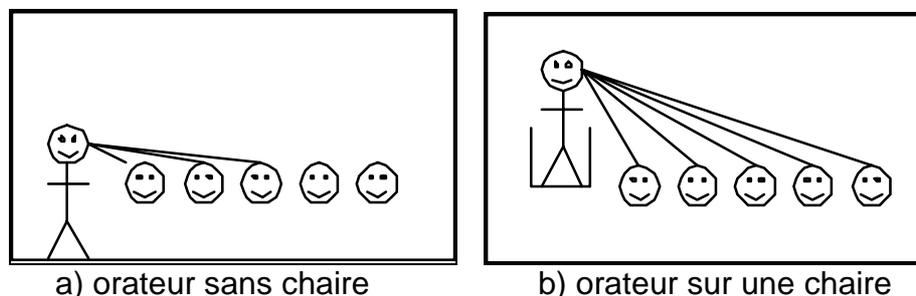


Figure 65 Effet de la chaire

⁵³ Le son direct devient alors faible par rapport à la contribution du champ réverbéré.

4.3.4.2.2 Abat-voix

Le principe de fonctionnement d'un abat-voix est moins évident qu'il n'y paraît. En effet, le principal effet que l'on attribue à un abat-voix est l'augmentation du niveau sonore. Or, on constate que lorsque l'abat-voix est de faible envergure et placé horizontalement (ce qui est généralement le cas en Suisse), il n'amplifie le son que pour l'orateur lui-même et pour les places situées près de lui. La mise en place d'un abat-voix permet cependant, et c'est sa fonction principale, que le son ne se "perde" pas dans le volume inerte (du point de vue acoustique), situé au-dessus des fidèles. Son rôle, qui devient capital lorsque le plafond est élevé, est donc surtout de supprimer la réflexion issue sur le plafond [97] et d'empêcher ainsi la formation, perturbatrice pour l'intelligibilité [98-100], d'une réflexion tardive, voire la formation d'un écho franc⁵⁴. L'abat-voix renvoie (symboliquement mais également acoustiquement) vers l'assemblée, située au sol, la parole dont une grande partie se perdrait sinon dans les hauteurs du sanctuaire (cf. Figure 66).

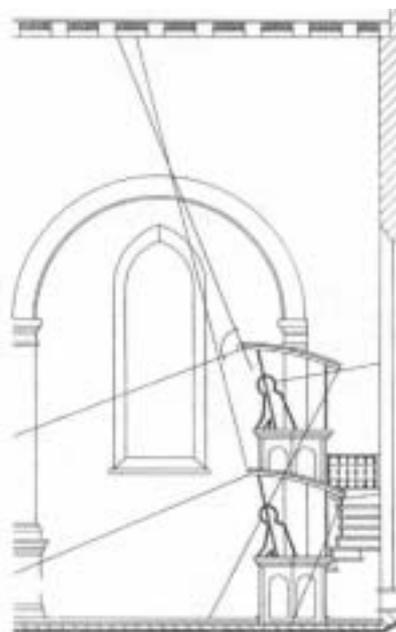


Figure 66 Principe de fonctionnement de la chaire et de l'abat-voix qui permet de réfléchir le son vers l'assemblée et éviter un écho tardif par le plafond [101]

Epstein [102] a cependant montré que, dans bien des cas, un abat-voix horizontal pouvait diminuer l'intelligibilité de la parole pour une grande partie de l'assemblée. Les abat-voix inclinés ou coniques⁵⁵ peuvent mieux contribuer à renforcer significativement l'intelligibilité de la parole dans les rangs éloignés, qui en ont le plus besoin. Aux fonctions visuelles et acoustiques s'ajoutent un rôle symbolique⁵⁶, décoratif, et la marque d'une fonction particulière. Cette diversité de fonctions a donc des implications ecclésiologiques non négligeables. Nous avons vu qu'en Suisse, les

⁵⁴ Ce phénomène, particulièrement désagréable du point de vue acoustique, est perceptible dans la nouvelle église de la Trinité (Genève) qui ne possède évidemment pas d'abat-voix.

⁵⁵ De tels abat-voix sont surtout visibles (et audibles) dans les églises hollandaises

⁵⁶ Selon Reymond [74; 93], "la forme somptueuse était destinée à souligner le caractère soit sacerdotal, soit royal de la prédication"

abat-voix, souvent décorés, ont en général une envergure assez réduite⁵⁷ et que bien souvent ils sont dotés d'une frise, purement esthétique, qui, redescendant sur son pourtour, perturbe la propagation du son réfléchi vers le fond de l'assemblée. La fonction des abat-voix que nous connaissons en Suisse romande semble, dès lors, plus ornementale et symbolique que fonctionnelle pour l'assemblée.

4.3.4.3 Etude de l'efficacité des chaires et des abat-voix

Pour vérifier cette dernière affirmation, nous avons entrepris d'étudier objectivement l'efficacité acoustique, pour l'intelligibilité de la parole, des chaires et abat-voix utilisés en Suisse. Notre première analyse consiste à étudier les résultats d'un modèle théorique simple basé sur le retard de la réflexion issue du plafond. Pour préciser ces résultats, nous avons effectué des simulations informatiques, avec un logiciel de tracé de rayons, nous permettant d'analyser plus finement l'effet de la présence d'une chaire ainsi que celui de la position, de la taille et de l'orientation d'un abat-voix. Ces simulations ont également permis d'étudier l'importance, concernant la chaire et l'abat-voix, de la hauteur de l'église, de la forme du plafond ainsi que la disposition des bancs (en long ou en large). Pour conclure cette étude, nous avons mesuré l'efficacité des abat-voix dans 4 églises.

4.3.4.3.1 Modèle théorique

La première approche consiste à étudier l'influence du retard, séparant l'arrivée de l'onde directe et celle de la réflexion issue du plafond. Si cette réflexion est suffisamment forte et que son retard est important (nous fixerons une limite supérieure à 35 ms [100]), elle entraîne une perturbation de l'intelligibilité.

4.3.4.3.1.1 Effet d'une chaire

En première approximation, le calcul du retard de réflexion ($\Delta(t)$), s'effectue par l'évaluation trigonométrique de la différence de chemin (Δl).

$$\Delta(t) = \frac{\Delta l}{C}$$
$$\Delta(t) = \frac{b+c-a}{344} = \frac{\sqrt{(2H - H_s - H_r)^2 + D^2} - \sqrt{(H_s - H_r)^2 + D^2}}{344} \quad (1)$$

où Δl est la différence de chemin, et C est la vitesse du son dans l'air (pour une température d'environ 21°C), H , la hauteur de la salle, H_s , la hauteur de la source, H_r , la hauteur du récepteur et D , la distance entre la source et le récepteur (cf. Figure 67).

⁵⁷ Grandjean [80] note que les abat-voix "ont, en règle générale, le même plan et un diamètre légèrement plus fort que les cuves; en tout cas, ils ne se présentent que rarement largement débordants, tel celui d'Yverdon". Il existe cependant certaines exceptions notables, comme l'abat-voix de grande taille de l'église (moderne) de Saint-Antoine à Bâle [73].

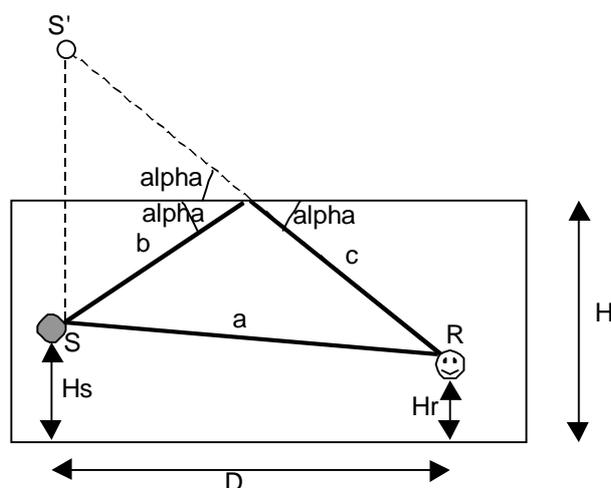


Figure 67 Différence de chemin entre son direct et son réfléchi

On constate (cf. Figure 68) qu'une église dont le plafond est inférieur à 10 m aura un retard de réflexion inférieur à 35 ms quelle que soit la position de l'auditeur dans la salle. Par contre, au-delà de 10 m, le retard de réflexion devient plus important à faible distance de l'orateur. La présence d'une chaire, c'est-à-dire lorsque la source est à 3.5 m (au lieu de 1.5 m), a pour effet de diminuer (d'environ 7 ms) le retard de réflexion dans toute la salle.

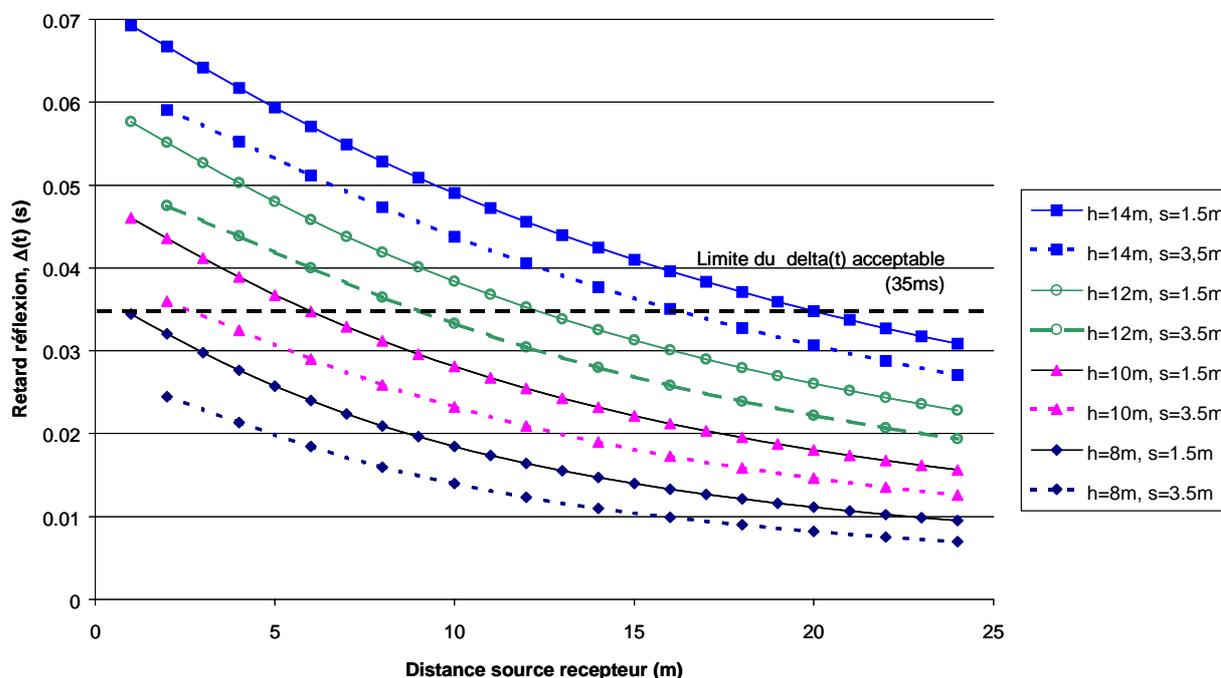


Figure 68 Retard de réflexion en fonction de la distance source-recepteur, de la hauteur du plafond (h) et de la source (s)

4.3.4.3.1.2 Effet d'un abat voix

La mise en place d'un abat-voix plan permet, de supprimer la réflexion par le plafond (néfaste pour les auditeurs proches, mais utile pour les auditeurs éloignés) et donc d'améliorer l'intelligibilité pour les personnes proches, mais peut la détériorer au fond de la salle en diminuant les réflexions « utiles » (suffisamment précoces) issues du plafond.

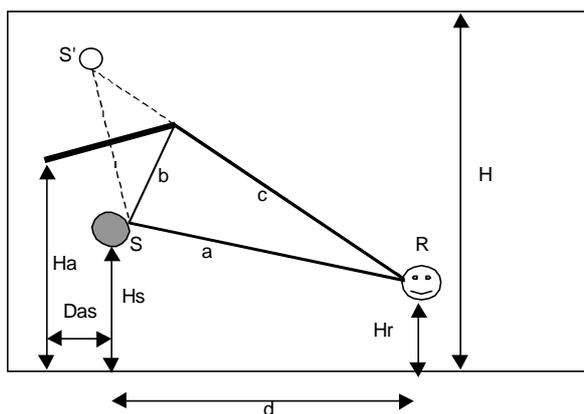


Figure 69 Définition du rayon d'action « d » d'un abat-voix

On peut, à l'aide de l'acoustique géométrique [103], calculer le "rayon d'action" de l'abat-voix (cf. Figure 69) qui est défini comme la distance maximale pour laquelle l'abat-voix supprime la réflexion issue du plafond, et améliore donc potentiellement l'intelligibilité.

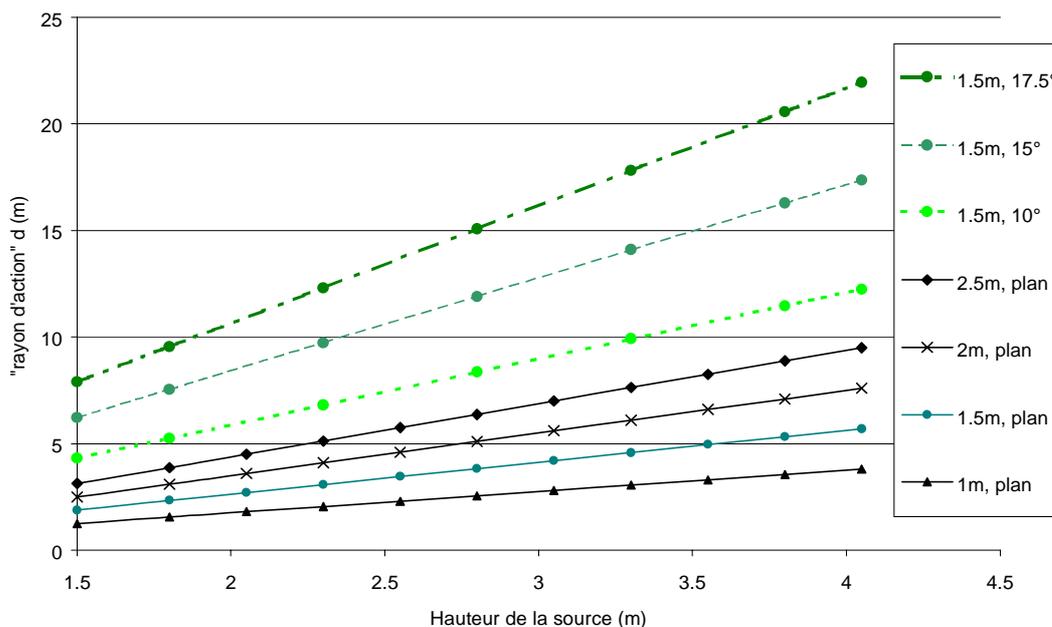


Figure 70 Rayon d'action d'un abat-voix selon sa taille, son orientation et la hauteur de la source

Nous constatons (cf. Figure 70), qu'un abat plan (horizontal) de 1.5 m de longueur a un effet très localisé (de l'ordre de 2 à 5 m) qui doit cependant être mis en parallèle avec son utilisation historique primitive, quand les fidèles se regroupaient autour de la chaire. Le rayon d'action d'un abat-voix augmente avec la taille et l'inclinaison de celui-ci ainsi qu'avec la hauteur de la source, directement liée à celle de la chaire. Notons que, d'après nos calculs, une faible inclinaison (10 à 15°) permet déjà d'augmenter significativement le rayon d'action, qui dépasse alors largement 10 m, si la chaire est à plus d'un mètre du sol.

En combinant le calcul de la réflexion sur le plafond et l'effet de l'abat-voix, on peut comparer les différents retards de réflexion obtenus dans une église avec une chaire et un abat-voix. La Figure 71 confirme que, dans une église de 14 m de hauteur avec une chaire de 2 m (hauteur de la source à 3.5 m), un abat-voix de 1.5 m n'est utile que très localement (pas plus de 4 m) s'il est plan, alors qu'une inclinaison de 10 ou 15° permet d'obtenir un retard de réflexion inférieur à 35 ms sur l'ensemble de l'église.

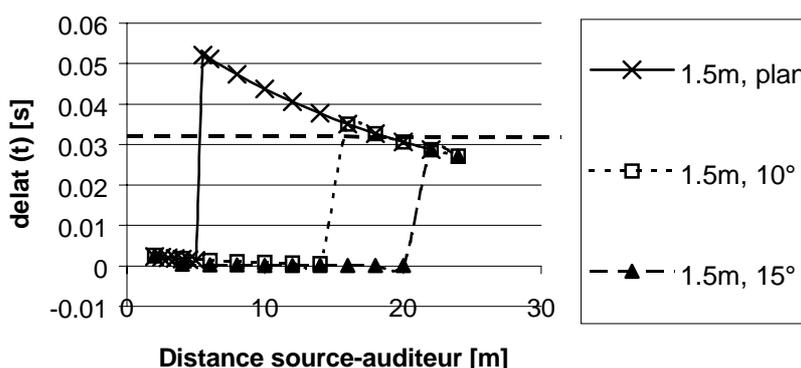


Figure 71 Retard de réflexion suivant l'inclinaison de l'abat-voix (h=14 m, hs=3.5 m)

4.3.4.3.1.3 Synthèse de l'approche théorique

Notre approche théorique a permis de mettre en évidence que l'élévation de l'orateur grâce à l'utilisation d'une chaire, permet d'augmenter la quantité de son direct reçu par les auditeurs et de diminuer le retard de la réflexion sur le plafond et donc d'améliorer l'intelligibilité de la parole.

La présence d'un abat-voix peut diminuer nettement le retard de réflexion pour les auditeurs proches de la source. L'effet très localisé de l'abat-voix correspond aux besoins historiques. Rappelons qu'à l'époque de l'introduction des chaires et abat-voix dans les églises, les auditeurs se regroupaient debout autour de la chaire. L'effet de l'abat-voix peut être amélioré à l'intention des auditeurs plus éloignés, en augmentant sa taille et surtout en l'inclinant légèrement.

Notons cependant que la présence d'un abat-voix plan peut supprimer, pour les places éloignées, des réflexions utiles sur le plafond, et donc dégrader légèrement l'intelligibilité au fond de l'église.

4.3.4.3.2 Simulations

4.3.4.3.2.1 Introduction

Pour préciser les conclusions obtenues par l'approche théorique, fondée sur des approximations assez grossières⁵⁸, nous avons effectué des simulations informatiques avec un logiciel de tracé de rayon⁵⁹. Cette seconde approche nous permet de prendre en compte non seulement un nombre plus important de réflexions, mais également les caractéristiques des surfaces (forme, absorption, diffusion). Cette nouvelle analyse permet par ailleurs de ne plus considérer uniquement l'effet d'une chaire et d'un abat-voix sur les retards des réflexions mais également directement sur les indices d'intelligibilité de la parole et en particulier le RASTI.

Les simulations ont été effectuées dans quatre configurations (cf. Figure 72):

- 1) sans chaire ni abat-voix (la hauteur de la source est alors $h_s=1.5$ m)⁶⁰,
- 2) avec une chaire ($h_s=3$ m) mais sans abat-voix,
- 3) avec une chaire ($h_s=3$ m) et un abat-voix plan (taille 1.5 m x 1.5 m),
- 4) avec une chaire ($h_s=3$ m) et un abat-voix incliné de 20° .

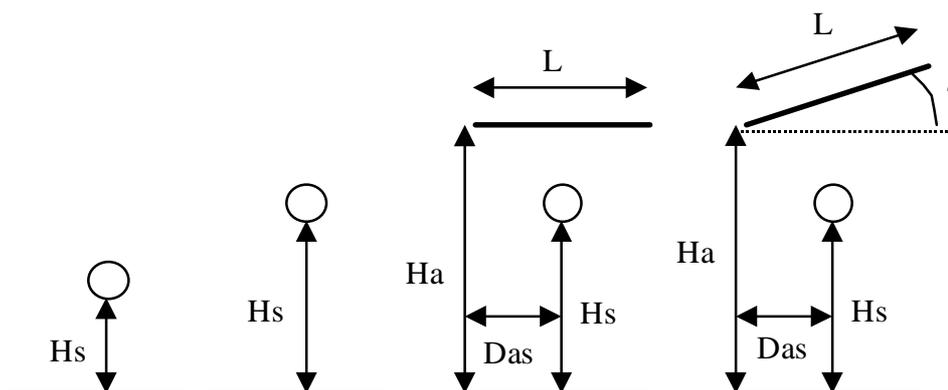


Figure 72 Configurations 1 à 4 (de gauche à droite), utilisées pour les simulations

La première église simulée est parallélépipédique avec un plafond haut ($L=24$ m, $l=10$ m, $h=14$ m) et présente un temps de réverbération de 3.5 s. Dans les simulations, on considère $H_a = 3.5$ m, $D_{as} = 0.75$ m, et une inclinaison γ de 20° .

⁵⁸ L'approche théorique proposée se base uniquement sur le retard de la réflexion issue du plafond sans tenir compte des matériaux qui le compose (en particulier leur absorption), des réflexions sur d'autres surfaces que le plafond, des réflexions d'ordre supérieur ni de l'aspect fréquentiel. De plus, le calcul du retard de réflexion n'est pas suffisant pour quantifier l'intelligibilité.

⁵⁹ CATT-Acoustic V7.1e

⁶⁰ Cette situation sera prise comme référence pour étudier l'efficacité d'une chaire et d'un abat-voix.

4.3.4.3.2.2 Résultats et commentaires

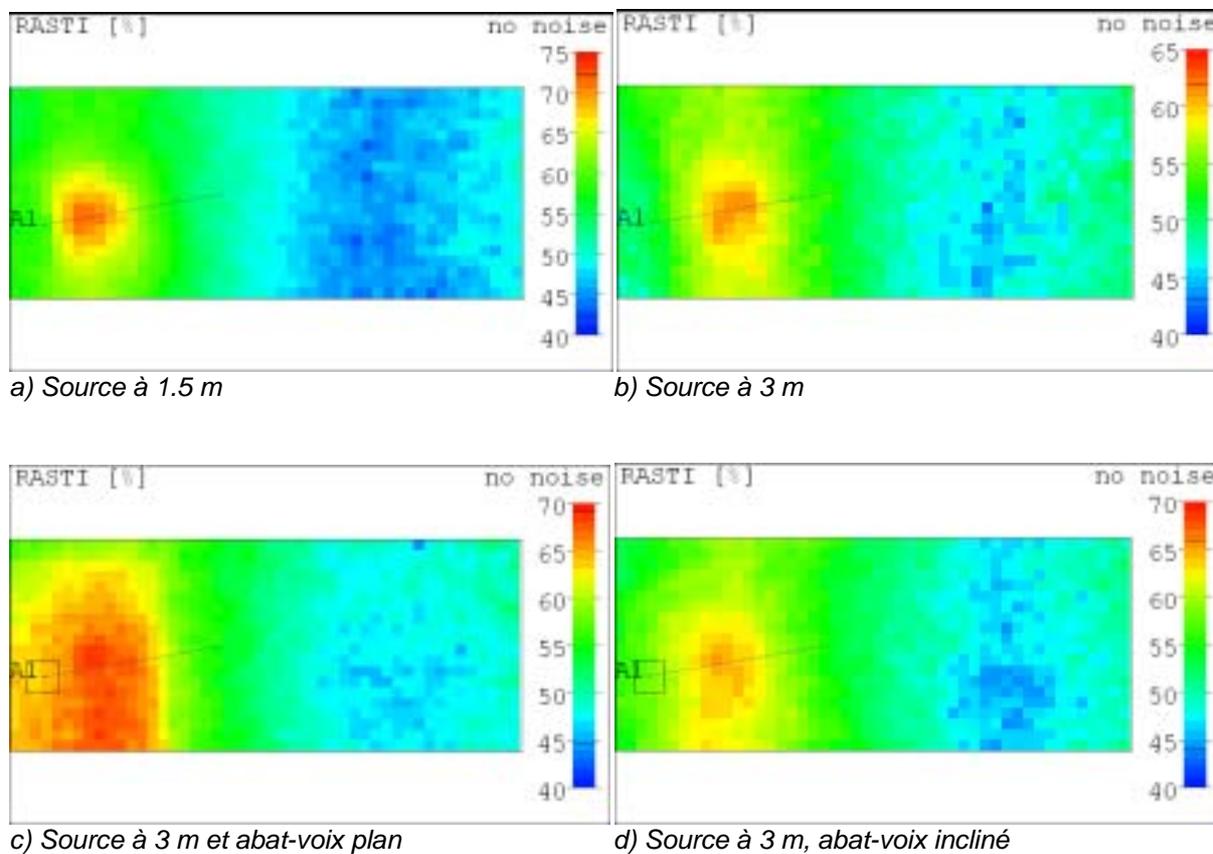


Figure 73 Calcul de l'intelligibilité (RASTI) dans les 4 configurations

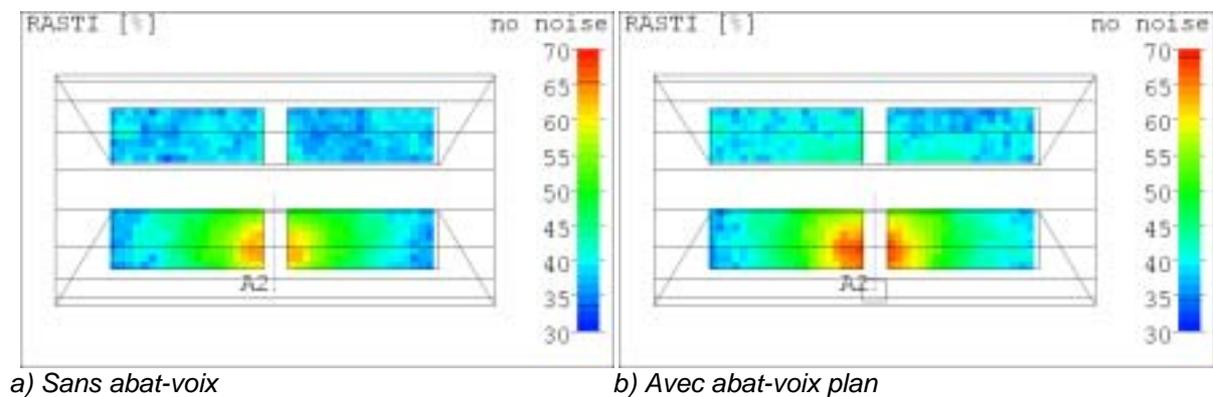


Figure 74 Calcul de l'intelligibilité (RASTI) pour une salle voûtée avec une disposition centrale

Les résultats qualitatifs confirment nos prévisions théoriques sur l'effet d'une chaire (cf. Figure 73b), qui améliore nettement l'intelligibilité dans la zone éloignée de l'orateur mais qui la diminue dans la zone proche de celui-ci (à cause de l'augmentation de la distance orateur-auditeur). Les simulations confirment également l'amélioration, assez localisée autour de l'orateur (cf. Figure 73c) induite par la mise en place d'un petit abat-voix. Dans cette zone, l'effet favorable de l'abat-voix domine celui, défavorable, de la chaire. Contrairement à nos résultats théoriques, l'inclinaison de l'abat-voix ne permet pas d'amélioration sensible au fond de l'église et en plus son efficacité proche de l'orateur est très faible (cf. Figure 73d).

Pour obtenir une comparaison quantitative des valeurs d'intelligibilités entre les diverses configurations, nous avons calculé l'intelligibilité à 6 positions fixes de récepteur (cf. Figure 75).

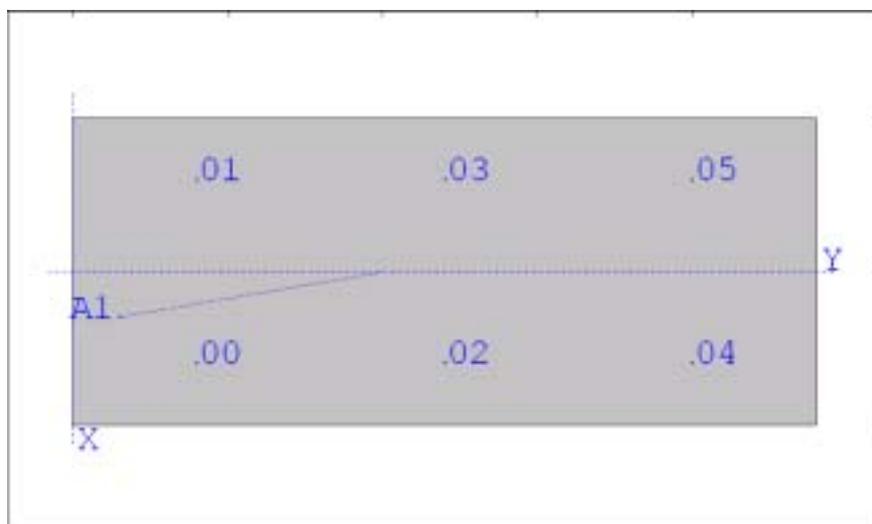


Figure 75 Positions des 6 récepteurs fixes pour les simulations avec une assemblée en long (la chaire est située en position A1)

On constate (cf. Figure 76), qu'à courte distance (position 0 et 1), les configurations sans chaire ($H_s=1.5$ m) et avec une chaire et un abat-voix plan, donnent les meilleurs résultats d'intelligibilité. A moyenne distance (position 2 et 3), l'intelligibilité la plus élevée est obtenue avec un abat-voix plan. Enfin à longue distance, les performances les plus élevées sont obtenues avec un abat-voix plan ou une chaire sans abat-voix. La configuration avec une chaire et abat-voix plan apparaît donc être la meilleure du point de vue de l'intelligibilité. Cette disposition traditionnelle permet un gain du RASTI d'environ 0.03 en moyenne par rapport aux autres configurations et une amélioration plus importante encore proche de l'orateur (amélioration en position 0 de 0.07 par rapport aux configurations avec chaire, sans abat-voix ou abat-voix incliné). Cette analyse quantitative confirme que l'utilisation d'une chaire sans abat-voix péjore l'intelligibilité à courte distance mais améliore la situation au fond de l'église. Par ailleurs, l'inclinaison de l'abat-voix diminue plutôt l'intelligibilité de la parole.

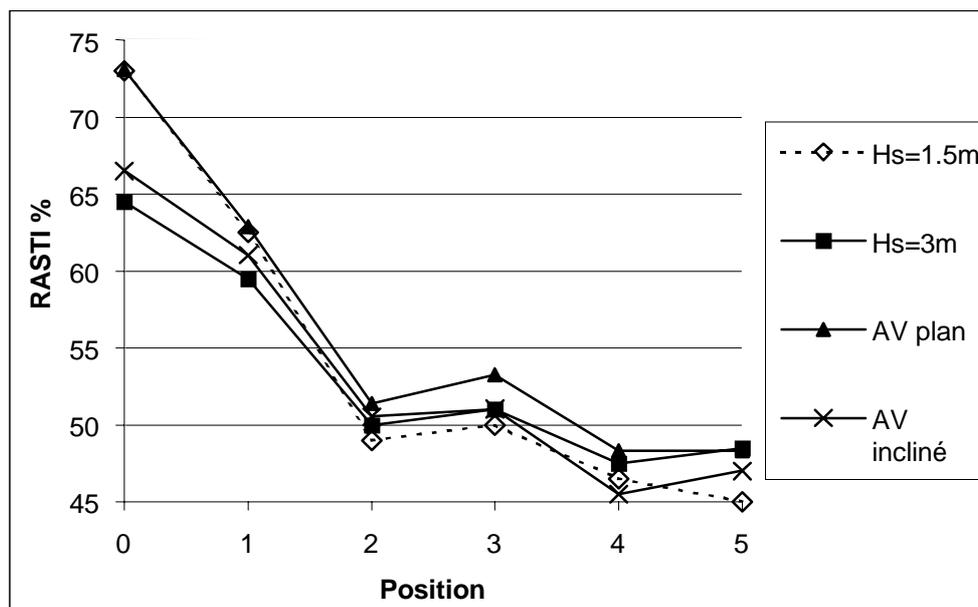


Figure 76 Intelligibilité (RASTI) aux positions fixes pour les 4 configurations

4.3.4.3.2.3 Hauteur et forme du plafond, orientation de l'assemblée

Afin de déterminer l'importance de la hauteur de plafond, des simulations analogues ont été réalisées avec des hauteurs de plafond à 10 m et 6 m. Les résultats de ces simulations montrent [103] que plus le plafond est bas, moins l'abat-voix est efficace. Pour un plafond à 6 m, la présence d'un abat-voix est généralement inutile, voire même néfaste dans certains cas. Pour un plafond de 10 m, l'utilisation d'un abat-voix incliné de 20° s'avère utile à moyenne distance.

Afin de déterminer l'importance de l'orientation de l'assemblée, nous avons effectué des simulations avec l'assemblée non plus face mais autour de chaire (cf. Figure 77). Les résultats détaillés (cf. Figure 78) pour cette disposition « en large » confirment les conclusions obtenues pour une disposition en long. Un abat-voix plan est plus favorable qu'un abat-voix incliné sauf dans la région éloignée où à lieu les réflexions correspondant à axe d'inclinaison de l'abat-voix. On constate par ailleurs, qu'un abat-voix incliné de grande taille (2.5 m de côté au lieu de 1.5 m) a une action moins marquée, mais plus uniforme qu'un abat-voix plan de petite taille, sauf pour les zones latérales par rapport à la chaire. La présence de cet abat-voix incliné ne crée pas de zone où le RASTI est excellent (contrairement aux positions proches d'un abat-voix plan), mais il l'améliore dans une grande partie de la salle⁶¹. L'orientation centrée diminue d'une part la distance moyenne entre orateur et auditeurs, et elle augmente d'autre part le nombre de ces derniers situés proche de la chaire. L'effet d'un abat-voix plan est donc mieux utilisé si celui-ci se trouve au milieu de la grande longueur (orientation centrée, au centre de la nef, cf. Figure 63), ce qui correspond à la position historique des chaires.

⁶¹ La zone d'amélioration, en forme de cône, résulte de la projection de l'abat-voix à partir de la source image, selon les lois de l'acoustique géométrique.

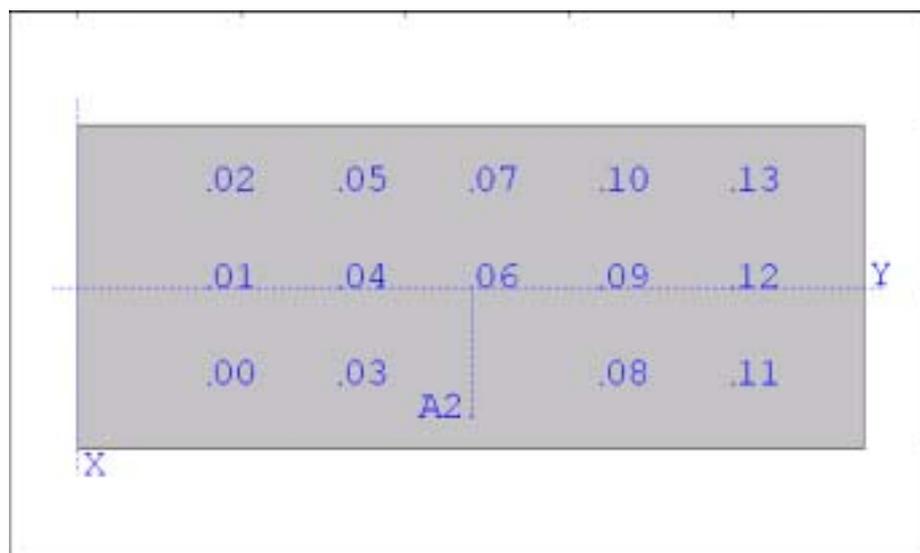


Figure 77 Positions des 14 récepteurs fixes pour les simulations avec une assemblée en large (la chaire est située en position A2)

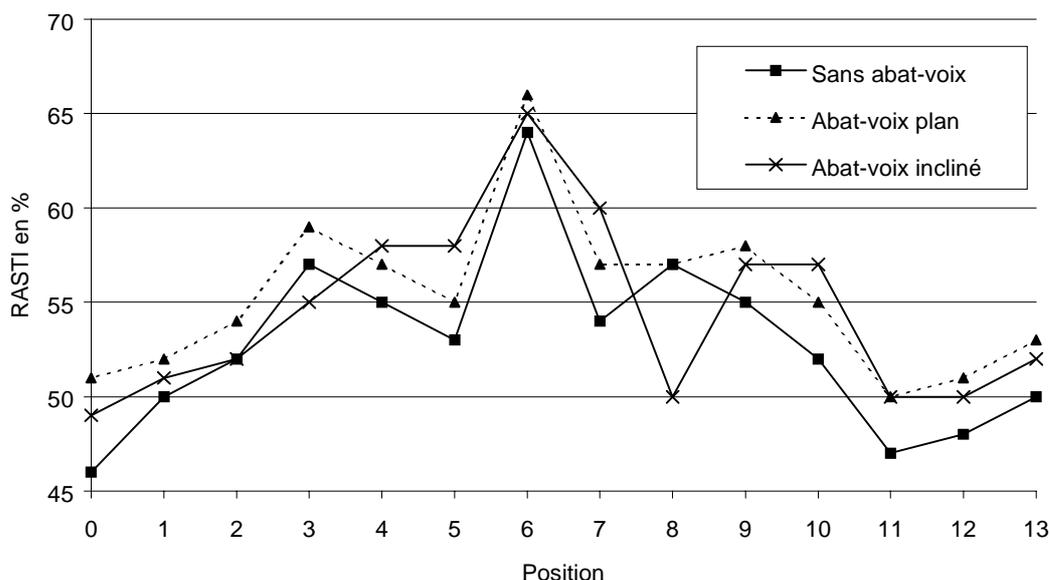


Figure 78 Intelligibilité (RASTI) aux 14 positions fixes avec une orientation en long

Afin d'étudier l'influence de la forme du plafond sur l'effet des chaires et des abat-voix, nous avons finalement effectué une série de simulations avec un modèle présentant un plafond non plus plan mais voûté (cf. Figure 79). Les résultats de ces simulations avec un plafond voûté (cf. Figure 74) confirment les conclusions obtenues avec un plafond plan. La forme du plafond ne semble dès lors pas être déterminante pour l'évaluation de l'effet des chaires et abat-voix.

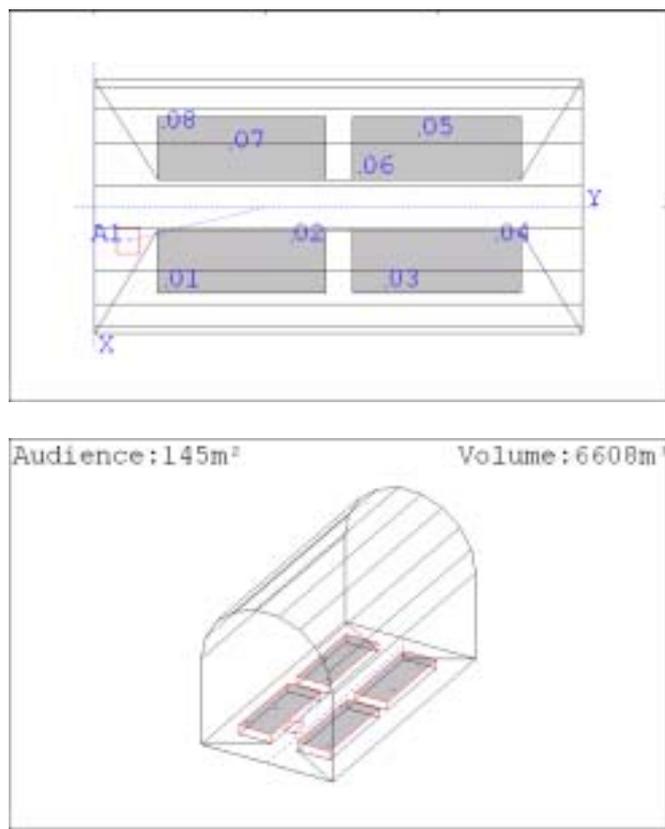


Figure 79 Modèle utilisé pour les simulations avec un plafond voûté

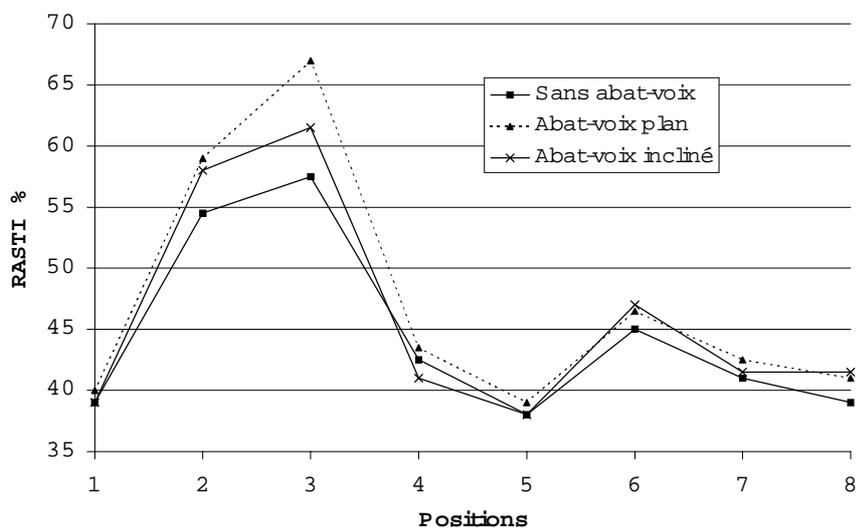


Figure 80 Intelligibilité (RASTI) avec un plafond voûté et une orientation en large

4.3.4.3.2.4 Synthèse des résultats obtenus grâce aux simulations

Les résultats des simulations ont permis de préciser les conclusions issues de l'analyse théorique. Les simulations ont confirmé que la présence d'une chaire, c'est-à-dire l'élévation de la source, était très utile pour améliorer l'intelligibilité dans une zone éloignée de l'orateur. La présence d'un abat-voix plan permet d'obtenir les meilleures conditions d'intelligibilité, en particulier dans une région proche de la source et dans une disposition en large (centrée) plutôt qu'en long. Notons que cette configuration optimale correspond à la situation historique des chaires dans les églises.

Par contre, l'approche théorique laissait penser qu'un abat-voix incliné permettrait d'améliorer l'intelligibilité pour le fond de la salle (au-delà de 10 m). Les simulations montrent cependant qu'un abat-voix incliné est bien moins performant qu'un abat-voix plan en particulier pour les rangs proches de la source. Enfin, la forme du plafond (voûté ou plan) n'est pas déterminante par rapport à l'efficacité des chaires et des abat-voix.

4.3.4.3.3 Mesurages in situ

Les résultats issus de l'analyse théorique et des simulations ont finalement été confrontés à des mesurages in situ [104]. Les indices d'évaluation objective de l'intelligibilité (STI, RASTI et définition D50) ont été calculés à partir de la réponse impulsionnelle, établie sur la base de deux dispositifs de mesurages (Symphonie avec dBati32 de 01dB et MLSSA). Les mesurages ont été effectués dans 4 églises lausannoises dont les caractéristiques sont présentées dans le Tableau 17 et celles de leur chaire et abat-voix dans le Tableau 18, la Figure 81 et la Figure 82.

Tableau 17 Caractéristiques des églises

Eglises	volume V (m ³)	hauteur h (m)	surface Ss (m ²)	Réverbération Tr (500+1kHz) (s)
Cathédrale KT	35000	20	2400	6.5
Allemande EA	2900	11.5	250	3.0
Terreaux T	3600	9.5	380	2.4
St Laurent SL	3150	10.5	300	2.5

Tableau 18 Dimensions des chaires et abat-voix (AB)

Eglise	position	hauteur chaire (m)	largeur AB (m)	longueur AB (m)
KT	latéral nef	1.83	2.00	1.45
EA	lat. chœur	1.42	1.75	1.75
T	centre chœur	2.09	1.50	1.90
SL	centre chœur	2.15	1.00	1.00



Figure 81 Chaire de l'église des Terreaux à Lausanne



Figure 82 Exemple de position du haut-parleur pour les mesurages dans les églises de St. Laurent (2 photos de gauche) et à la cathédrale de Lausanne (à droite)

Les mesurages sont effectués dans les églises vides, d'abord sur la chaire, en plaçant un haut-parleur peu directif sous l'abat-voix, à hauteur d'homme (mesurage avec l'abat-voix), puis à la même hauteur, mais à coté de la chaire (mesurages sans abat-voix, cf. Figure 82).

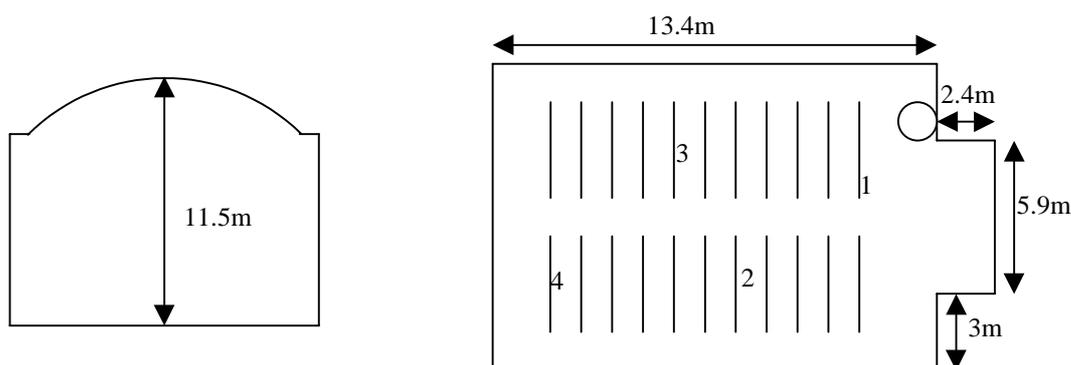


Figure 83 Exemple de configuration des mesures (église Allemande)

Dans la cathédrale et l'église Allemande, qui possèdent un plafond élevé ($h > 11$ m), les résultats (cf. Tableau 19) mettent en évidence un effet bénéfique de l'abat-voix, en particulier à moyenne distance et une légère détérioration à longue distance. A courte distance de la source, contrairement aux prévisions, l'intelligibilité est peu influencée (cathédrale) ou légèrement défavorisée (église Allemande) par la présence de l'abat-voix. Ce dernier cas peut s'expliquer par le déplacement de la source pour la mesure sans abat-voix (augmentation de la distance source/récepteur).

Tableau 19 Différence d'intelligibilité (STI et D_{50} en %) entre les situations avec et sans abat-voix

Position	KT		EA		T		SL	
	STI	D_{50}	STI	D_{50}	STI	D_{50}	STI	D_{50}
1	-1	3	-1	0	-7	-11	-3	-5
2	7	11	2	1	-2	4	-7	-16
3	0	-2	-2	-10	-4	-8	-3	-16
4	-3	-5	-1	-4	1	2	0	1
Moyenne	1	2	-1	-3	-3	-3	-3	-9
Ecart type	4	7	2	5	3	7	3	8

Par contre, dans les églises à plafond plus bas et chaires hautes (Terreaux et St. Laurent), la présence de l'abat-voix détériore l'intelligibilité pour presque toutes les places. Dans ces cas, la réflexion issue du plafond est utile pour l'intelligibilité (retard inférieur à 35 ms, cf. Figure 68). Plus l'auditeur est éloigné, moins l'effet de l'abat-voix est important. Les positions situées à moyenne distance ou en dehors de l'axe de la chaire sont celles qui subissent la plus importante perte d'intelligibilité, car elles ne bénéficient plus de la réflexion du plafond, sans profiter de celle du réflecteur. De telles églises ne profitent par conséquent pas de la présence d'un abat-voix.

Les variations absolues de l'intelligibilité sont donc, en général, assez modestes (variation moyenne de +0.01 à -0.03 selon les églises et écart type entre positions de mesures de 0.02 à 0.04) mais peuvent augmenter en présence de l'assemblée. Les résultats sont notablement plus faibles que ceux obtenus par Epstein [102] dans le cas d'abat-voix hollandais de tailles importantes (Figure 84), et qui sont souvent optimisés du point de vue acoustique (cf. Figure 60 et Figure 61).



Figure 84 Chaire munie d'un abat-voix de grande taille dans l'église Nieuwe Kerk à Amsterdam

4.3.5 Conclusion de l'étude des chaires

Dès le Moyen-âge, l'utilisation de chaires munies d'abat-voix s'est généralisé dans les églises. Une approche théorique simple permet de montrer l'effet bénéfique d'une chaire pour les auditeurs placés à moyenne et grande distance de l'orateur. L'abat-voix, quant à lui, supprime localement la réflexion tardive issue d'un plafond haut et permet ainsi d'améliorer les conditions d'écoute autour de l'orateur. Ces résultats ont été précisés pour l'intelligibilité de la parole, grâce à des simulations avec un logiciel de tracé de rayons. L'efficacité d'un abat-voix, qui dépend peu de la forme du plafond (plan ou voûté), diminue et devient même défavorable lorsque la hauteur du plafond baisse ($h < 10$ m) et que la distance à l'orateur augmente (disposition longitudinale). Contrairement aux prévisions théoriques, l'inclinaison de l'abat-voix est généralement plutôt défavorable. Ces conclusions ont été finalement confirmées par les résultats de mesurages avec et sans abat-voix dans quatre églises lausannoises. Les variations absolues de l'intelligibilité sont en général assez faibles (variation moyenne du STI de +0.01 à -0.03), mais peuvent augmenter en présence de l'assemblée. L'évolution historique de l'emplacement des fidèles par rapport à la chaire (regroupés debout, puis assis autour, puis en long devant l'orateur) leur a donc fait progressivement perdre leur pertinence acoustique.

4.4 Bibliographie du chapitre 4

- [1] **Lubman, D. et Wetherill, E. A.** (1985). *Acoustics of worship spaces*. Acoustical Society of America, New York.
- [2] **Lubman, D.** (2001). *The history of western civilization told through the acoustics of its worship spaces*. 17 ICA, Rome.
- [3] **Lubman, D.** (2001). *How worship space acoustics helped to shaped western history*. 142th ASA meeting, Fort Lauderdale.
- [4] **Green, E.** (2001). *La Parole baroque*. Desclée de Brouwer, Paris.
- [5] **Thurston, D.** (1963). *The Interpretation of Music*. Harper, New York.
- [6] **Winckel** (1965). *Influence de l'acoustique des salles sur l'évolution du style musical*. Bulletin GAM, Vol. 11, pp. 2-11.
- [7] **Bagenal, H. et Bursar, G.** (1930). *Bach's music and church acoustics*. J. Roy Inst. Brit. Architects, pp. 154-163.
- [8] **Keibs, L. et Kuhl, W.** (1959). *Zur Akustik der Thomaskirche in Leipzig*. Acustica, Vol. 9, pp. 365-370.
- [9] **Lang, P. H.** (1941). *Music in western civilization*. Norton & Co, New York.
- [10] **Thfoin, C.** (1980). *La parole, la musique et le chant dans l'architecture au XIXème siècle. Les rapports entre Viollet le Duc et l'acoustique architecturale*. Colloque international Viollet Le Duc, Paris, pp. 100-113.
- [11] **Forsyth, M.** (1987). *Architecture et musique*. Mardaga.
- [12] **Loerincik, Y.** (2000). *Etude sur les vases acoustiques*. Thesis in Département de Physique, EPFL, Lausanne.
- [13] **Thorschmid** (1725). *Antiquitates plocenses*. Leipzig.
- [14] **Rahn, J. R.** (1869). *Von dem Chor der Oetenbacher Kirche*. Anzeiger für schweizerische Altertumskunde, Vol. 1, pp. 26-31.
- [15] **Rahn, J. R.** (1881). *Kunstgeschichtliches aus Rheinfeldern*. Allgemeine Schweizer Zeitung.
- [16] **Rahn, J. R.** (1895). *Schalltöpfe aus der ehemaligen Kapelle der hl. Drei Könige in Baden*. ASA, Vol. 7, pp. 442-443.
- [17] **Rahn, J. R.** (1903). *Wandgemälde im Chor der Oetenbacher Kirche in Zürich*. ASA, Vol. 5, pp. 150-156.
- [18] **Collectif** (1863). *Sur les pots acoustiques dans les églises du moyen-âge*. Indicateur d'histoire et d'antiquités Suisses, Vol. 2, 2ème cahier, pp. 69-70.
- [19] **Radau, R.** (1867). *L'acoustique ou les phénomènes du son*. Librairie Hachette et Cie, Paris.
- [20] **Mandelgren, N. M.** (1862). *Monuments scandinaves du Moyen Age avec les peintures et autres ornements qui les décorent*. Paris.
- [21] **Brüel, P. V.** (1951). *Sound insulation and room acoustics*. London.
- [22] **Pfeifer, H.** (1904). *Schallgefässe in mittelalterlichen Kirchen*. Die Denkmalpflege, Vol. 6, pp. 88-90 et 128-130.
- [23] **Brash** (1863). *Acoustic pottery*. Gentleman's magazine, Vol. 15, pp. 750.
- [24] **Cochet** (1863). *Acoustic pottery*. Gentleman's magazine, Vol. 15, pp. 540.
- [25] **Angelis d'Ossat, G.** (1947). *L'uso medievale dei vasi acustici nei monumenti italiani*. Cultura Atesina, Vol. I, pp. 129-134.

- [26] **Brykzinsky** (1898). *Vases acoustiques à Vlotslavek, Pologne*. Revue d'art chrétien, pp. 130.
- [27] **Krnak, M.** (1966). *Resonancni kmitocty Helmholtvovych rezonatoru s ruznymi tvary otvoru*. Slaboproudny obzor, Vol. 27, pp. 609-617.
- [28] **Floriot, R.** (1964). *Contribution à l'étude des vases acoustiques du moyen âge*. Thesis in Faculté des sciences, Université d'Aix-Marseille, Marseille.
- [29] **Floriot, R.** (1978). *Les vases acoustiques du moyen âge*. Bulletin du Groupe d'Acoustique Musicale, pp. 15.
- [30] **Fontaine, J. M.** (1979). *Etude des vases acoustiques disposés dans les églises du XI - XVIIIème siècles*. Thesis in, CNAM, Paris.
- [31] **Fontaine, J. M.** (1979). *La Correction des Eglises par les Vases Acoustiques*. Conférences des journées d'études, Paris, pp. 70-80.
- [32] **Aristote et Louis (trad.), P.** (1993). *Problèmes*. Les Belles Lettres, Paris.
- [33] **Vitruve** (1965 (réédition de la traduction de Perrault)). *Chap. V : Des vases du théâtre*. in *Les dix livres d'architecture*, pp. 90-92, Les Libraires Associés, Paris.
- [34] **Kayili, M.** (2000). *Use of cavity resonators in Anatolia since Vitruvius*. 7th ICSV, Garmisch-Partenkirchen (Allemagne), pp. 1621-1628,.
- [35] **Choisy, A.** (1929). *Artifices Acoustiques, Architecture Romane*. in *Histoire de l'architecture*. Vol. 1,2, pp. 490-491, 139-143, 248-257, Librairie Georges Baranger, Paris.
- [36] **Stöckli, W.** (1979). *Keramik in der Kirche des ehemaligen Augustiner-Chorherren-Stiftes in Kleinlützel*. Archäologie des Kantons Solothurn(1), pp. 14-48.
- [37] **Stöckli, W. et Wadsack, F.** (1999). *Vases acoustiques dans le canton de Vaud*. Atelier d'Architecture Médiévale SA, Moudon.
- [38] **Schnyder, R.** (1981). *Die Schalltöpfe von St. Arbogast in Oberwinterthur*. Revue suisse d'art et d'archéologie, Vol. 38.
- [39] **Weber, P.** (1904). *Schallgefässe in mittelalterlichen Kirchen*. Die Denkmalpflege, Vol. 6, pp. 111-112.
- [40] **Ewald, J.** (1973). *Die Ausgrabungen in der Kirche zu Gelterkinder 1969*. Baslerbieter Heimatbuch, Vol. 12, pp. 232-281.
- [41] **Viollet-le-Duc, M.** (1869). *art. Pot*. in *Dictionnaire raisonné de l'architecture*. Vol. 7, pp. 471, Morel, Paris.
- [42] **Decollogny, A.** (1971). *Cent églises vaudoises*. Lausanne.
- [43] **Helmholtz, H.** (1868). *Théorie Physiologique de La Musique*. Victor Masson et Fils, Paris.
- [44] **Jordan, V. L.** (1947). *The Application of Helmholtz Resonators to Sound-Absorbing Structures*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 19 (6), pp. 972-981.
- [45] **Ingard, U.** (1953). *On the Theory and Design of Acoustics Resonators*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 25(6), pp. 1037-1061.
- [46] **Ingard, U.** (1953). *The Near Field of a Helmholtz Resonator Exposed to a Plane Wave*. The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 25 (6), pp. 1063-1067.
- [47] **Ando, Y.** (1970). *On the Sound Radiation from Semi-Infinite Circular Pipe of Certain Wall Thickness*. Acustica, Vol. 22, pp. 219-225.
- [48] **Cummings, A.** (1972). *Acoustics of a Cider Bottle*. Applied Acoustics, Vol. 5, pp. 161-170.
- [49] **Alster, M.** (1972). *Improved calculation of resonant frequencies of Helmholtz resonators*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 24 (1), pp. 63-85.

- [50] **Alfredson, R. J.** (1972). *The Propagation of Sound in a Circular Duct of Continuously Varying Cross-sectional Area*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 23, pp. 433-442.
- [51] **Junger, M. C.** (1975). *Helmholtz Resonators in Load-Bearing Walls*. Noise Control Engineering Journal, Vol. 4 (1), pp. 17-25.
- [52] **Junger, M. C.** (1981). *Contrôle du bruit par les résonateurs de Helmholtz*. Symposium du Groupe acoustique industrielle et environnement de la SFA.
- [53] **Bigg, G. R.** (1982). *The Three Dimensional Cavity Resonator*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 85, pp. 85-103.
- [54] **Dickey and Selamet** (1998). *Acoustic nonlinearity of a circular orifice: An experimental study of the instantaneous pressure/flow relationship*. Noise Control Engineering Journal, Vol. 46(3), pp. 97-107.
- [55] **Mohring, J.** (1999). *Helmholtz Resonators with Large Aperture*. Acustica, Vol. 85, pp. 751-763.
- [56] **Levine et Schwinger** (1948). *On the radiation of Sound from an Unflanged Circular Pipe*. Physical Review, Vol. 73, 4, pp. 383-406.
- [57] **Cummings, A.** (1973). *Acoustics of a Wine Bottle*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 31(3), pp. 331-3443.
- [58] **Ingard et Morse** (1968). *Theoretical acoustics*. McGraw-Hill book company.
- [59] **Rschevkin, S. N.** (1963). *The theory of sound*. McMillan, New York.
- [60] **Leguy, J.** (1988). *Using cavity resonators as low frequency absorbers*. Audio Engineering Society, Paris.
- [61] **Dalmaï, J.** (1992). *Notre Dame du Rosaire Le Havre*. Echo Bruit, Vol. 42(Février).
- [62] **Leguy, J.** (1990). *Correction acoustique par résonateurs*. Journée thématique sur le contrôle actif acoustique et vibratoire, Lyon.
- [63] **Pretlove, T.** (1998). *Helmholtz resonators for the new Russian Orthodox church in London*. Acoustics Bulletin, Vol. February, pp. 11-15.
- [64] **Sabine, W. C.** (1917). *La prévision de l'acoustique dans l'étude d'un projet*. Conférence de la Société des architectes diplômés par le Gouvernement, Paris.
- [65] **Durand de Mende, G.** (1996). *Manuel pour comprendre la signification symbolique des cathédrales et des églises*. La maison de vie.
- [66] **Abdelazeez, M. K., Hammad, R. N. et Mustafa, A. A.** (1991). *Acoustics of King Abdullah mosque*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 90(3), pp. 1441-1445.
- [67] **Hamadah, H. A. et Hamouda, H. M.** (1998). *Assessment of speech intelligibility in large auditoria. Case study: Kuwait state mosque*. Applied acoustics, Vol. 54(4), pp. 273-289.
- [68] **Hammad, R. N. S.** (1990). *RASTI measurements in mosques in Amman, Jordan*. Applied acoustics, Vol. 30(4), pp. 335-345.
- [69] **Liénard, P.** (2001). *Petite histoire de l'acoustique*. Hermes science, Paris.
- [70] **Horat, H.** (1988). *L'architecture religieuse*. Ars Helvetica, Disentis.
- [71] **Köcke, U.** (1972). *Lettner und Chorporen in den nordwestdeutschen Küstengebieten, ergänzt durch einen Katalog der westdeutschen Lettner ad 1400*. Thesis in der Philosophischen Fakultät, Ludwig-Maximilians-Universität, München.
- [72] **Boespflug, F.-D.** (1987). *Liturgie et espace liturgique*. in *Telle église, telle parole. Remarques sur l'emplacement de la chaire à prêcher dans les lieux de culte*, pp. 19-31, Didier-Erudition, Paris.

- [73] **Speich, K. et Schläpfer, H.** (1979). *Eglises et monastères suisses*. Ex Libris, Zurich.
- [74] **Reymond, B.** (1999). *Les chaires réformées et leurs couronnements*. Etudes Théologiques & Religieuses, Vol. 74(1999/1), pp. 35-49.
- [75] **Chédozeau, B.** (1998). *De l'église médiévale à l'église tridentine*. Cerf, Paris.
- [76] **Cox, J. C.** (1915). *Pulpits, lecterns & organs in English churches*. O. U. Press, London.
- [77] **Poscharsky, P.** (1963). *Die Kanzel, Erscheinungsform im Protestantismus bis zum Ende des Barocks*. Gütersloher, Stuttgart.
- [78] **Bouyer, L.** (1991). *Architecture et liturgie*. Foi vivante, Paris.
- [79] **Gabler, W.** (1964). *Die ersten schalltechnisch wirksamen Kanzeldeckel im historischen Kirchenbau*. Die Schalltechnik, Vol. 59/60, pp. 1-5.
- [80] **Grandjean, M.** (1988). *Les temples vaudois. L'architecture réformée dans le Pays de Vaud (1536-1798)*. Bibliothèque historique vaudoise, Lausanne.
- [81] **Urech, E.** (1958). *Histoire de l'église de La Chaux-de-Fonds. Récits, documents et notes, 3ème partie*. G. Sainte-Claire, La Chaux-de-Fonds.
- [82] **Bertrand, E.** (1755). *Sur la construction et l'aménagement intérieur d'une église destinée à l'usage des protestants*. Journal Helvétique.
- [83] **Laugier, M. A.** (1765). *Observation sur l'architecture*. Mardaga 1979.
- [84] **Smith, T. R.** (1861). *A rudimentary treatise on the acoustics of public buildings - Principles of the science of sound*. Weale, London.
- [85] **Lachèz, T.** (1879). *Acoustique et optique des salles de réunions. Principes, observations et documents à considérer pour la disposition des salles de théâtres, amphithéâtres, concerts, temples et oratoires*. Chez L'auteur, Paris.
- [86] **Egan, M. D.** (1988). *Architectural acoustics*. McGraw-Hill, New York.
- [87] **Crist, E. V.** (1993). *Acoustics in the worship space: goals and strategies*. Thesis in Musical Arts, University of Cincinnati, Cincinnati.
- [88] **Glover, C. W.** (1933). *Practical acoustics for the constructors*. Chapman & Hall, London.
- [89] **Cremer et Müller** (1978). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*. H. Verlag.
- [90] **Thurian, M.** (1946). *Joie du ciel sur la terre - Introduction à la vie liturgique*. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.
- [91] **Roycien, P.-A.** (1993). *Chère chaire*. Le Protestant, janvier 1993, pp. 7.
- [92] **Buluschek, P. et Desarnaulds, V.** (1999). *Appréciation subjective de l'acoustique des églises en Suisse*. Projet d'ingénieur physicien in EPFL, Lausanne.
- [93] **Reymond, B.** (1996). *L'architecture religieuse des protestants*. Labor et Fides, Genève.
- [94] **Greff** (1904). *De l'acoustique dans les églises, par rapport à la chaire*. P. Lethielleux, Paris.
- [95] **Carvalho, A. P. O.** (1999). *The effect of pulpits in the RASTI values within churches*. INTER-NOISE '99, Fort Lauderdale (USA), pp. 989-994.
- [96] **Carvalho, A. P. O.** (1999). *Relation between rapid speech transmission index (RASTI) and other acoustical and architectural measures in churches*. Applied acoustics, Vol. 58(1), pp. 33-49.
- [97] **Eggenschwiler, K.** (1993). *Problèmes acoustiques dans les églises*. La Tribune de l'orgue, Vol. 45(3), pp. 3-9.

- [98] **Lochner, J. P. A. et Burger, J. F.** (1964). *The influence of reflections on auditorium acoustics*. Journal of Sound and Vibration, Vol. 1, pp. 426-454.
- [99] **Davis, D. et Davis, C.** (1992). *Sound System Engineering*. SAMS, Carmel.
- [100] **Haas, H.** (1951). *Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache*. Acustica, Vol. 1, pp. 49-58.
- [101] **Adam, M.** (1985). *Acoustique architecturale et acoustique des salles*. Schweizer Baudokumentation, Blauen.
- [102] **Epstein, D.** (1991). *Evaluation of the effectiveness of pulpit reflectors in three Dutch churches using Rasti measurements*. Inter-noise, Sydney, pp. 823-26.
- [103] **Chauvin, P. et Desarnaulds, V.** (2001). *Chaires et abat-voix : Mythe liturgique ou réalité acoustique ?* Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- [104] **Desarnaulds, V., Chauvin, P. et Carvalho, A. P. O.** (2001). *Acoustic effectiveness of pulpit reflector in churches*. 17 ICA, Rome.

5. OCCUPATION DE L'ESPACE

5.1 Introduction

D'après ce qui précède, on pourrait croire que les conditions d'écoute de la parole ou de la musique sont uniquement déterminées par les caractéristiques acoustiques de l'espace dans lequel elles ont lieu. Cependant, l'analyse des formes et de leur matérialisation, l'étude des dispositifs propres à favoriser la propagation ou la diffusion du son, ainsi que la caractérisation de l'environnement sonore (en particulier le bruit de fond), ne permettent pas à eux seuls de déterminer, de façon univoque, les conditions d'écoute. En effet, celles-ci sont fondamentalement tributaires de l'occupation de l'espace, qui est déterminée par la position des intervenants dans cet espace. Par intervenants, on entend ici, aussi bien les officiants et les instruments (dont principalement l'orgue et les chanteurs) produisant les sons, que les personnes qui les écoutent (officiants et assemblée). Les sources sonores et les auditeurs doivent donc se positionner de façon à profiter au mieux des conditions de propagation dans l'église afin que le message, parlé ou musical, soit transmis de façon optimum des uns aux autres. Ce qui importe, c'est non seulement la position absolue des intervenants, mais surtout la disposition relative des émetteurs et récepteurs.

Nous étudierons, dans cette partie, d'une part la position de l'orgue, instrument de musique principal utilisé lors des célébrations (mais également pour les concerts) et d'autre part, la disposition de l'assemblée par rapport à l'espace liturgique. Notre analyse portera d'abord sur l'évolution historique de la position de l'orgue et de l'assemblée dans les églises, qui est révélatrice de la place donnée respectivement à la musique instrumentale, aux officiants et à la communauté des croyants. Notre étude se penchera alors sur les conditions d'occupation actuelles qui seront analysées à partir de l'étude statistique de notre base de données sur ce sujet. Nous terminerons par l'étude, plus technique mais particulièrement importante, de l'effet de l'occupation sur l'intelligibilité de la parole.

5.2 La position de l'orgue comme révélateur de la place de la musique

5.2.1 Introduction

L'orgue, le «roi des instruments», est devenu ou redevenu depuis plusieurs siècles l'instrument de musique d'église par excellence. En fait, l'instrument entendu par l'assemblée est constitué non seulement de l'orgue mais aussi de l'église elle-même qui donnera toute la rondeur à son chant. L'orgue d'église, qui peut être utilisé pour des fonctions liturgiques ou des concerts, sera ainsi mis en valeur ou désavantagé selon son emplacement. Beaucoup a été dit (et plus rarement écrit) sur la position souhaitable de l'orgue dans une église, mais il est difficile d'en tirer une conclusion définitive ou des principes généraux. Dans cette réflexion, nous considérerons l'orgue principalement en Suisse et essentiellement dans sa fonction liturgique. Nous

proposons d'aborder la question sous différents aspects afin d'essayer de donner certains éléments de réponse ou du moins de clarifier le débat et ses enjeux. Un survol historique du Moyen Age à nos jours nous permettra d'abord d'appréhender l'évolution et la diversité du positionnement de l'orgue dans les églises au cours de l'histoire et de tirer parti de l'expérience acquise par ceux qui se sont penchés sur la question. Nous analyserons alors les divers critères qui conduisent à fixer la position de l'orgue projeté dans une nouvelle église ou remplacé (éventuellement ajouté) dans une église existante. Nous étudierons la problématique en adoptant divers points de vue, liturgique, ecclésiologique, musical, esthétique et enfin acoustique, qui retiendra plus particulièrement notre attention. Cela nous conduira à mieux cerner les avantages et inconvénients de chaque position.

5.2.2 Survol historique

Avant d'entrer dans des considérations pratiques et d'argumenter sur les avantages et les inconvénients des diverses positions possibles pour l'orgue, nous nous proposons d'effectuer préalablement un bref survol historique. Celui-ci devrait nous permettre d'appréhender l'évolution et la diversité du positionnement de l'orgue dans les églises au cours de l'histoire, d'en comprendre certaines causes et d'en saisir les enjeux, pour profiter le mieux possible de l'expérience de nos prédécesseurs.

5.2.2.1 Moyen Age

L'orgue ne prit le statut officiel «d'instrument d'église» qu'à partir du XIV^e siècle, bien qu'il fit son apparition pour accompagner la messe dès le IX^e ou X^e siècle. L'orgue ne fut pas utilisé avant cette époque dans les églises probablement du fait de l'interdiction, sous saint Jérôme (340-420), des instruments de musique durant les célébrations religieuses [1]. Durant le Moyen Age, la question de la position de l'orgue ne se posait pas vraiment du fait de la petite dimension des orgues de l'époque en comparaison des églises monumentales dans lesquelles elles furent placées. La taille de ces orgues, destinées à répondre à la Schola, permettait de les positionner n'importe où dans l'église, suivant les besoins spécifiques. Les orgues de procession, plus petites, étaient des portatifs (portées par les organistes) ou éventuellement des positifs (littéralement qui peuvent être posées, à même le sol ou sur un chariot). Elles étaient non seulement déplacées au sein de l'église mais également d'une église à l'autre. Dans les églises médiévales, il n'y avait donc aucune place conçue spécifiquement pour accueillir un orgue. En l'absence de données précises sur la question, on peut supposer que l'orgue était positionné là où étaient les chanteurs. Le positionnement le plus rationnel, pratique et probable de l'orgue principal est alors sur le côté du chœur ou, dans certains cas isolés, dans l'axe du chœur, derrière l'autel principal. Eventuellement d'autres orgues portatives (ou régales dès le XV^e siècle) étaient transportées de chapelle en chapelle pour donner la mélodie du plain-chant ou pour accompagner les voix durant les offices qui se déroulaient autour des autels secondaires (comme c'est encore le cas aujourd'hui à St-Pierre de Rome). Au Moyen Age, certaines églises disposaient d'un grand orgue, dont la sonorité pouvait remplir la nef et qui était fixé quant à lui au mur ou sur le jubé (ce qui était la position probable de l'orgue original avec montre de 4 pieds de l'église de N.-D. de Valère à Sion, vers 1435, cf. Figure 1). C'est au XV^e siècle, qui vit

la pluralité des claviers, que le positif, qui était jusqu'alors mobile, fut placé derrière l'organiste (souvent inséré dans la balustrade de la tribune) et que son clavier fut disposé en dessous de celui du grand orgue¹. Cette évolution marqua la suppression du dédoublement ou des déplacements de l'organiste.



Figure 1 A gauche, représentation par K. Witz (XV^e siècle) d'un orgue en nid d'hirondelle sur le mur sud de la nef (probablement de la cathédrale de Bâle) [2]. A droite, orgue de Valère (vers 1435) en cul-de-lampe (état depuis le XVII^e) [3]

Au XV^e siècle d'autres grands développements furent accomplis dans la facture d'orgues, et la taille des orgues augmenta, si bien qu'il fallut leur trouver une place appropriée. La grande hauteur des églises gothiques favorisa une implantation plutôt élevée. La position la plus fréquemment adoptée à la fin du Moyen Age fut en nid d'hirondelle ou cul-de-lampe (cf. Figure 1), accroché au niveau du triforium, au-dessus des grandes arcades, en face d'une entrée latérale ou proche du chœur. La paroi occidentale à l'entrée de la nef² accueillit également de telles orgues au-dessus du portail. On retrouve des implantations également dans le chœur, au-dessus des

¹ Au XVIII^e siècle, on développa ce système, en particulier en Allemagne, en utilisant, à côté de la console du grand orgue située sur une galerie (supérieure ou sur un côté), une console rapportée pour le positif sur une autre galerie (inférieure ou sur un autre côté). Cette disposition permit l'exécution de doubles chœurs avec deux continous (par exemple dans la Passion saint Matthieu de J.-S. Bach).

² Dans la suite du texte on présupposera, par souci de simplification, que les églises sont orientées d'ouest (portail) en est (chœur). Le portail occidental (ouest) correspond donc au fond de la nef, à l'opposé du chœur.

stalles ou contre le mur est. Ces orgues, ou «chœurs de tuyaux», qui étaient bien vues et entendues de partout, avaient pour fonction de dialoguer avec les chantres ou un chœur ou de jouer en soliste durant les processions, dans un style en imitation des voix.

A la Renaissance, on trouve l'orgue, qui devient plus rare, parfois au fond du transept. Le jubé, séparant le chœur de la nef, était également parfois utilisé comme support pour un orgue entendu aussi bien par la schola dans le chœur que des fidèles dans la nef.

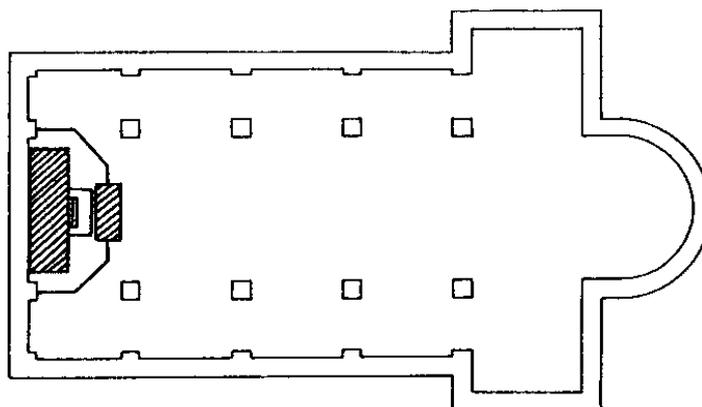


Figure 2 Schéma de la position de l'orgue sur une galerie occidentale [4]

Avec l'augmentation de taille, la construction d'une véritable tribune s'imposa. La paroi occidentale, généralement la surface la plus vaste de l'édifice, fut le plus souvent le seul endroit possible pour l'implantation de cette tribune imposante (par exemple dans les collégiales de Lucerne et Fribourg). Une telle tribune, qui permet par ailleurs un certain développement de l'orgue au cours de son histoire, fut très largement utilisée dès la fin du Moyen Âge (cf. Figure 2). En Angleterre ou en Italie, on trouve souvent le grand orgue suspendu dans le chœur au-dessus des stalles. En Italie, l'orgue était généralement intégré à la petite tribune rectangulaire des chanteurs (*cantoria*), qui est souvent admirablement décorée.

Nous constatons donc qu'à aucun moment de l'histoire de l'architecture sacrée médiévale il n'y avait de place destinée spécialement à l'orgue, et qu'il n'y avait aucun principe universel pour fixer sa position.

5.2.2.2 De la Réforme au XVIII^e siècle

Une distinction importante au niveau liturgique intervient avec la Réforme, à l'époque où la facture d'orgues était en pleine expansion. Les réformateurs limitèrent avec plus ou moins de rigueur son utilisation. Calvin instaura le chant des psaumes à une voix et interdit la musique instrumentale au culte. C'est en 1756 que l'orgue pu retentir à nouveau pour le service divin à St-Pierre de Genève. Zwingli, malgré qu'il fût un grand amateur de musique, n'accorda aucune place à la musique (ni orgue, ni chant) dans le culte. Le premier orgue du Grossmünster de Zurich qui fut construit après la Réforme ne date que de 1876. Le développement de la facture d'orgue fut nettement ralenti dans les cantons protestants du XVI^e au XVIII^e siècle, et la question du positionnement de l'orgue dans l'église ne se posait donc plus. Lorsque l'orgue fut à nouveau utilisé dans les temples réformés, ce qui fut le cas parfois assez tôt (1561

à Bâle au niveau du triforium, cf. Figure 4), il ne se cantonne plus uniquement au dialogue avec la schola ou le chœur paroissial, comme il était d'usage dans l'église catholique (cf. Figure 3), mais il doit également accompagner le chant de l'assemblée.



Figure 3 Orgue sarcophage de chœur pour accompagner la schola dans l'église conventuelle de Rheinau (Albrecht, 1710) [4]

La position de l'orgue doit tenir compte désormais de cette évolution liturgique en assurant une qualité sonore non seulement dans le chœur, mais également dans la nef. La Contre-Réforme catholique prit le parti inverse en intensifiant et multipliant, durant cette période, l'utilisation de l'orgue. Des compositeurs comme Gabrieli à St-Marc de Venise ou son élève luthérien Schütz (qui exporta cet art en Allemagne), mais également Pretorius ou Tallis développèrent la polychoralité (jusqu'à 10 chœurs³) qui entraîna une multiplication des orgues et des tribunes qui les

³ André Maugars [5] expose ainsi avec enthousiasme, en 1639, son expérience faite dans l'église de la Minerve à Rome : « Cette église est assez longue et spacieuse, dans laquelle il y a deux orgues élevées des deux côtés du maître Autel, où l'on avait mis deux chœurs de musique. Le long de la nef, il y avait huit autres chœurs, quatre d'un côté et quatre de l'autre, élevés sur des échafauds de huit à neuf pieds de haut, éloignés de pareille distance les uns des autres, et se regardant tous. A chaque chœur il y avait un orgue portatif, comme c'est la coutume : il ne faut pas s'en étonner puisqu'on en peut trouver dans Rome plus de deux cents, au lieu que dans Paris à peine en saurait-on trouver deux du même ton. Le maître compositeur battait la principale mesure dans le premier chœur, accompagné des plus belles voix. A chacun des autres, il y avait un homme qui ne faisait autre chose que jeter les yeux sur cette mesure primitive, afin d'y conformer la sienne ; de sorte que tous les chœurs chantaient d'une même mesure, sans traîner (...). Tantôt deux chœurs se battaient l'un contre l'autre, puis deux autres répondaient. Une autre fois, ils chantaient trois, quatre et cinq chœurs ensemble, puis une,

supportaient⁴ dans les églises. Celles-ci furent positionnées dans une même église de façon à accompagner et faire dialoguer ces différents chœurs en faisant le meilleur effet sonore.

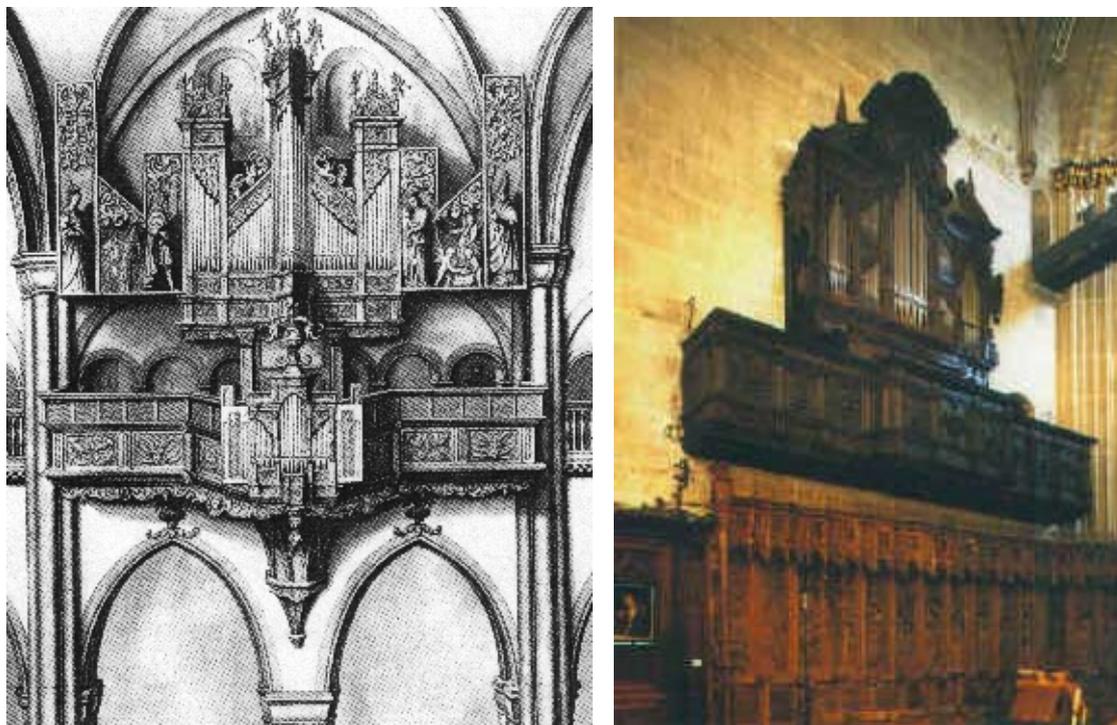


Figure 4 Orgue situé dans la nef, au niveau du triforium dans la cathédrale de Bâle au XVI^e siècle (aquarelle de Büchel, à gauche) et dans le chœur au-dessus des stalles dans la cathédrale St-Nicolas de Fribourg (Manderscheidt, 1654) [2]

Dès la fin du XVI^e et jusqu'au XVIII^e siècle, on assiste à l'apparition d'écoles nationales dans toute l'Europe favorisant non seulement le particularisme de la facture des orgues mais également celui de leur implantation dans les églises. En Espagne et au Portugal⁵, on trouve couramment deux orgues, orientées dans l'axe de l'église, avec des batteries d'anches en chamade (tuyaux horizontaux souvent rajoutés au XVIII^e siècle) se faisant face dans le «coro», espace situé au centre de la nef principale où était célébrée la liturgie. Ces orgues, qui se répondent tant architecturalement que musicalement, surplombant les stalles, comportent deux façades, l'une tournée vers le «coro», l'autre vers le bas-côté. En Allemagne et dans les Flandres, on trouve les orgues parfois situées à l'angle formé par le chœur et le transept. Les orgues de jubé furent pratiquées surtout dans les Flandres et en Angleterre (King's College, Cambridge) et plus rarement en Suisse (cf. Figure 5). Elles permettent également d'avoir une double façade et de combiner ainsi astucieusement l'orgue de chœur avec un grand orgue.

deux, trois, quatre, cinq voix seules ; et au Gloria Patri, tous les dix chœurs reprenaient ensemble. Il faut que je vous avoue, que je n'eus jamais un tel ravissement ».

⁴ Le récent et controversé rétablissement des quatre orgues sur les piliers de la croisée du transept à la cathédrale de Salzbourg en est une illustration.

⁵ Le couvent portugais de Mafra (1717-1730) possède non moins de 6 orgues (4 grandes orgues dans les transepts et 2 orgues, face à face, dans le chœur).



Figure 5 Orgue dans l'axe du chœur au dessus du jubé (église St-Michel de Zoug, à gauche [6]) ou de l'autel (cathédrale St-Ours de Soleure, Bossart 1772, à droite [2])

Dans les grandes églises deux orgues sont en effet souvent utilisées. Dans le Nord de l'Europe, un grand orgue ou «orgue de tribune» était disposé sur une galerie élevée à l'ouest alors que l'orgue de chœur ou «orgue d'accompagnement», plus petit, était placé dans le chœur (en général latéralement) ou proche de celui-ci, généralement à même le sol derrière les stalles (abbatiale devenue cathédrale de St-Gall, Bossart 1766) ou au-dessus de celles-ci (collégiale devenue cathédrale de Fribourg, cf. Figure 4). Dans ce dernier cas, la console peut cependant parfois se trouver au sol en face des stalles. Dans certains cas, l'orgue de chœur peut se trouver dans l'axe du chœur au-dessus de l'autel (cathédrale de Soleure, Bossart 1772, cf. Figure 5) ou derrière l'autel, permettant à un petit orchestre de prendre place dans le chœur entre l'orgue et l'autel. Dans certaines églises, par exemple à Muri (cf. Figure 6) ou Einsiedeln (Bossart, 1751-1754), on trouve deux orgues dans le chœur, l'un du côté de l'Épître (côté droit), l'autre du côté de l'Évangile (côté gauche).

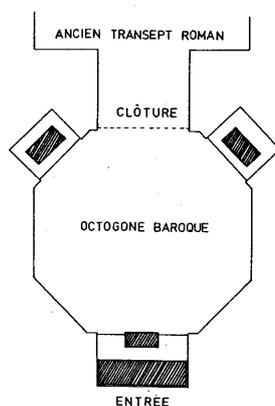


Figure 6 Position des trois orgues de l'église de Muri (1743) [4]

En Suisse, la position la plus fréquente pour les grandes orgues reste, pour des siècles encore, sur la galerie occidentale (cf. Figure 7 et Figure 9).

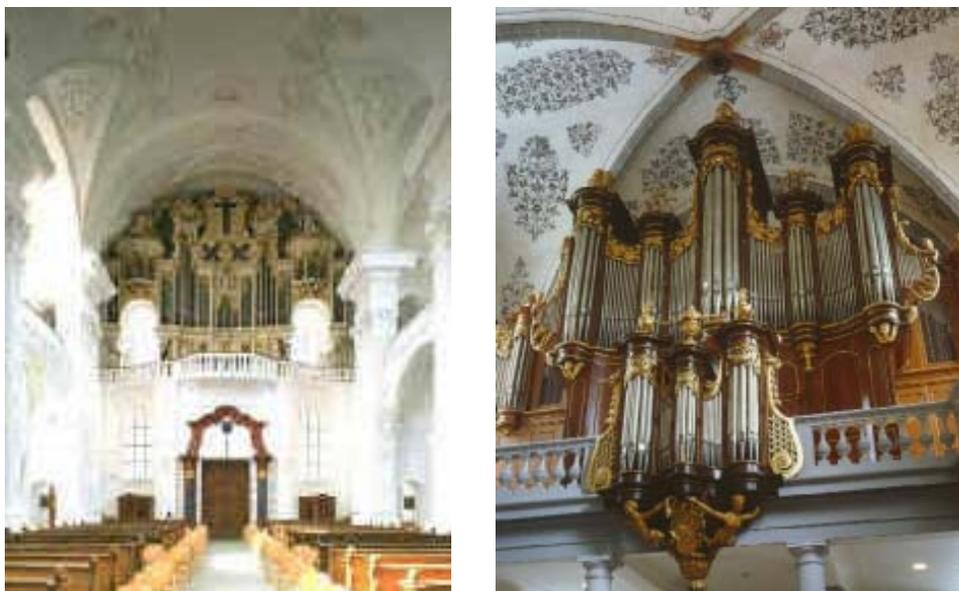


Figure 7 Grandes orgues sur galerie à St-Urban (Bossart, 1721, à gauche) et St-François de Lausanne (Walcker, 1880, à droite) (photos de Kuhn)



Figure 8 Orgue dont le buffet est organisé autour des fenêtres, église de Weingarten (Gabler, 1750)

Dès l'époque baroque, on ne se contente plus de construire des grandes orgues pour les nouvelles églises, mais on installe également celles-ci dans les anciennes églises (romanes et gothiques). Mais ces églises n'ont jamais été conçues pour recevoir de grandes orgues telles qu'on les connaît aujourd'hui. Dans les églises romanes conventuelles, la chapelle saint Michel, située au-dessus du portail occidental (à l'opposé du chœur), parfois supprimée pour y mettre un orgue, présente généralement des conditions locales inadaptées à cet usage. Par ailleurs, le traitement architectural particulier de la façade occidentale avec des vitraux de

grandes dimensions (verrière, rosace), rend souvent difficile la mise en place de grandes orgues sans masquer ces chefs-d'œuvre de lumière. Dans ce cas, l'orgue est parfois organisé autour des vitraux ou des fenêtres, le buffet est séparé en plusieurs éléments, en gardant cependant souvent la console au milieu (cf. Figure 8).

5.2.2.3 Du XIX^e siècle à nos jours

Le romantisme représente un bouleversement musical qui induit une nouvelle expansion (multiplication et modification des jeux) et de nombreuses modifications techniques de l'orgue (notamment la boîte expressive). L'orgue devient un véritable orchestre (d'où le nom d'orgue symphonique), et ses interventions sont des petits concerts qui remplissent tout l'espace d'une fabuleuse sonorisation, satisfaisant pleinement les besoins d'une piété romantique très émotionnelle. La position qui s'impose du point de vue architectural pour recevoir cet «orchestre sacré» est la galerie contre la paroi occidentale⁶. Le facteur d'orgues se préoccupe alors plus de l'aspect technique et des nouvelles inventions qu'il peut faire que de l'intégration de l'orgue dans une église. A l'architecte revient alors non seulement le choix de la position de l'orgue dans l'église, mais également la conception du buffet qui se dissocie de la conception purement technique de l'orgue⁷. Les architectes se soucient d'ailleurs plus d'imiter esthétiquement les styles de l'époque médiévale (orgue néogothique de l'église St-Jean à Schaffhouse), que de songer réellement aux enjeux de l'implantation des grandes orgues⁸. La position est alors souvent déterminée par le plus grand espace à disposition de l'architecte, par exemple au fond du chœur (église de Ringgenberg, Walpen 1837), mais plus généralement sur une galerie occidentale au fond de la nef (cf. Figure 9). En France, la combinaison des exigences «symphoniques» et liturgiques conduit au développement d'une solution «de luxe», nécessitant deux organistes. Le grand orgue «de tribune», au fond de la nef, est utilisé pour les pièces solo (mettant en valeur les performances de l'orgue et de l'organiste) et pour accompagner l'assemblée. Il dialogue généralement avec un autre orgue, situé dans le chœur, qui est utilisé pour l'accompagnement du chœur et des célébrants.

⁶ La mise en place de bancs réversibles (par exemple dans les temples de Lutry et St-François à Lausanne) permet d'orienter occasionnellement les auditeurs de concerts face à l'orgue alors que les fidèles sont normalement orientés à l'opposé, face à la table de communion ou la chaire.

⁷ Viollet-Le-Duc s'adresse ainsi à Cavallié-Coll [7]: « Mon cher, parlez-moi tuyaux, l'architecture me regarde ».

⁸ L'architecte Audsley [8] affirme en 1905 « qu'à cause de l'ignorance générale des architectes dans tout ce qui touche à l'orgue, des niches très inadéquates sont prévues et des emplacements inadaptés sont choisis pour y recevoir un orgue dans la grande majorité des églises modernes (...). Nous pensons que certains architectes d'églises considèrent les orgues comme un mal nécessaire – des choses avec lesquels ils n'ont rien à faire, excepté de faire en sorte qu'elles soient faites les plus petites possibles, et tenues hors de vue ; malheureusement cela signifie également hors d'ouïe. Comme principe, un orgue doit être bien vu pour être bien entendu – chaque obstruction visuelle conduisant à une obstruction du son ».



Figure 9 Grandes orgues sur galerie à Charmey (Mooser, 1845, à gauche) et St-Jean à Lausanne (Schweitzer, 1912, à droite) (photos de Kuhn)

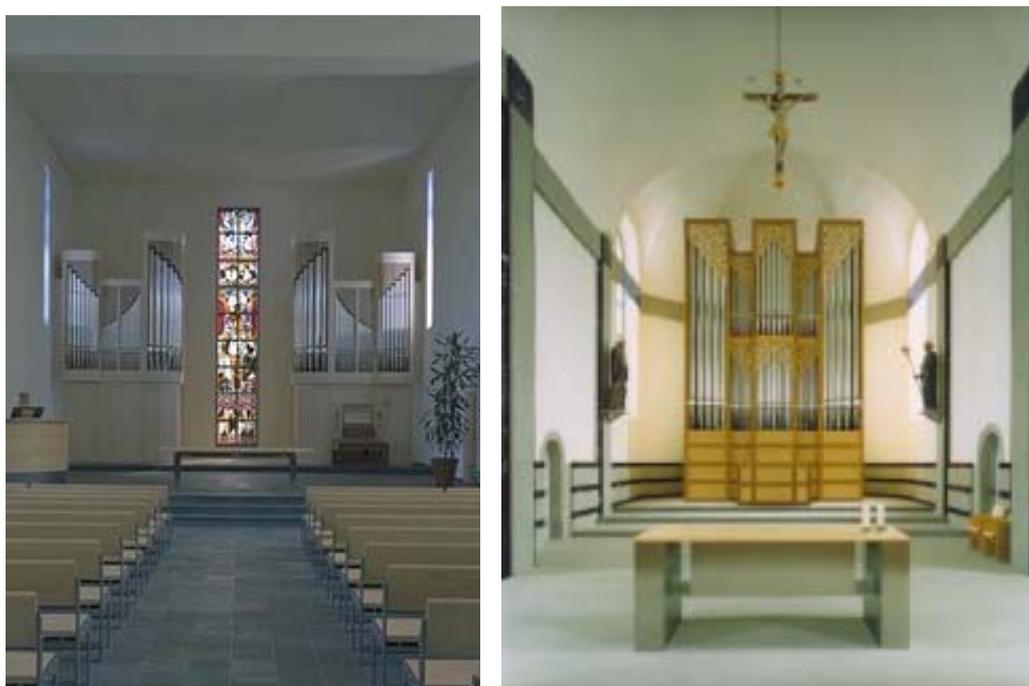


Figure 10 Orgue au fond du chœur dans les églises de Lyss (Kuhn, 1996, à droite) et d'Oberegg (Kuhn, 1997, à gauche)

Le XX^e siècle voit une rapide évolution dans la conception architecturale des églises. L'apparition des formes les plus diverses, pas toujours favorables acoustiquement⁹,

⁹ Charlin [9] ironisait à ce propos en affirmant : « Il est incroyable de voir les fantaisies auxquelles se livrent certains architectes, laissant aller leur imagination surtout pour faire du jamais vu. La chose

repose à nouveau la question de la position de l'orgue. On trouve alors d'autres réponses que la traditionnelle galerie occidentale. Une niche ou galerie, plus ou moins grande est prévue par l'architecte en fonction de son parti pris architectural. Mais le positionnement latéral au niveau du sol, dans la nef ou dans le chœur, s'observe dans de nombreuses églises construites après le concile de Vatican II, où l'assemblée est rassemblée (disposition en demi-cercle) autour de l'autel et où l'orgue est presque inclus dans l'assemblée (églises d'Hérémece, Colombière de Nyon, cf. §2.3.5). Cette réforme liturgique ramène l'orgue liturgique au cœur de la célébration, comme son ancêtre d'accompagnement dans le chœur des églises médiévales. Dans les anciennes églises, de nouvelles orgues peuvent prendre place également latéralement dans le chœur (collégiale de Neuchâtel ou temple de Corsier, Felsberg 1996) ou au fond de celui-ci (église de Lyss ou d'Oberegg, cf. Figure 10), ou encore au passage de la nef au chœur (église du Sacré-Cœur à La Chaux-de-Fonds, cathédrale de Lausanne). A côté de ces petites orgues essentiellement liturgiques, on retrouve des instruments de concert de plus grandes dimensions (dont certains, issus de l'*Orgelbewegung*, retournent aux principes des orgues anciens, en particulier ceux du XVIII^e siècle), qui conservent généralement la position classique pour les grandes orgues sur une galerie au fond de la nef. On retrouve cependant encore toutes les positions possibles, comme par exemple au fond du chœur (cf. Figure 10) ou d'un croisillon du transept (Abbatiale de Romainmôtier). Les développements de la technique permettent même d'avoir aujourd'hui des orgues mobiles (sur coussins d'air) de plus ou moins grandes dimensions¹⁰.

5.2.2.4 Synthèse du survol historique sur la position de l'orgue

Ce survol historique ne permet pas de tirer des conclusions définitives sur le meilleur emplacement de l'orgue dans une église. En effet, nous avons vu que, pour des raisons liturgiques, les petites orgues mobiles d'accompagnement étaient situées, au Moyen Age (et à nouveau de nos jours), le plus proche possible du lieu de célébration, c'est à dire de l'autel. La position des grandes orgues est par contre très variable à la fin du Moyen Age (latéralement dans le chœur, le transept ou la nef, sur le jubé ou le portail occidental) mais généralement en hauteur pour des questions acoustiques. Dès le XV^e siècle, les innovations techniques conduisent au regroupement (le positif perd sa mobilité en devenant lié à un clavier du grand orgue) et à une augmentation de la taille des orgues qui sont alors le plus souvent installées sur une galerie au fond de la nef (au-dessus du portail occidental). Cette tendance sera encore renforcée au XIX^e pour des raisons musicales (concerts spirituels romantiques) et architecturales (néomédiévalisme). L'évolution qu'a connue le XX^e siècle dans la forme architecturale des églises a conduit à une remise en question de cette position devenue traditionnelle. L'évolution de la position de l'orgue semble avoir répondu à différentes considérations d'ordre liturgique, théologique, architectural, musical et acoustique.

qu'on n'a jamais vue n'est pas forcément celle qui donnera une acoustique correcte, la plupart du temps le résultat est navrant ».

¹⁰ Le nouvel orgue de chœur de la collégiale de Neuchâtel (manufacture St.-Martin), lourd de plusieurs tonnes, peut être ainsi déplacé par un seul homme. L'orgue de l'église de Grandson est quant à lui sur roulettes.

5.2.3 Analyse statistique de la position des orgues

5.2.3.1 Introduction

Cette enquête porte d'une part sur des données objectives dont l'analyse conduit à donner une vision statistique de la situation de l'orgue en Suisse.

Pour obtenir des données objectives, nous avons demandé aux ministres des diverses paroisses contactées de remplir un questionnaire permettant notamment d'identifier le nombre et la position du ou des orgues dans l'église ainsi que la fréquence des concerts d'orgue.

5.2.3.2 Nombre d'orgues par église

Dans la grande majorité des cas (88%), on trouve un orgue dans l'église (cf. Tableau 1). Ces églises avec un seul orgue sont de taille moyenne (volume moyen de 4200 m³). Les quelques églises avec plusieurs orgues (7% des cas) présentent en général un volume important (volume moyen de 13'300 m³) qui accueille en plus d'un grand orgue (en général derrière), un orgue de chœur situé devant ou latéralement. On trouve dans cette catégorie également des églises avec des doubles orgues de chœur ou des petites orgues de concerts. A l'opposé, les rares églises qui ne possèdent pas d'orgue (5% des cas) sont plutôt petites (volume moyen de 700 m³).

Tableau 1 Nombre d'orgue(s) par église

	Nombre d'églises	(%) d'églises	Volume moyen (m ³)
Eglises avec un orgue	91	88%	4'200
Eglises avec plusieurs orgues	7	7%	13'300
Eglises sans orgue	5	5%	700
Total	103	100%	4'650

5.2.3.3 Position des orgues

Les orgues sont situées généralement derrière l'assemblée (68% des cas), plus rarement latéralement (19% des cas) ou devant (14 %). Cette proportion change légèrement si on considère comme critère le nombre de concerts d'orgue. La proportion d'orgues de concerts en position arrière est alors encore plus importante (78%), probablement parce que c'est la plus commode du point de vue architectural pour disposer de grandes orgues. La proportion d'orgues de concerts en position avant (12%) devient plus importante que celle d'orgues en position latérale (10%), sans doute pour des questions visuelles et acoustiques.

Une analyse détaillée montre (cf. Tableau 2) qu'on trouve des orgues frontaux principalement dans les églises réformées. Les orgues latéraux se retrouvent plutôt dans des églises modernes (après Vatican II) en ce qui concerne les églises catholiques, ainsi que dans des églises réformées relativement anciennes.

Tableau 2 Position des orgues

Position des orgues	Nombre d'orgues	(%)	Nombre de concerts	(%)
Latérale	19	18%	37	10%
Derrière	72	68%	278	78%
Devant	15	14%	44	12%
Total	106	100%	359	100%

Cette étude statistique portant sur 112 églises catholiques et protestantes de Suisse nous a permis de constater que la plupart des églises (88%) possèdent un seul orgue. Les petites églises n'en possèdent parfois pas alors que les grandes en ont souvent plusieurs. 68% des orgues (78% pour les orgues de concerts) sont situées derrière l'assemblée.

5.3 Les sièges comme révélateurs de la liturgie

5.3.1 Introduction

Lorsqu'on aborde le thème de la liturgie et du mobilier qui lui est associé, on est vite absorbé par les éléments essentiels que sont la Sainte Cène avec l'autel où elle se déroule, la lecture et prédication de la Parole avec la chaire où elles sont déclamées. Cependant, si l'on conçoit fondamentalement le culte comme lieu de rencontre entre Dieu et son peuple, le culte apparaît alors plus comme un lieu de présence que d'action. L'élément essentiel du culte n'est pas alors ce qui s'y passe mais ceux qui y participent. Le mobilier le plus révélateur de cette présence communautaire à Dieu est alors les simples bancs et chaises, qui sont comme des empreintes laissées par l'Eglise, corps du Christ, dans les maisons où elle se rassemble. Ce type de mobilier, qui marque, par son rythme, l'occupation faite de cet espace de rencontre entre Dieu et les hommes, dévoile par sa qualité, sa quantité et son agencement une certaine conception de la liturgie et de l'Eglise. Comme nous le verrons au chapitre suivant, les conséquences acoustiques de l'organisation des sièges sont également très importantes du point de vue acoustique.

Dans cette réflexion, nous nous proposons d'étudier dans un premier temps comment l'existence, la position, la destination et le rôle des sièges dans les églises ont évolué au cours des siècles, et ce parallèlement à la liturgie et à l'ecclésiologie. Dans un deuxième temps, nous réfléchirons aux possibilités et aux enjeux des sièges pour un culte d'aujourd'hui en nous basant sur les résultats de notre analyse statistique concernant la disposition de l'assemblée et le taux d'occupation.

5.3.2 Evolution historique

5.3.2.1 Les premières communautés prennent place où elles le peuvent

Issus du judaïsme, les premiers chrétiens se rassemblaient d'abord dans des synagogues. Les membres de la communauté, tous égaux spirituellement, y avaient l'habitude de s'asseoir par terre ou sur des sièges, autour d'une tribune d'orateur surélevée (*bèma* ou chaire de Moïse), située au milieu de la pièce. Quelques bancs étaient parfois disposés le long des murs. Seul le lecteur se tenait debout sur ce pupitre pour être entendu de tous¹¹. Le Christ étant, par son Saint-Esprit, dans la personne de ses disciples, la communauté des croyants réunis en son nom est donc en elle-même le nouveau temple fait de pierres vivantes. Saint Clément d'Alexandrie (II^e – III^e siècles) dira ainsi «ce à quoi je donne le nom de temple, ce n'est pas à l'édifice, mais à l'assemblée des élus» [10]. L'Eglise primitive pouvait alors se rassembler n'importe où, pour entendre une prédication et célébrer son culte, aussi bien en plein air que dans des lieux publics comme l'aréopage ou une classe d'école, mais surtout dans des lieux privés comme une maison¹². Nul besoin donc de chaise à cette époque, vu la mobilité des lieux et l'habitude orientale d'être assis par terre. Seuls des personnages éminents, comme les évêques, disposaient de sièges, conformément à la tradition antique puis médiévale, qui voulait que celui qui parlait d'autorité le faisait assis devant des auditeurs debout. L'assemblée se regroupe autour d'un autel qui est situé en son sein. Comme le relève F. Debuyst [11], «l'importance du centre – et du «centre du centre» qu'est l'autel – était évidente et tangible dans l'ensemble des basiliques de Rome et de l'Empire, mais peut-être surtout dans celles de l'Afrique du Nord. Là l'autel, protégé par un petit mur, se situait effectivement au centre de la grande nef, c'est-à-dire relativement loin de l'autre pôle de la liturgie, le siège épiscopal dressé au fond de l'abside». Ajoutons que l'église, comme l'assemblée chrétienne, garde une certaine orientation géographique, non plus, comme les juifs, vers Jérusalem mais vers l'Est, vers le soleil levant, signe de la résurrection.

5.3.2.2 Des sièges ... pour les clercs

Dès 313 l'Eglise s'officialise, et les lieux de culte chrétien n'ont plus besoin de se dissimuler. En adoptant de plus en plus souvent, pour lieu de célébration, le tombeau d'un martyr dont ils vénèrent les reliques (où ils localisent matériellement une forme de présence divine qui devient l'objet de pèlerinage), les chrétiens retournent, comme au temps du Temple, à une sacralisation du lieu plutôt que de l'assemblée. C'est enfin le clergé qui est peu à peu sacralisé. Progressivement, on aménage alors un banc¹³ ou des sièges réservés aux clercs, dans l'ancien *triclinium* des maisons

¹¹ Lc 4,16.

¹² La maison-église de Doura Europos sur l'Euphrate (env. 232) est un témoin privilégié de la pluralité spatiale de l'architecture paléochrétienne : de la zone d'entrée à la double salle de célébration de la Cène en passant par le baptistère ou la salle d'enseignement des catéchumènes, chaque pièce avait une fonction particulière.

¹³ Des vestiges de ces premiers bancs de pierre furent retrouvés dans la première église de Zillis et celle de St.-Pierre de Coire, construite vers 500. Une séparation du clergé apparaît nettement avec le

privées (où précédemment la Cène était célébrée communautairement), qui devient sanctuaire où eux seuls peuvent se tenir, alors que le reste de l'assemblée prend place dans l'ancien *atrium* (cf. Figure 11).

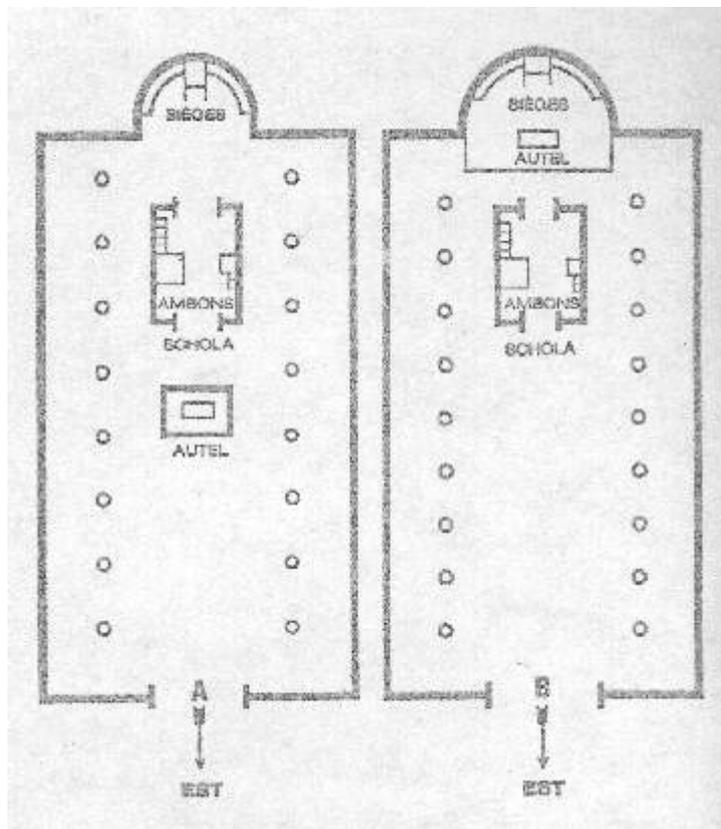


Figure 11 Evolution dans les premières basiliques de la place de l'autel qui passe de la nef, au milieu des fidèles, à l'abside réservée aux prêtres [12]

Le volume occupé par les clercs (chœur) se sépare encore davantage de celui des fidèles (nef) avec la mise en place de jubés. La différenciation théologique (ontologique) du clergé par rapport au reste de la communauté apparaît dans la différenciation de position spatiale et l'apparition de sièges spécifiques dans les églises. Le développement des monastères et des églises à chapitre voit l'émergence de sièges spécifiques pour les moines sous la forme de stalles, généralement disposées en rangées face à face pour favoriser acoustiquement le chant antiphoné. Dès le XIII^e siècle, le banc des prêtres fut peu à peu complété par des sièges utilisés spécifiquement par les célébrants (en général trois, d'où l'appellation de siège trinaires, par exemple dans l'abbaye cistercienne de Kappel) encastrés dans le mur du presbyterium¹⁴. Une distinction est ainsi progressivement faite au sein même du clergé en particulier avec le trône de l'évêque (ou de l'abbé), qui quitte le sommet de l'abside pour rejoindre la partie Nord du presbytérium. Dès le Moyen âge, l'importance des monastères ne cesse de croître, si bien que la fonction

banc surélevé en pierre qui cernait la pierre d'autel en s'avancant dans la nef jusqu'à la clôture du chœur dans l'église du haut moyen âge de Glaris II.

¹⁴ Espace réservé aux prêtres, en grec *presbytés*.

et les privilèges des puissants abbés s'afficha au travers de la réalisation de trônes abbatiaux aussi ornés que les retables (cf. Einsiedeln) et des stalles délicatement et richement sculptées. Quant aux laïcs, ils déambulaient durant les offices du Moyen Age d'un autel à l'autre, d'une chapelle à l'autre, dans de longues processions à travers la nef et le déambulatoire. Tout banc ou chaise aurait entravé le mouvement processionnaire des fidèles. Ceux-ci venaient d'ailleurs plus pour «voir» le sacrifice de la messe et faire leurs dévotions personnelles que pour participer à une liturgie de plus en plus complexe, laissée aux seuls prêtres et moines. Avec l'apparition d'ordres de prêcheurs ambulants (dominicains, franciscains), l'enseignement est à nouveau valorisé dans (ou hors) des églises. Pour des raisons de commodité (liées notamment aux exigences acoustiques), on place les chaires où se déroule la prédication (qui n'a pas le caractère sacré de l'Eucharistie) au milieu des nefs. Lors des prônes, les fidèles se regroupent debout autour de la chaire, en apportant éventuellement une chaise pliable ou un tabouret, vu la longueur des prédications. Contrairement à la liturgie, qui implique une dynamique des mouvements, la prédication, qui demande la concentration de l'écoute, est statique. Avec la valorisation de la prédication, on assiste ainsi à l'émergence de l'utilisation de nouveaux types de sièges, non seulement pour les clercs mais également pour les fidèles.

5.3.2.3 Les premiers bancs, hiérarchisés, pour les fidèles

Dès le XIII^e siècle, des places furent réservées dans les églises pour les rois et les seigneurs. Un siècle plus tard, des sièges privés furent également aménagés dans les églises pour leur fondateur ainsi que pour de nombreuses personnalités aisées ou de riches propriétaires terriens. Au XV^e siècle, certaines églises disposent d'un assemblage disparate de bancs et chaises, souvent disposés de manière peu pratique non seulement pour les nantis mais également pour le peuple. En 1518, l'agencement des bancs de l'église Saint-Pierre de Bâle était même décrit comme «inconvenable et bizarre, l'un élevé, l'autre bas, l'un nouveau, l'autre vieux. Pour cette raison, de nombreuses personnes ne voulaient pas assister à la messe et des discussions, des disputes, du bruit et du dérangement en résultaient» [6]. Ce n'est qu'avec la Réforme qu'on en est venu à installer systématiquement des sièges et des bancs regroupés autour de la chaire et de la table de communion, pour que tous les fidèles puissent bien entendre et voir le pasteur. Ainsi en 1553, le catholique Antoine Cathelan, de passage à Lausanne, raconte: «c'est comme dedans un collège ou une école, tout y est plein de bancs, et une chaire au milieu pour le prêcheur, et plus bas au devant d'elle, des bancs pour les femmes et les petits enfants, et tout autour, plus haut, pour asseoir des hommes, sans différence de personnes». Cette nouvelle utilisation de l'espace correspond au profond bouleversement liturgique et ecclésiologique apporté par la Réforme. En effet, cette disposition met en valeur le sacerdoce universel permettant à chacun («sans distinction de personne»), et communautairement à toute l'assemblée, de participer à un culte centré autour de la Parole de Dieu et des sacrements, forme retrouvée de communion avec Dieu. La redécouverte de l'importance de l'assemblée, image du corps du Christ, associée à la désacralisation du clergé s'est traduit concrètement par le passage d'une liturgie précédemment dite par les clercs dans le lieu saint (chœur séparé des fidèles par le jubé) à un culte célébré par tout le peuple de Dieu, rassemblé dans un volume réunifié et désacralisé (généralement la nef).

Cependant, le sacerdoce universel était vécu dans le strict système hiérarchisé de la société civile du XVI^e siècle. Comme la position et la facture des stalles ou des trônes épiscopaux étaient à l'image de la puissance et de la hiérarchie ecclésiastique, les chaises utilisées par les laïcs reflétaient l'appartenance et l'importance sociale des fidèles, et ce jusqu'au XIX^e siècle tant dans l'église protestante que catholique (à la suite des protestants, ceux-ci installèrent de nombreux sièges dans leurs églises). Les notables (bailli, maire, membre du Conseil de la ville, maître d'école, juge, dignitaire, grande famille ou noblesse), ou les personnes concernées par un événement religieux (parents en deuil, parrains et marraines de baptisés, mariés) disposaient de sièges individuels, voir personnels, alors que le reste du peuple (les citoyens ordinaires) prenaient généralement place sur des bancs communs, situés aux moins bonnes places¹⁵ (cf. Figure 12). Les plans de disposition des places devinrent «des représentations du monde en miniature, qui, à chaque office, se donnait à nouveau en spectacle à l'église» [6]. La séparation était non seulement de classe mais de sexe. Ainsi jusqu'à Vatican II, les femmes (placées en général à gauche) étaient souvent séparées des hommes.



Figure 12 Banc poutre au fond de l'église pour les citoyens ordinaire (à gauche, église de Rovray) et banc sculpté et délimité pour les notables (banc de la famille Cerjat, 1611, dans l'église St-Etienne de Moudon) [13]

Mentionnons enfin que des théologiens comme B. Reymond [14] reconnaissent que l'utilisation généralisée de bancs dans les églises de la Réforme, puis catholiques, n'est pas seulement l'expression du sacerdoce universel, mais qu'elle vient aussi simplement du souci d'ordre et de discipline. Une assemblée bien assise sur des bancs fixes laisse le sentiment d'une communauté ordonnée, ce qui passait pour un indice de moralité.

Vu l'importance donnée à la prédication et au sens communautaire, notamment au niveau du chant des psaumes, la disposition en « quadrangle choral réformé » fut logiquement adoptée dans les églises passées à la Réforme ou dans les nouveaux temples réformés (cf. Figure 13 et Figure 14).

¹⁵ Dans l'église du Saint-Esprit à Berne, certains sièges comportent encore des inscriptions de noms et des blasons, alors que les bancs du fond de la galerie, encore d'origine, ne sont que de simples poutres. Dans cette église, comme dans beaucoup d'autres, les places de part et d'autre de la chaire étaient réservées aux conseillers de paroisse. On peut enfin toujours voir dans cette église, les sièges des chantres qui prenaient place sur la galerie dans l'axe de l'église, position qui leur permettaient d'être bien entendus dans l'ensemble de l'église.

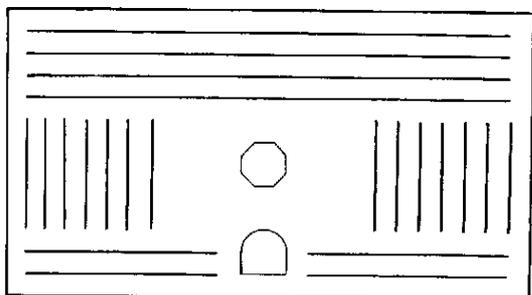


Figure 13 Schéma de disposition en « quadrangle choral réformé » [15] et exemple dans l'église de Villars-sous-Yens [16]

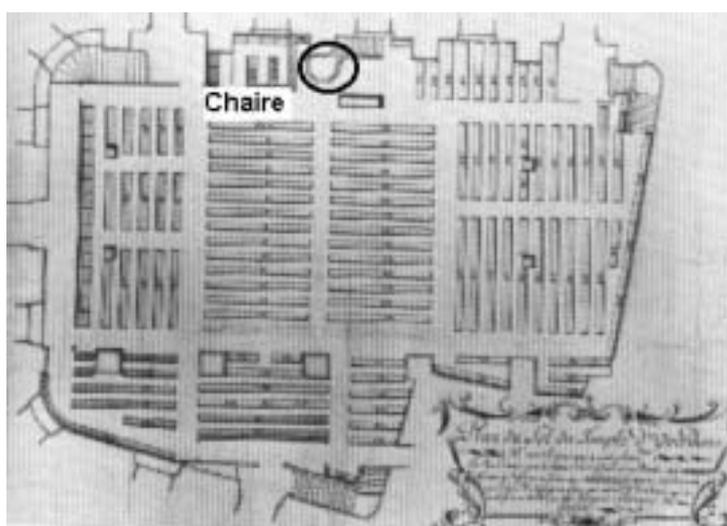
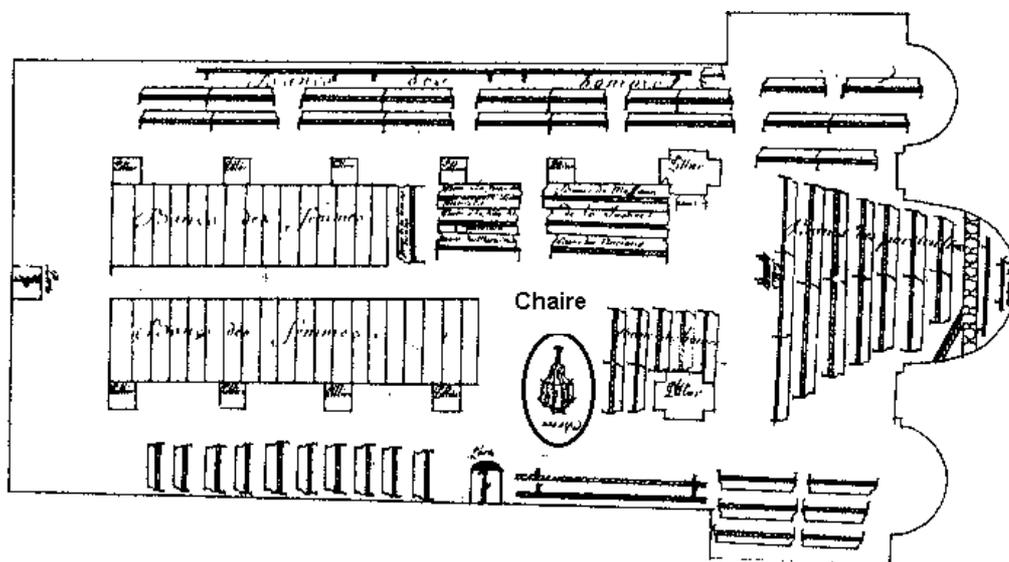


Figure 14 Organisation des sièges « en large » autour de la chaire dans l'ancienne collégiale de St-Imier (en haut) et le temple d'Yverdon (en bas, plans du XVIII^e siècle) [13; 16]



Figure 15 Exemple de disposition centrée dans le chœur autour de la table de communion de l'église de Ftan

La disposition typiquement réformée «en large», principalement en «U» ou en amphithéâtre¹⁶, tombe avec le temps en désuétude chez les protestants. Avec le siècle des Lumières et le rationalisme, le sermon se transforme en une conférence pieuse et prend une part prépondérante de la liturgie. L'assemblée se transforme alors en auditoire passif, et les temples en salle de conférence.

5.3.2.4 « En rang d'oignons »

Pour figurer l'importance de la prédication, la chaire, de plus en plus imposante, est disposée de façon dominante dans l'axe principal du temple, en face (et non plus au milieu) de l'assemblée, devenue auditoire. Les bancs, situés avant de façon convergente autour de la chaire (et du pasteur), sont maintenant alignés face à elle (disposition «en long», cf. Figure 16). La chaire, symbole et objet de pouvoir, prend de plus en plus de place face et au dessus de l'assistance. La création de pseudo-chœur, sous la forme d'abside polygonale, renforce encore l'impression d'éloignement entre la chaire et les bancs.

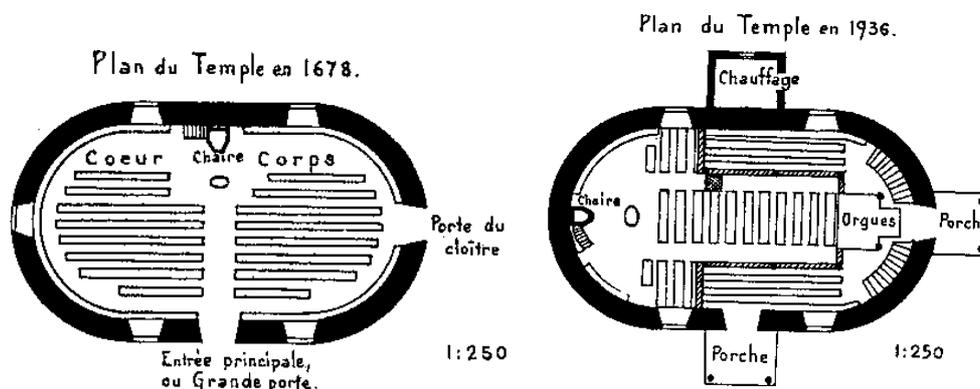


Figure 16 Exemple de changement d'orientation de l'assemblée dans l'église d'Oron. La disposition typiquement réformée en large autour de la chaire devient en long face à la chaire [16]

¹⁶ L'exemple du temple de Chêne-Bougerie en est une parfaite illustration. Notons que dans cette église, les bancs en gradins tout autour de la chaire ont conservés encore les noms des personnes ayant « réservé » leur place en versant une contribution pour sa construction.

Au XIX^e siècle, on assiste à l'essor des considérations esthétiques néo-médiévales. La nostalgie du Moyen Age et de sa supposée ferveur conduit à prendre exemple sur les modèles d'architecture et d'organisation de l'espace de l'époque gothique. On préféra alors supprimer dans les grands temples historiques (comme à Genève) «ces galeries en bois, qui occupaient une si grande place (...) sans rien ajouter (tout au contraire) à la beauté de l'édifice (...) et transporter dans la nef les bancs disposés alors en amphithéâtre» [17]. Au début du XX^e siècle, un renouveau liturgique va également exhumer les trésors liturgiques de la tradition médiévale. Ces emprunts aux liturgies anciennes finissent par modifier la structure du culte qui s'apparente alors à un rituel romain simplifié et épuré des éléments contraires à la doctrine réformée. Dans la logique de cette évolution, on déplace la chaire sur le côté pour créer un espace surélevé, où la liturgie devient un peu comparable à l'action dramatique d'un théâtre qui se déroule en dehors de l'assemblée (cf. Figure 17). Mise à part l'absence de liberté de mouvement imposée par des bancs «en rang d'oignons», on retrouve, comme au Moyen-Age, l'anonymat d'une religiosité individualiste associé à un rituel liturgique se déroulant dans un espace qui n'est plus sacralisé mais tout de même situé en dehors de l'assemblée.



Figure 17 Espace orienté en long avec la chaire sur le côté de la « scène liturgique » (église de Montriond, Lausanne)

5.3.2.5 Retour aux sources

Après la deuxième guerre mondiale, on assiste à l'émergence d'un renouveau théologique et liturgique puisant son inspiration dans la Réforme et l'Eglise primitive. Renouvelé par la redécouverte du sens de la communauté, le culte est à nouveau le lieu de rassemblement des fidèles pour rencontrer le Dieu vivant autour de sa Parole et de la Communion eucharistique, et non l'occasion d'assister passivement à un mystère ou d'entendre une pieuse conférence. Ce renouveau a marqué l'Eglise catholique avec le concile de Vatican II, qui a profondément bouleversé ses habitudes liturgiques et a eu pour conséquence une modification importante de

l'occupation et de la division de l'espace dans l'église¹⁷ (cf. Figure 18, Figure 19 et Figure 20).

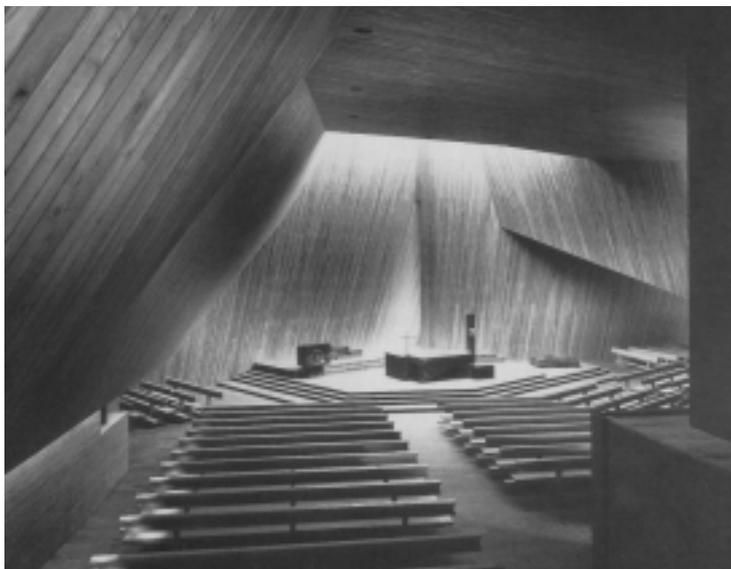


Figure 18 Exemple de disposition centrée dans l'église de Witikon (Dahinden, 1966) [6]

Les fidèles, qui assument (encore timidement) la responsabilité du culte, sont regroupés tout autour de l'autel et du prêtre qui font partie de l'assemblée, comme au temps du début du christianisme. Paradoxalement, ce renouveau a plus de peine à prendre corps dans le protestantisme, qui reste bien souvent tributaire d'un passé plus ou moins récent avec des bancs en long et un espace liturgique surélevé. C'est ainsi surtout dans des églises catholiques que l'on trouve actuellement des nouvelles constructions ou des transformations qui utilisent plus volontiers un plan centré (à la base typique de la Réforme), souvent en demi-cercle autour de l'autel. La peur des vis-à-vis gênants conduit alors à adopter, dans certains cas, une orientation mixte. Le compromis d'agencement des bancs «en épis» ou la symétrisation diagonale (bancs à angle droit), véritable bâtard entre la disposition en large et en long, permet d'éviter aussi bien les travées parallèles que les face-à-face. L'utilisation d'une disposition centrée est cependant la cible de critiques des milieux traditionalistes catholiques qui souhaitent un retour à l'ancienne liturgie célébrée dos aux fidèles. Ainsi le cardinal Ratzinger affirme [19] que "la position du prêtre tourné vers le peuple a fait de l'assemblée priante une communauté refermée sur elle-même".

De nombreux projet de transformation d'église tentent aujourd'hui de redéfinir l'occupation de l'espace dans les églises en tenant compte des besoins liturgiques actuels (cf. Figure 19 et Figure 20).

¹⁷ Cette évolution ainsi que de nombreux exemples sont présentés par F. Debuyst [18].



Figure 19 Passage, dans l'église catholique de Vétroz en croix latine, d'une organisation traditionnelle en long à une disposition centrée après Vatican II [20]

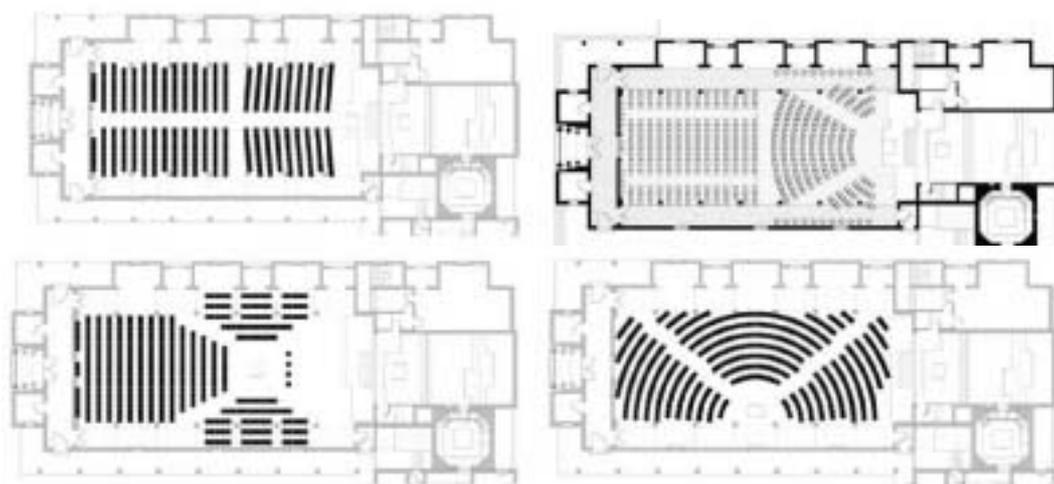


Figure 20 Projet de transformation de l'église St-Pierre de Fribourg avec une disposition en épi et en long (en haut à gauche), centrée et en long (en haut à droite), en quadrangle (en bas à gauche) et en demi-cercle (en bas à droite) (projet du bureau Longchamp)

Notons enfin que, de plus en plus, les églises semblent délaisser les bancs, plus communautaires mais moins maniables, afin d'opter pour des chaises¹⁸, qui permettent une certaine polyvalence et l'adaptation de la taille et de l'orientation de l'assemblée suivant les occasions. Par ailleurs, la diminution du nombre de participants aux célébrations religieuses conduit à d'importantes conséquences au niveau acoustique. En effet, en général les églises sont conçues pour un nombre

¹⁸ Notons toutefois que l'usage de chaises avec un placet en paille (comme dans les temples de St-Jacques ou la cathédrale de Lausanne) sont souvent source de craquements continuels et donc d'une augmentation sensible du bruit de fond.

déterminé de fidèles qui, par leur présence, permettent d'abaisser sensiblement le temps de réverbération et d'améliorer ainsi notablement l'intelligibilité par rapport à la situation église vide. Ainsi, dans certaines églises, la faible occupation ne permet pas d'abaisser suffisamment la réverbération pour obtenir une intelligibilité de la parole acceptable. L'utilisation de coussins sur les bancs¹⁹ ou de chaises rembourrées²⁰ permet alors parfois de compenser, d'une certaine façon, l'absorption des personnes absentes (cf. Figure 21).

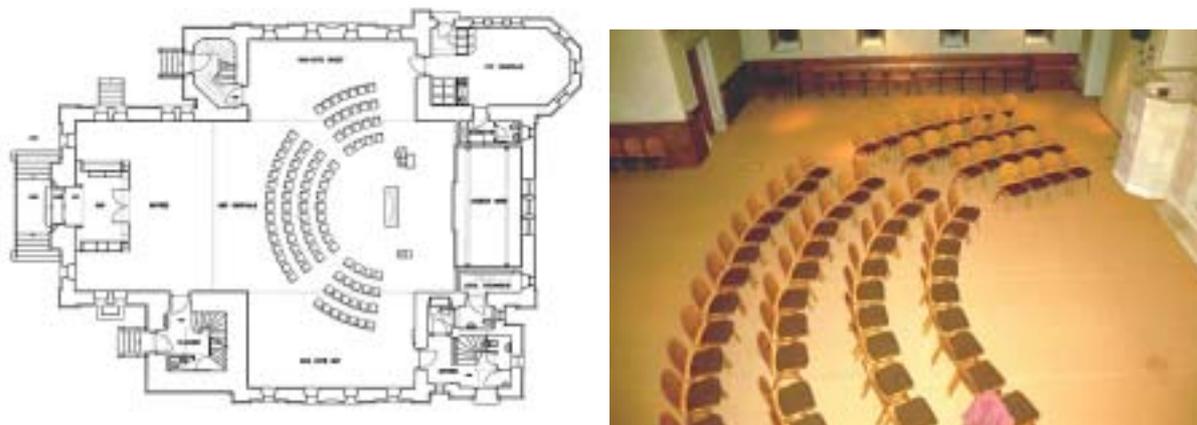


Figure 21 Organisation centrée des chaises absorbantes dans l'église du Pasquart à Bienne (plan et photo de T. Mikulas)

5.3.2.6 Synthèse du survol historique

Ce bref survol historique nous a permis de constater que, depuis le début du christianisme, l'organisation de l'espace de l'église, marquée par la position des participants au culte, a suivi et gardé la trace de l'évolution liturgique et ecclésiologique de l'Eglise. On a pu notamment relever le va-et-vient entre une disposition en large ou en plan centré (Eglise primitive, Réforme, Vatican II), donnant l'image d'une assemblée communautaire, unie pour rencontrer Dieu autour de sa Parole et de la Cène, avec une disposition en long (XVII^e – XX^e siècle), représentative d'une foi individualiste, où les laïcs assistent à un véritable spectacle liturgique donné par un clergé extérieur à eux en regardant un mystère ou écoutant passivement une pieuse conférence.

¹⁹ Parmi les églises avec des coussins sur les bancs, on peut citer Yens, Oberuzwil, St-Martin à Zufikon, St-Antoine à Bâle ou Ins (Anet).

²⁰ Par exemple dans les temples de Rolle et du Pasquart à Bienne ou le centre œcuménique de Froideville.

5.3.3 Analyse statistique de la disposition des fidèles

Afin d'étudier les conditions actuelles d'occupation et l'orientation de l'assemblée dans les églises en Suisse, nous avons effectué, dans le cadre de notre enquête auprès des utilisateurs (cf. questionnaire 1 en annexe D), une analyse statistique des réponses données par les ministres²¹ sur ce sujet.

5.3.3.1 Orientation de l'assemblée

Une des questions adressées aux ministres responsables des églises recensées, concernait "l'orientation usuelle des bancs ou chaises" définie selon la typologie représentée en Figure 22.

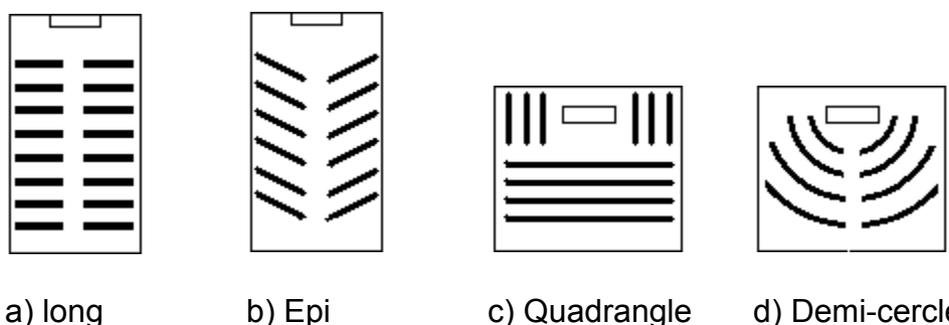


Figure 22 Typologie de l'orientation de l'assemblée utilisée dans le questionnaire

On constate (cf. Tableau 3), que la plupart (71%) des églises en Suisse sont orientées en long. Cette proportion est légèrement plus importante dans les églises catholiques (74%) que réformées (69%). Le reste des églises se partage, de façon à peu près identique, entre les orientations en épi, en quadrangle et en demi-cercle.

Tableau 3 Résultats statistiques de l'orientation de l'assemblée

Orientation	Catholique	Réformé	Total
Long	74%	69%	71%
Epi	8%	10%	10%
Quadrangle	9%	9%	9%
Demi-cercle	9%	12%	11%

Notons que ces proportions varient quelque peu suivant l'époque de construction des églises. Ainsi, parmi les églises modernes, on constate une diminution de l'orientation en long, qui reste cependant majoritaire (59%), ainsi que de l'orientation en quadrangle (4%). Les édifices modernes favorisent davantage les orientations en demi-cercle (22%) et en épi (15%). Relevons enfin que l'orientation en quadrangle, dont l'origine vient des premières églises adaptées ou construites après la Réforme, est davantage représentée (19%) parmi les édifices réformés de l'époque baroque.

²¹ Prêtres ou pasteurs responsables des églises ayant fait l'objet de mesurages objectifs.

5.3.3.2 Occupation

Sur la base de l'estimation, par les ministres responsables des églises recensées, de "l'occupation moyenne lors de célébrations religieuses" et du nombre total de places relevé parmi le paramètre objectif, nous avons défini l'occupation moyenne des églises comme le rapport de ces deux grandeurs. Cette grandeur, exprimée en pourcentage, correspond au taux moyen d'occupation de l'église durant une célébration (0% correspondant à l'église vide et 100% à l'église pleine).

Globalement, on constate que les églises sont, en moyenne, faiblement occupées durant les célébrations religieuses, seul un tiers de la capacité totale étant utilisé. Il existe cependant d'importantes différences suivant les églises (l'écart type de l'occupation est de 23%), notamment en fonction de la confession. En effet, le taux d'occupation durant les messes catholiques ($51\% \pm 23\%$) est plus du double de celui des cultes réformés ($25\% \pm 18\%$).

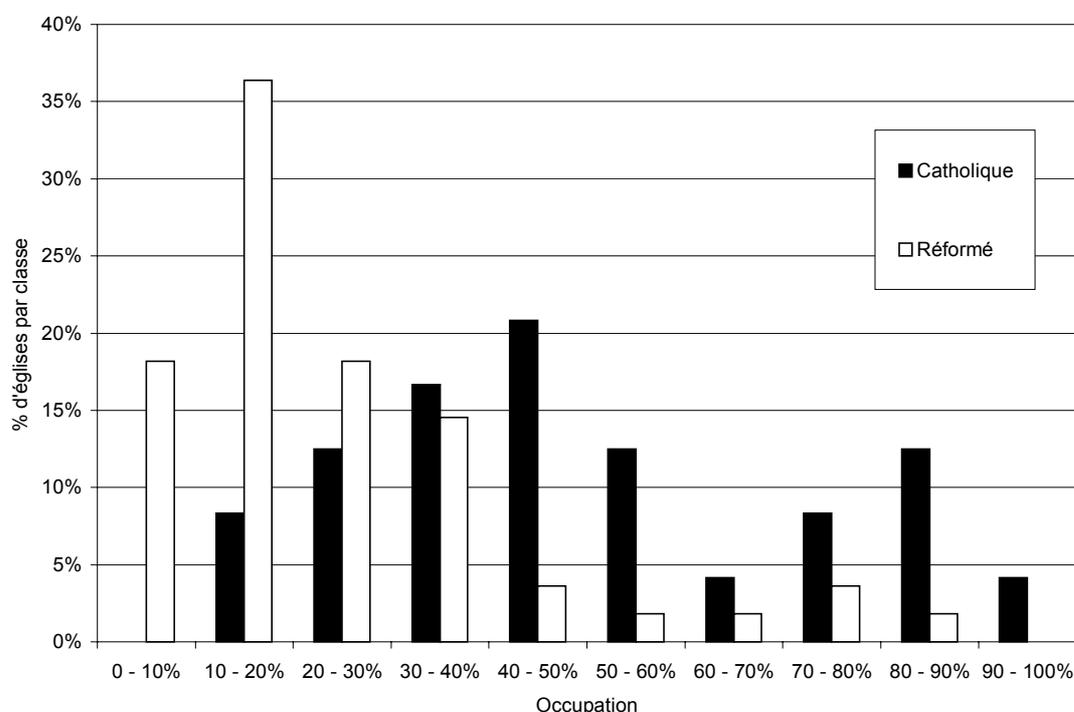


Figure 23 Répartition statistique de l'occupation suivant la confession

L'analyse détaillée de la répartition statistique de l'occupation suivant la confession, permet de confirmer et préciser cette dernière remarque. On constate en effet (cf. Figure 23) un maximum d'occurrence pour le culte pour un taux d'occupation de 10 à 20% contre 40 à 50% pour les messes. Dans ce dernier cas, on constate l'existence d'une distribution gaussienne secondaire, centrée sur le taux d'occupation de 80 à 90%, alors que les églises concernées ne présentent pas de caractéristique géométrique ou d'orientation particulière.

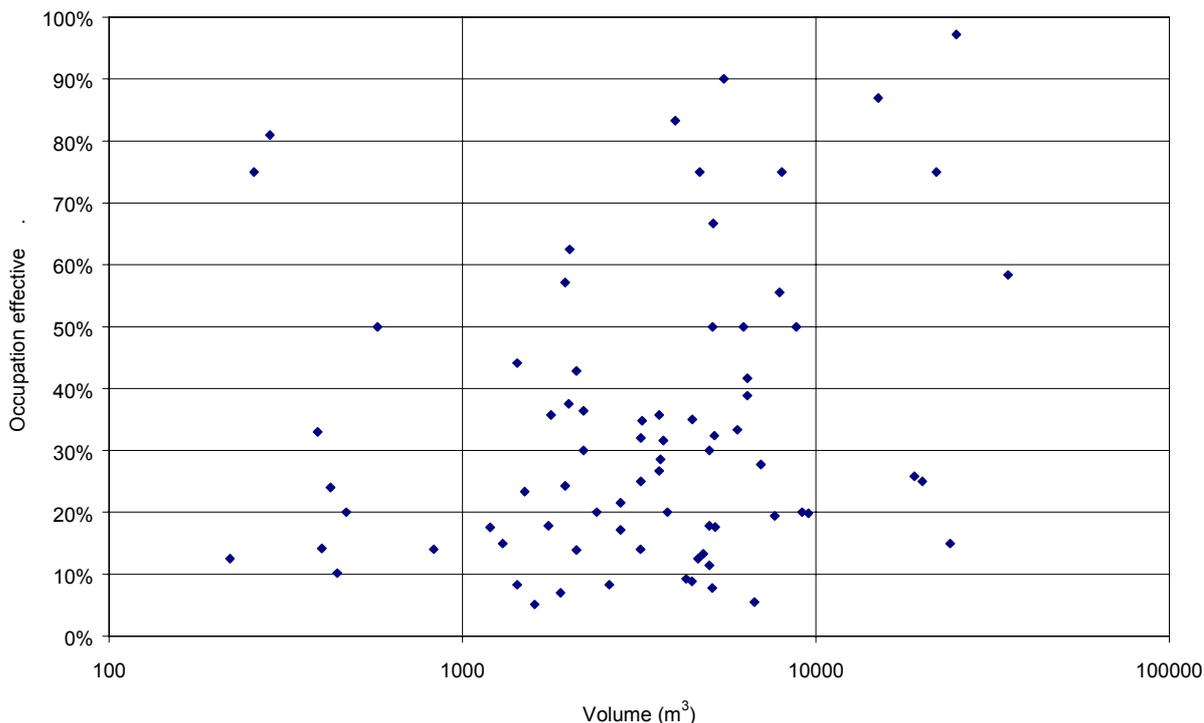


Figure 24 Répartition de l'occupation suivant le volume

De façon générale, le taux d'occupation n'est pas vraiment lié au volume de l'église ($R^2=0.04$, cf. Figure 24), ce qui ne signifie pas que la taille des églises correspond à l'ampleur de l'assemblée mais plutôt que le nombre de places disponibles est généralement trop important, et ce indépendamment du volume de l'église. Contrairement à toute attente, la faible relation entre ces deux paramètres tend plutôt vers un accroissement du taux d'occupation avec l'augmentation du volume. Il semble ainsi plus facile de remplir une grande qu'une petite église, ce qui peut peut-être s'expliquer par l'attrait du décorum ou de l'anonymat que l'on trouve généralement dans les grands édifices. Cette remarque plaide indirectement en faveur d'un regroupement, dans les grandes églises, de petites communautés dispersées.

5.4 Influence de l'occupation sur l'intelligibilité

5.4.1 Introduction

Pour des raisons de commodité, les mesurages d'intelligibilité de la parole au moyen de paramètres objectifs ont généralement lieu dans des locaux inoccupés. Dans les conditions normales d'utilisation, l'occupation peut cependant entraîner soit une augmentation, soit une diminution de l'intelligibilité.

Les publications touchant l'effet de l'occupation portent essentiellement sur l'absorption acoustique du public (en vue de calculer le temps de réverbération salle pleine [21-23]) ou sur l'atténuation au sein du public [24; 25] et en particulier le trou fréquentiel à 125-250 Hz [26-28]).

Cette étude vise à déterminer, sur la base de comparaisons entre des mesurages objectifs d'intelligibilité de la parole dans des églises inoccupées et occupées, l'effet de l'occupation sur la compréhension de la parole. L'analyse des divers effets induits par la présence de fidèles sur l'intelligibilité de la parole conduira à proposer plusieurs modèles pour déterminer les variations d'intelligibilité en fonction de l'occupation.

5.4.2 Les divers effets de l'occupation sur l'intelligibilité

L'intelligibilité de la parole est influencée par de nombreux paramètres plus ou moins bien pris en compte par les descripteurs physiques à disposition [29]. Les paramètres les plus importants sont le rapport signal/bruit (S/N ou S_{eff} , qui représente l'émergence de la parole sur le bruit de fond), le temps de réverbération (T_r) et la présence de réflexions tardives perturbatrices.

Certains effets liés à l'occupation peuvent augmenter l'intelligibilité, citons en particulier :

1. la diminution du temps de réverbération induite par le complément d'absorption apporté par le public ;
2. la diminution de la réverbération additionnelle induite par la sonorisation. Dans le cas d'un système de sonorisation adapté (haut-parleurs directifs et orientés sur l'assemblée), le public absorbe l'essentiel de l'énergie diffusée par les haut-parleurs alors que celle-ci est réfléchiée dans le volume lorsque la salle est vide ;
3. la diminution des phénomènes de focalisation. Par son absorption, le public peut supprimer un éventuel écho flottant entre le sol et le plafond (en particulier ci celui-ci est voûté) ;
4. en hiver, le chauffage de l'église durant les célébrations induit une variation de la température et de l'humidité qui entraîne une diminution du temps de réverbération (par augmentation aux basses et moyennes fréquences de l'absorption de l'air et de la vitesse du son) ainsi qu'une incurvation vers le bas des rayons sonores (gradient de température positif avec la hauteur).

D'autres effets peuvent au contraire diminuer l'intelligibilité, citons en particulier :

1. l'augmentation du bruit de fond liée à la présence de l'assemblée (bruit de chaises ou bancs, discussion, quinte de toux, etc.) ;
2. l'affaiblissement (par absorption acoustique ou effet d'écran) du niveau sonore avec la distance au sein du public.

5.4.3 Mesurages

5.4.3.1 Description

Afin de perturber le moins longtemps possible l'assemblée en récoltant un maximum d'information, nous avons utilisé²² un système de mesurages du type MLS (MLSSA) avec un traitement asynchrone des données (acquisition avec 2 enregistreurs DAT Casio DA-7). Les données présentées dans le cadre de cette étude concernent principalement l'intelligibilité de la parole exprimée par le STI (Speech Transmission Index [9]) ainsi que le temps de réverbération (Tr). Des enregistrements des célébrations (3 messes catholiques et 3 cultes protestants) nous ont permis d'analyser les niveaux sonores (en dB(A), dB(Lin) et par bandes d'octave de 125 Hz à 4 kHz) du bruit de fond et des diverses interventions parlées durant les offices. Les mesurages eurent lieu dans 6 églises inoccupées et occupées dont les caractéristiques sont donnés dans le Tableau 4.

Tableau 4 Caractéristiques des églises mesurées

Eglise	Localisation	Confession	Volume (m ³)	Occupation (pers.)
Sacré-Cœur (LC)	La Chaux-de-Fonds	Catholique	9137	183
Pasquart (P)	Bienne	Protestant	4472	114
Fille-Dieu (FD)	Romont	Catholique	5600	124
Cheseaux (C)	Cheseaux	Protestant	575	53
Romanel (R)	Romanel	Protestant	477	28
St. Jean (J)	Porto (Portugal)	Catholique	6048	200
		Moyenne	4385	117
		Ecart type	3365	68

5.4.3.2 Résultats

Le Tableau 5 et Tableau 6 présentent les résultats des mesurages d'intelligibilité et de temps de réverbération.

²² A l'exception de St-Jean à Porto où les mesurages ont été réalisés avec système B&K 3361 [30]

Tableau 5 Intelligibilité, exprimée par le STI mesuré dans les églises

Eglise	Condition	STI occup.	STI inocc.	Δ STI = STI _{occup} – STI _{inoccup}	Ecart type suivant les positions
Sacré-Cœur	Sans sono	0.278	0.242	0.036	0.035
	Avec ancienne sono	0.472	0.410	0.062	0.043
	Avec nouvelle sono	0.405	0.332	0.073	0.049
Pasquart	Sans sono	0.523	0.495	0.028	0.013
	Avec sono	0.576	0.558	0.018	0.029
Fille-Dieu	Sans sono	0.313	0.290	0.023	0.015
Cheseaux	Sans sono	0.515	0.449	0.066	0.019
Romanel	Sans sono	0.615	0.577	0.038	0.012
St. Jean	Sans sono	0.435	0.415	0.020	0.045
	Avec sono	0.555	0.508	0.048	0.029
Moyenne	Sans sono	0.447	0.411	0.035	0.014
	Avec sono	0.534	0.492	0.050	0.024

Tableau 6 Temps de réverbération mesuré dans les églises

Eglise	Condition	Fréquence (Hz)					
		125	250	500	1000	2000	4000
Sacré-Cœur	Occupée	-	3.9	4.7	4.1	3.5	2.8
	Inoccupée	3.3	5.9	6.8	6.5	5.9	4.2
Pasquart	Occupée	1.6	2.1	2.3	2.2	2.2	1.7
	Inoccupée	1.7	2.4	2.7	2.8	2.5	1.9
Fille-Dieu	Occupée	3.0	3.8	3.5	2.8	2.6	2.1
	Inoccupée	3.2	4.4	4.7	4.2	2.8	2.6
Cheseaux	Occupée	1.04	1.05	1.16	1.13	1.08	1.05
	Inoccupée	0.77	0.99	1.13	1.14	1.09	0.97
Romanel	Occupée	0.69	0.83	0.89	0.87	0.86	0.75
	Inoccupée	1.17	1.51	1.75	1.84	1.86	1.60
St. Jean	Occupée	2.9	2.4	2.4	2.2	1.9	1.7
	Inoccupée	3.1	3.3	3.3	3.2	2.7	2.4
Moyenne	Occupée	2.1	2.3	2.5	2.2	2.0	1.7
	Inoccupée	2.2	3.1	3.4	3.3	2.8	2.3

5.4.4 Analyse

5.4.4.1 Temps de réverbération

Les mesurages mettent en évidence un accroissement de l'intelligibilité de la parole avec l'occupation (cf. Tableau 5 et Figure 25) :

$$\Delta STI = STI_{occup} - STI_{inocc} = 0.035 \pm 0.014, \text{ sans sonorisation ;}$$

$$= 0.050 \pm 0.024, \text{ avec sonorisation.}$$

Nous constatons que l'amélioration est plus importante lorsque la sonorisation est utilisée.

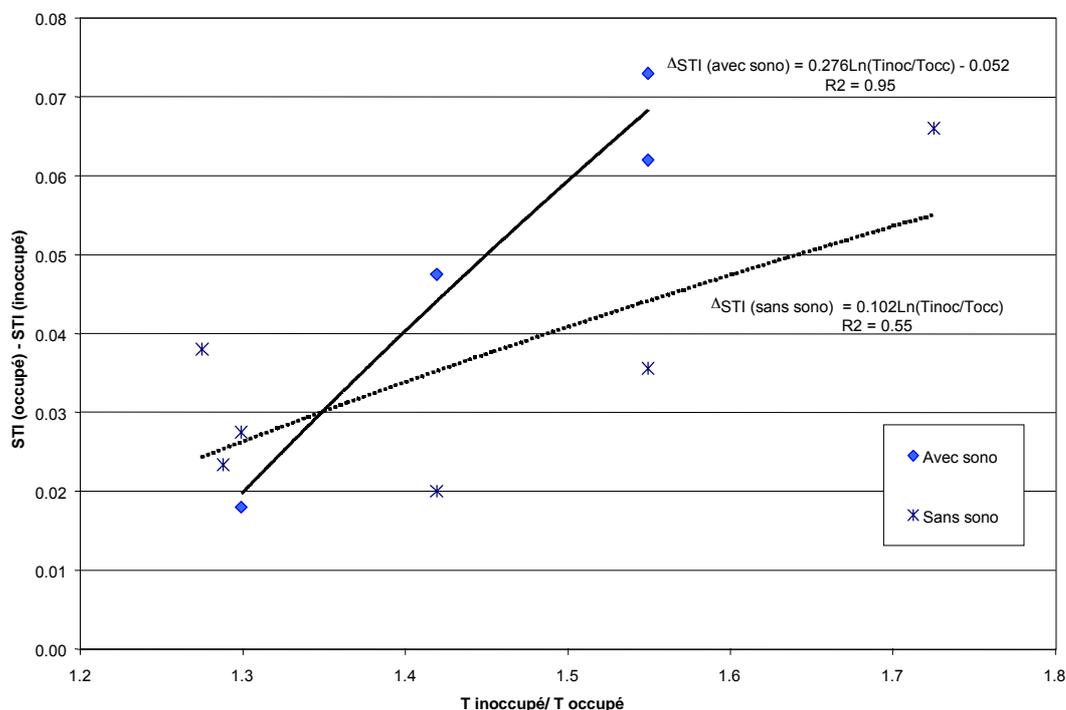


Figure 25 Amélioration de l'intelligibilité en fonction du rapport $T_{inoccupé}/T_{occupé}$

La variation de l'intelligibilité de la parole est bien corrélée à la diminution de temps de réverbération à 2 kHz (et en particulier avec $\ln(T_{inocc}/T_{occ})$), et ce surtout lorsque la sonorisation est utilisée (cf. Figure 25).

Sans utilisation de la sonorisation, l'amélioration de l'intelligibilité de la parole augmente plus faiblement avec la diminution du temps de réverbération.

Les mesurages de temps de réverbération dans 5 églises inoccupées puis occupées, montre une diminution du temps de réverbération avec l'occupation de 0.12 à 2.37 secondes (moyenne de 0.8 ± 0.6 s pour un intervalle de confiance de 95%). Cette diminution augmente avec la fréquence (cf. Tableau 6 et Figure 26).

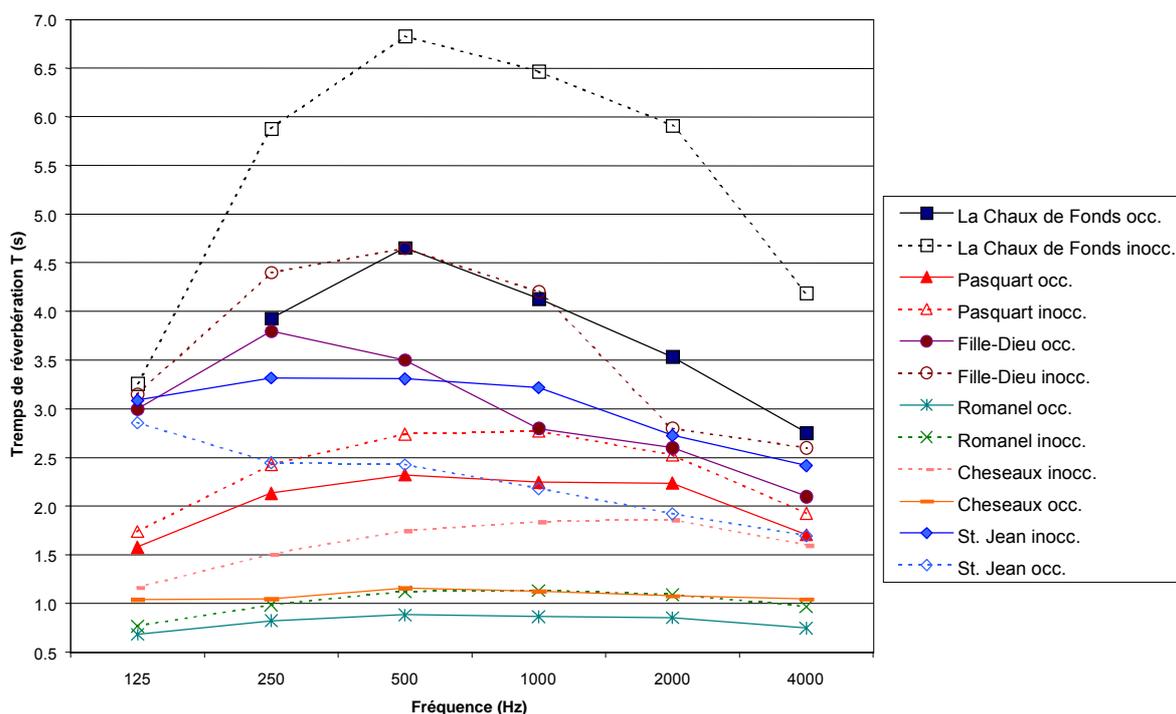


Figure 26 Variation en fréquence du temps de réverbération dans les églises inoccupées

L'occupation induit une baisse significative du temps de réverbération, en particulier en haute fréquence ($f > 1$ kHz), domaine du spectre qui est le plus important pour l'intelligibilité de la parole.

Cette baisse peut être expliquée par plusieurs éléments décrits ci-après.

5.4.4.1.1. Absorption complémentaire du public

La diminution du temps de réverbération vient essentiellement de l'absorption complémentaire apportée par le public. L'importance de cette réduction du temps de réverbération dans une église dépend de son volume, du temps de réverbération dans l'église vide ainsi que du nombre et de la position des personnes présentes.

On peut calculer l'absorption équivalente moyenne par personne (A_{pers}) simplement à partir de la formule de Sabine, soit:

$$A_{pers} = \frac{0.161 * V}{N} * \left(\frac{1}{T_{occ}} - \frac{1}{T_{inocc}} \right)$$

Avec N, le nombre de personnes; V le volume (m^3), T_{occ} et T_{inocc} , les temps de réverbération moyens (s) dans l'église occupée, respectivement inoccupée. Pour les églises mesurées, la valeur moyenne (moyenne sur 5 églises) et la valeur optimisée (optimisation par la méthode des moindres carrés, soit la minimisation du χ^2 calcul-mesure pour les 5 églises) de l'absorption équivalente par personne (A_{pers}) sont données dans le Tableau 7 et la Figure 27.

Les valeurs A_{pers} sont plus faibles dans l'église du Pasquart (cf. Figure 27) du fait de la présence de sièges rembourrés dans cette église (et donc plus absorbants que les

traditionnels bancs que l'on retrouve dans les autres églises). L'absorption équivalente par personne calculée dans ce cas correspond à la différence entre l'absorption par personne assise et l'absorption d'un siège rembourré. Cette église n'a donc pas été considérée pour le calcul de l'absorption équivalente moyenne et optimisée.

Tableau 7 Absorption équivalente par personne (A_{pers}) en fonction de la fréquence pour les églises de La Chaux-de-Fonds, Fille-Dieu, Romanel et Cheseaux.

Fréquence (Hz)	125	250	500	1k	2k	4k	moy. 500-1k
Valeur moyenne (m^2)	0.24	0.50	0.56	0.73	0.76	0.77	0.64
Ecart type (m^2)	0.18	0.22	0.06	0.17	0.34	0.25	0.09
Valeur optimisée A_{pers}' (m^2)	0.13	0.53	0.54	0.73	0.79	0.87	0.63

La valeur moyenne de l'absorption équivalente par personne calculée pour le temps de réverbération moyen (500-1000 Hz) et pour l'ensemble des églises est de $0.64 \pm 0.09 m^2$.

Lorsque les fidèles ne sont pas trop dispersés dans l'église (ce qui est le cas de toutes les églises mesurées sauf pour La Chaux-de-Fonds), l'absorption équivalente par personne aux hautes fréquences ($f > 2$ kHz) est environ de $0.7 m^2$. Aux mêmes fréquences, cette valeur augmente cependant à 0.9 lorsque l'assemblée est parsemée (cas de La Chaux-de-Fonds).

Nous constatons que l'écart type entre les valeurs calculées d'absorption équivalente par personne A_{pers} pour chaque église est assez élevé (de l'ordre de 0.2). Cela peut s'expliquer d'une part par la variation de la densité d'occupation d'une église à l'autre et d'autre part, par le type de vêtements portés durant les mesurages qui eurent lieu aussi bien en été qu'en hiver.

En considérant la valeur optimisée des coefficients d'absorption (méthode des moindres carrés), l'erreur moyenne entre les valeurs calculées et mesurées du temps de réverbération occupé est inférieure à 0.1 secondes (cf. Figure 28). La formule de Sabine semble donc suffisante pour calculer la diminution de temps de réverbération entraînée par l'absorption complémentaire du public.

Remarquons que les valeurs obtenues pour l'absorption équivalente par personne sont généralement supérieures à celles que l'on trouve dans la littérature pour le coefficient d'absorption d'une personne assise, du fait de la faible densité d'occupation dans les églises occupées par rapport à des mesurages en chambre réverbérante ou dans une salle de concert. Les effets de bords étant plus importants pour une assemblée dispersée, on s'attend logiquement à une augmentation du coefficient d'absorption par personne.

Une autre approche, proposée par plusieurs auteurs [31; 32] en particulier pour les salles de concerts, consiste à définir l'absorption non pas par personne (A_{pers} en m^2), mais par unité de surface de l'assemblée (coefficient d'absorption α_{pers}) en considérant même éventuellement comme paramètre supplémentaire le rapport du périmètre à la surface de l'assemblée [21; 22; 33]. Vu la difficulté de définir clairement ces grandeurs dans le cas d'assemblées d'église, souvent parsemées, cette approche ne semble pas forcément bien adaptée à ces situations mais reste plutôt réservée à des publics denses (ce qui est généralement le cas pour les salles de spectacle).

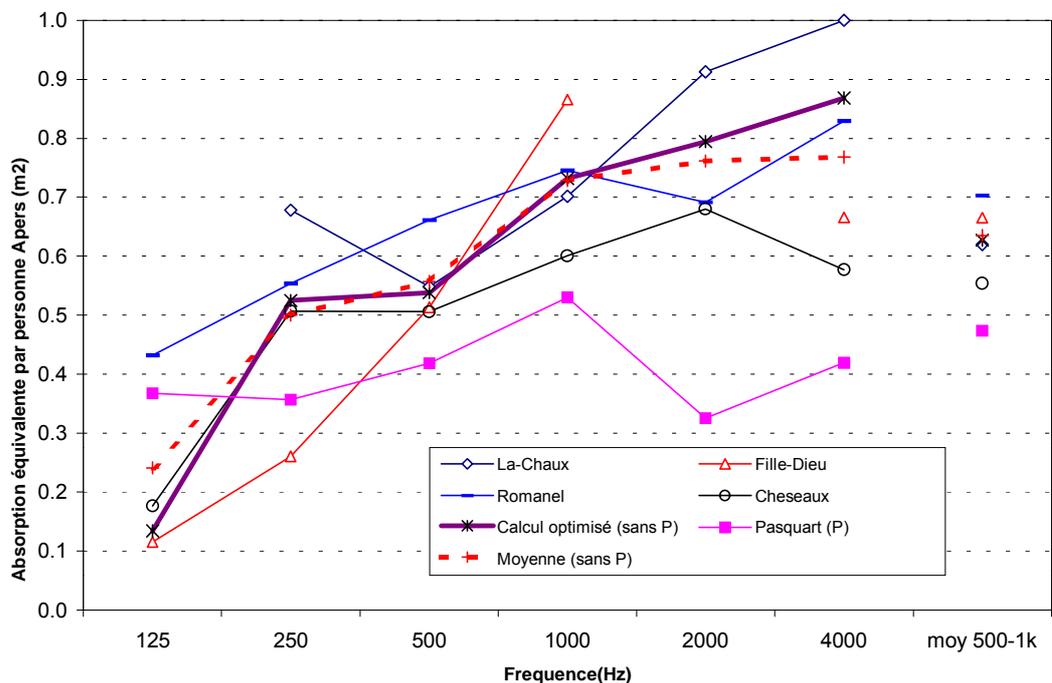


Figure 27 Absorption équivalente par personne (Apers) dans les diverses églises. Notons que l'église du Pasquart dispose de chaises absorbantes et que l'assemblée de La Chaux-de-Fonds est particulièrement parsemée.

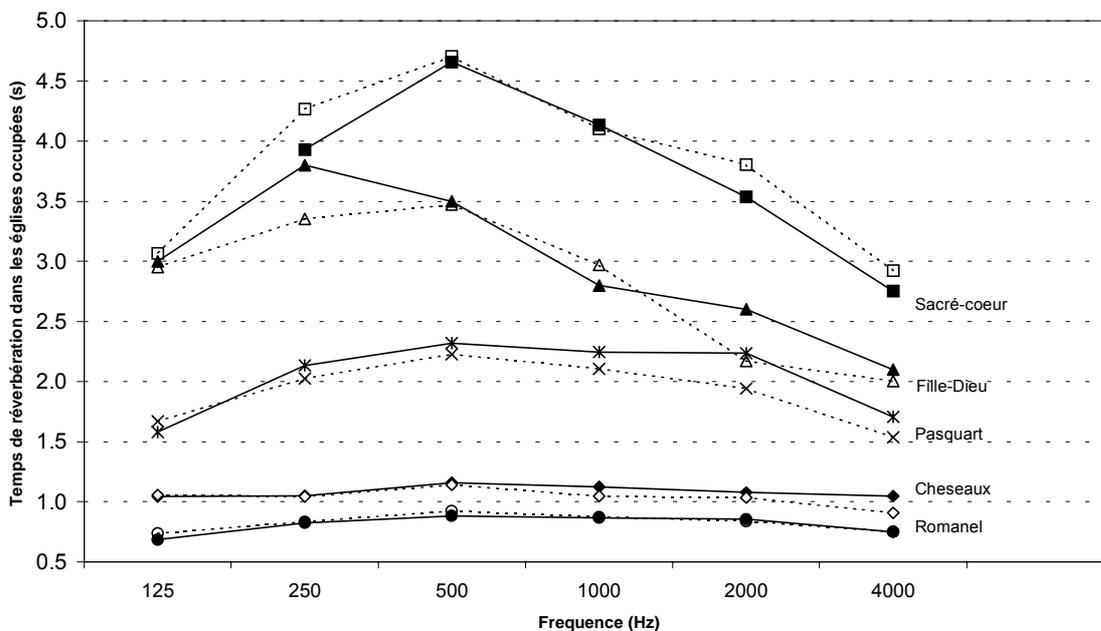


Figure 28 Temps de réverbération mesurés (traits pleins) et calculés avec Apers optimisé (traits tillés) dans les diverses églises occupées

Beranek a récemment proposé [34] une méthode de calcul pour les salles de concert dans lesquelles les caractéristiques d'absorption des sièges ne sont pas connues :

$$T_{occ} = c - d \cdot \exp(-T_{inocc})$$

Malgré l'optimisation par la méthode des moindres carrés des paramètres c et d pour chaque bande de fréquence sur la base de nos résultats de mesurages, cette méthode ne permet pas de calculer de façon satisfaisante le temps de réverbération dans les églises faiblement occupées. En effet, l'écart entre les résultats avec cette méthode de calcul et les mesurages est de ± 0.9 s (en particulier dans les bandes d'octave centrées à 500 et 1000 Hz).

5.4.4.1.2. Effet du chauffage

En été, la température et l'humidité ne changent pratiquement pas avec l'occupation (environ 20 à 23 °C et 60 à 70% HR en Suisse). En revanche en hiver, le fait de chauffer l'église avant et pendant les cérémonies modifie les conditions hygrothermiques. Dans une église non chauffée la température est de l'ordre de 8 à 10 °C avec un taux d'humidité de l'ordre de 60 à 70%, alors que dans une église chauffée (pour les périodes d'occupation), la température monte à 18-20°C et l'humidité descend à 40-50% [35]. Notons que la variation de l'humidité relative est principalement due à l'augmentation de température. A température constante, l'humidification de l'air par la présence d'une assemblée reste faible (l'augmentation de l'humidité relative, due à l'assistance, est inférieure à 10%).

En hiver, le chauffage de l'église durant les célébrations induit plusieurs effets favorables pour l'intelligibilité :

1. *une augmentation de l'absorption de l'air entre 125 et 2000 Hz*, qui entraîne une faible diminution du temps de réverbération à ces fréquences. Aux très hautes fréquences ($f \geq 4$ kHz), on observe le phénomène inverse (cf. Tableau 8).

L'absorption de l'air est donnée par la formule suivante [36]: $A_{air} = 4m \cdot V$ où V est le volume ($\times 1000$ m³) et $4m$ le coefficient d'absorption de l'air.

En considérant les conditions hygrothermiques hivernales susmentionnées, on obtient [36] pour l'absorption de l'air les valeurs présentées dans le Tableau 8. On constate une augmentation de l'absorption de l'air aux basses et moyennes fréquences (les valeurs d'absorption restent cependant faibles) mais une diminution de l'absorption aux hautes fréquences ($f > 2$ kHz). En considérant une église de 6000 m³ avec un temps de réverbération à vide de 4 s, la diminution du temps de réverbération moyen du à la modification du coefficient d'absorption de l'air est de l'ordre de 0.1 s.

Tableau 8 Absorption de l'air ($4m$) en fonction des conditions hygrothermiques hivernales

Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	8000
Non chauffé (10 °C, 60%)	0.4	0.9	1.7	3.1	6.9	23.1	82.3
Chauffé (20 °C, 40%)	0.5	1.3	2.4	3.9	7.4	22.0	77.5

2. le chauffage de l'église durant les célébrations induit également une *augmentation de la vitesse du son* qui entraîne une diminution du temps de réverbération.

Le temps de réverbération est donné par la formule suivante [36] :

$$T(t) = \frac{55.3 * V}{c(t) * A}$$

où $c(t)$ est la vitesse de propagation du son dans l'air à la température t (en °C) donnée par :

$$c(t) = 20.05 * \sqrt{273.2 + t} \approx 331.4 + 0.607 * t$$

Le rapport des temps de réverbération d'un local à des températures différentes est donc égal à l'inverse du rapport des vitesses de propagation du son dans l'air à ces températures, soit

$$\frac{T(t_1)}{T(t_2)} = \frac{c(t_2)}{c(t_1)}$$

En considérant des températures de $t_1=20$ °C et $t_2=10$ °C, on a

$$T(20^\circ\text{C}) = (c(10^\circ\text{C})/c(20^\circ\text{C})) * T(10^\circ\text{C}) = (337/343) * T(10^\circ\text{C}) = 0.98 * T(10^\circ\text{C})$$

soit une baisse d'environ 2% du temps de réverbération par l'effet de l'augmentation de température pendant les célébrations ou concerts durant la période hivernale.

En considérant une église avec un temps de réverbération de 4 s, la diminution du temps de réverbération due à la modification de la vitesse de propagation du son dans l'air induit par le chauffage est de l'ordre de 0.1 s (cf. Tableau 9).

Pour une église de 6000 m³ avec un temps de réverbération à vide de 4 s, les deux effets induits par le chauffage (soit l'augmentation du coefficient d'absorption de l'air et de la vitesse du son) entraînent une diminution du temps de réverbération aux moyennes fréquences de l'ordre de 0.1 à 0.2 s (cf. Tableau 9).

Tableau 9 Effets du chauffage sur le temps de réverbération (augmentation du coefficient d'absorption de l'air et de la vitesse du son)

Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000
TR vide moyen (s)	2.7	4.2	4.7	4.5	3.7	2.9
dTr Air (s)	0.00	-0.04	-0.09	-0.10	-0.04	0.06
dTr c (s)	-0.05	-0.07	-0.08	-0.08	-0.06	-0.05
dTr chauff (s)	-0.05	-0.12	-0.17	-0.17	-0.11	0.01

3. le chauffage de l'église durant les célébrations induit enfin parfois une *incurvation vers le bas des rayons sonores* à cause d'un gradient de température positif avec la hauteur. Lorsque l'église est vide (pas ou peu chauffée), on ne bénéficie pas de ce gradient de température positif avec la température. Ce gradient est également négligeable (<1°C) en présence d'un chauffage sous les bancs ou au sol (avec ou sans convecteur). Les chauffages à air chaud peuvent cependant

engendrer des gradients de température plus importants (la température au plafond peut être supérieure d'environ 5 °C à celle au sol). Dans ce cas, l'incurvation des rayons sonore vers le bas permet une meilleure répartition de son au sein de l'assemblée.

5.4.4.2 Niveau sonore

5.4.4.2.1. Bruit de fond

Nous avons précédemment analysé (cf. §3.2.5.2) le niveau de bruit de fond dans les églises vides en fonction de la situation (urbaine ou rurale). Nous rappelons ici pour mémoire les principaux résultats (cf. Tableau 10).

Tableau 10 Bruit de fond ($L_{Aeq(20\text{ s})}$ en dB(A) et $L_{eq(20\text{ s})}$ en dB).

Milieu	Moyenne		Ecart type	
	$L_{Aeq(20\text{ s})}$	$L_{eq(20\text{ s})}$	$L_{Aeq(20\text{ s})}$	$L_{eq(20\text{ s})}$
Urbain	36.1	55.3	7.2	6.0
Rural	23.3	45.4	3.6	4.8

Les niveaux sonores ($L_{Aeq(20\text{ s})}$) et les émergences S/N furent également mesurés pendant et après des services religieux (cf. Tableau 11).

Nous constatons que le bruit de fond augmente de 10 +/- 4 dB avec l'occupation. Lorsque les églises sont inoccupées, le rapport S/N est toujours important (25 à 35 dB). Lorsque les églises sont occupées, le rapport signal/bruit reste en général suffisant (>15 dB) pour ne pas perturber l'intelligibilité de la parole. Malgré l'utilisation systématique d'un système de sonorisation dans les grandes églises ou celles avec un bruit de fond élevé, le rapport S/N peut être légèrement insuffisant dans certains cas (14 dB à La Chaux-de-Fonds). Cela peut être du soit au niveau émis trop faible (mauvais réglage ou absence de sonorisation), soit au bruit de fond élevé du public (en certaines positions, les mesures n'ont pu être réalisées ou les résultats ont été fortement influencés par les quintes de toux des paroissiens).

En hiver, les églises nécessitent souvent l'utilisation du chauffage avant et pendant les services religieux. Selon la conception de ceux-ci, ils peuvent engendrer un bruit non négligeable. Ainsi à la cathédrale de Lausanne, le bruit de fond dans l'assemblée passe de 31 dB(A) en l'absence de chauffage, à 44, 48 voire 53 dB(A) suivant le régime de chauffage enclenché [37].

Tableau 11 Niveaux sonores ($L_{Aeq(20s)}$) mesurés pendant et après des services religieux

Eglise (confession, milieu)	La Chaux-de-Fonds (catholique, urbain)	Pasquart (protestant, urbain)	Cheseaux (protestant, rural)	Romanel (protestant, rural)
Distance à la source (m)	30	10 (latéral)	8.5	6
Parole d'homme amplifiée	55-59	60-67	-	
Parole de femme amplifiée	53-57	57-66	-	
Parole d'homme non amplifiée	-	43-50	56-63	54-60
Parole de femme non amplifiée	-	42-48	-	52-55
Bruit de fond (durant parole)	40-45	35-43	32-39	30-38
Bruit de fond (inoccupé)	32	29	25	21-25
S/N occupé (homme)	14	25	25	23
S/N inoccupé (homme)	25	35	35	34

5.4.4.2.2. Atténuation au sein du public

Aucune corrélation significative entre l'amélioration de l'intelligibilité et la distance à la source n'a pu être mise en évidence sur l'ensemble des églises. Cependant dans chaque église on constate, au sein du public, une évolution spécifique du niveau sonore en fonction de la distance à la source. L'atténuation du niveau avec la distance, avec et sans l'utilisation d'une sonorisation, est présentée pour une église en Figure 29.

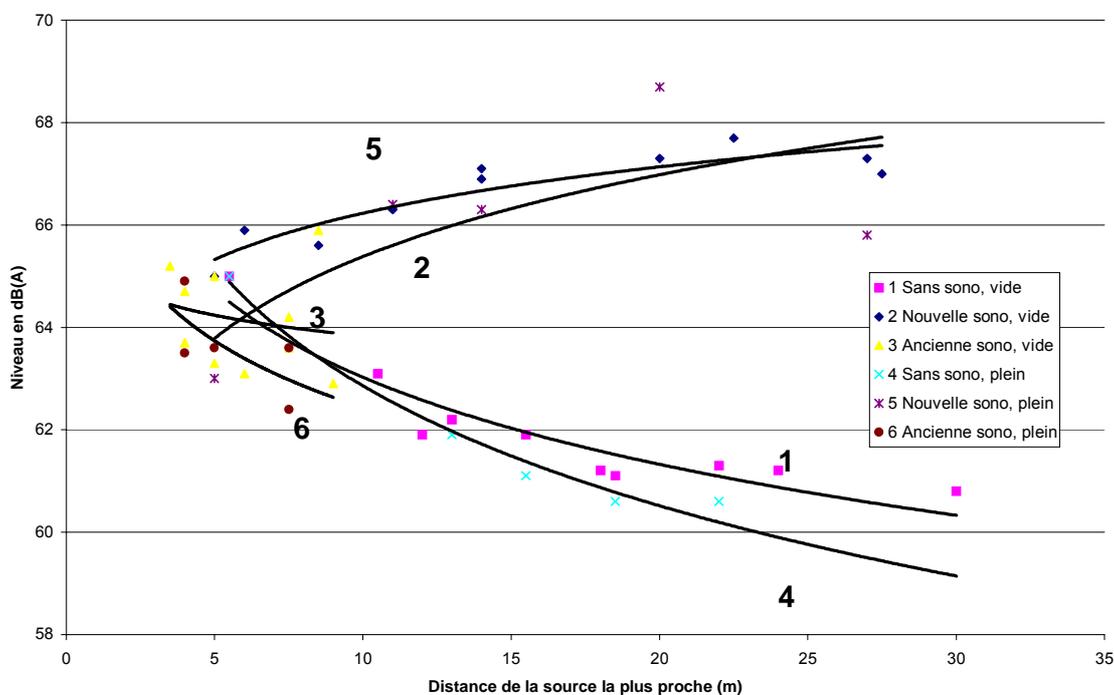


Figure 29 Église de La Chaux-de-Fonds, décroissance des niveaux avec la distance à la source principale

La variation de réverbération due à l'occupation (et éventuellement au chauffage) entraîne une atténuation absolue du niveau en champ réverbéré qui s'exprime :

$$\Delta L \approx 10 \cdot \log(T_{occ} / T_{inoc})$$

Selon nos résultats de mesurages de temps de réverbération, l'atténuation du niveau avec la distance due à l'absorption complémentaire du public devrait être, d'après la formule ci-dessus, de 1.1 à 1.9 dB. Nos mesurages de niveaux sonores (cf. Figure 29 comme exemple) mettent en évidence une baisse de niveau pour des distances à la source importantes ($d > 10$ m) de 0.5 à 2.6 dB(A). Notons que l'affaiblissement mesuré concerne le niveau global (direct + réverbéré). A des distances nettement supérieures au rayon de Hall, la décroissance devient faible car la réverbération devient dominante. Lottermoser [38] constatait ainsi, en 1952 déjà, que la diminution du niveau en présence de public n'était d'environ que 3 dB à 25 m d'un orgue, pourtant surélevé par rapport à l'assemblée. Plus récemment, Beranek a montré [34] qu'entre une salle de concert vide et pleine, la force (Strength G) décroissait d'environ 2 dB aux moyennes fréquences.

La décroissance avec la distance du niveau précoce (son direct et premières réflexions), déterminant pour l'intelligibilité, est cependant nettement plus importante. En champ libre, l'atténuation du son direct au sein de public atteint 30 dB/100 m à 500 Hz (37 dB/100 m à 2 kHz [39]).

5.4.5 Modèles de calcul

Divers modèles (théoriques ou empiriques) peuvent être proposés pour déterminer, la variation d'intelligibilité, évaluée objectivement par le STI, avec l'occupation de l'église en se basant sur les principaux effets décrits précédemment. Pour ces calculs, la bande d'octave de 2 kHz a été choisie comme fréquence représentative du temps de réverbération, non seulement parce qu'elle est importante du point de vue de l'intelligibilité mais également du fait qu'elle engendre, parmi les diverses bandes fréquentielles testées (octave unique, combinaisons de plusieurs bandes d'octave) les meilleures corrélations avec les modèles proposés.

5.4.5.1 Modèle théorique

La transmission d'un message d'un orateur à un auditeur est affectée principalement par la réverbération et le bruit de fond. Ces deux effets sont bien quantifiés par l'utilisation du descripteur d'intelligibilité STI qui se base sur la fonction de transfert de la modulation (Modulation Transfer Function ou MTF).

Par définition, on a [29; 40]:

$$STI = \frac{S_{eff} + 15}{30} = \frac{10 \cdot \lg\left(\frac{m}{1-m}\right) + 15}{30}$$

Avec

S_{eff} la valeur moyenne de l'émergence équivalente du signal sur le bruit (S/N).

m la fonction de transfert de la modulation (MTF), qui dépend de la fréquence de modulation (f) et qui s'écrit :

$$m(f) = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(2\pi f \frac{T}{13.8}\right)^2}} * \frac{1}{(1 + 10^{-S/10})} \quad (1) \text{ où}$$

S est le rapport du signal sur le bruit (S/N en dB)

et T le temps de réverbération (en s)

Dans l'équation (1), le premier terme correspond à la contribution de la réverbération et le deuxième terme à celui du bruit de fond.

La variation d'intelligibilité (ΔSTI) entre une église occupée et inoccupée peut donc s'exprimer en fonction du MTF suivant :

$$\Delta STI = STI(m') - STI(m'') = \frac{1}{3} * \lg\left(\left(\frac{m'}{1-m'}\right) * \left(\frac{1-m''}{m''}\right)\right) \quad (2)$$

où m' et m'' sont les valeurs de la fonction de transfert de la modulation dans l'état occupé, respectivement inoccupé.

5.4.5.1.1. Effet de la diminution de réverbération

Si l'on néglige l'effet du bruit de fond ($S/N > 15$ dB), le second terme de l'équation (1) disparaît (≈ 1) et la fonction de transfert de la modulation devient :

$$m = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi f T}{13.8}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + gT^2}}$$

avec $g = \left(\frac{2\pi f}{13.8}\right)^2$

f, la fréquence de modulation et T le temps de réverbération.

Notons que si l'on considère la fréquence de modulation moyenne de 2.8 Hz, on a $g = 1.6252$

En considérant uniquement l'effet de la réverbération, on peut écrire l'expression suivante :

$$\frac{m}{1-m} = \frac{1}{\sqrt{1 + gT^2} - 1}$$

d'où on tire avec l'équation (2) l'effet du temps de réverbération sur la variation d'intelligibilité

$$\Delta STI = \frac{1}{3} * \lg\left(\frac{\sqrt{1 + gT_{inocc}^2} - 1}{\sqrt{1 + gT_{occ}^2} - 1}\right) \quad (3)$$

Dans les situations où la sonorisation est utilisée, le modèle théorique permet une très bonne évaluation de la variation d'intelligibilité ($R^2 = 0.95$ lorsqu'on considère la

valeur du temps de réverbération à 2 kHz, cf. Figure 30). Dans ces cas, l'effet du bruit de fond est négligeable ($S/N > 15$ dB) et seul l'effet de la réverbération est déterminant.

En l'absence de sonorisation, le modèle donne une estimation moins précise de la variation d'intelligibilité ($R^2 = 0.77$ lorsqu'on considère la valeur du temps de réverbération à 2 kHz, cf. Figure 30). Le modèle basé uniquement sur la réverbération surestime systématiquement l'amélioration de l'intelligibilité (le STI calculé est trop élevé d'environ 0.034 ± 0.008). Cette surestimation du modèle peut être corrigée par l'utilisation d'une constante. La variation d'intelligibilité selon le modèle théorique corrigé (sans sonorisation) s'exprime donc:

$$\Delta STI = \frac{1}{3} * \lg \left(\frac{\sqrt{1 + 1.6252T_{inocc}^2} - 1}{\sqrt{1 + 1.6252T_{occ}^2} - 1} \right) - 0.034 \quad (3A)$$

5.4.5.1.2. Effet du rapport signal/bruit

Nous avons vu précédemment que la présence du public augmentait le bruit de fond et diminuait le niveau du signal (parole) avec la distance par effet d'atténuation. Ces variations du rapport signal/bruit entraînent potentiellement une réduction de l'intelligibilité qui peut également être modélisée théoriquement à partir de la définition du STI.

Si la réverbération reste constante, le premier terme de l'équation (1) reste constant et sera appelé K ($K \approx 0.2$ pour un temps de réverbération de 4 s). La fonction de transfert de la modulation devient :

$$m = \frac{K}{1 + 10^{-S/10}}$$

avec S, le rapport signal/bruit (limité de -15 à 15 dB), soit :

$$\frac{m}{1 - m} = \frac{K}{1 - K + 10^{-S/10}} \approx \frac{0.2}{0.8 + 10^{-S/10}}$$

d'où on tire avec l'équation (2) l'effet du rapport S/N sur la variation d'intelligibilité

$$\begin{aligned} \Delta STI &= \frac{1}{3} * \lg \left(\frac{1 - K + 10^{-Sinoccup/10}}{1 - K + 10^{-Soccup/10}} \right) \quad (4) \\ &\approx \frac{1}{3} * \lg \left(\frac{0.8 + 10^{-Sinoccup/10}}{0.8 + 10^{-Soccup/10}} \right) \quad \text{pour } Tr=4 \text{ s} \end{aligned}$$

Selon nos résultats expérimentaux (cf. Tableau 11 p. 235), le rapport signal/bruit est généralement supérieur à 15 dB dans les églises occupées ou inoccupées. La variation du rapport signal/bruit induit par l'occupation n'influence donc pas l'intelligibilité dans ces cas. Dans le cas de La Chaux-de-Fonds cependant, le bruit de fond augmente suffisamment avec le public pour abaisser le S/N à 14 dB. Dans ce cas, la contribution du bruit de fond sur la variation d'intelligibilité est, d'après

l'équation (4) de $\Delta STI = -0.001$. Notons que cette valeur, qui est négligeable, est fortement influencée par la réverbération considérée, qui est assez élevée ($T=4$ s) et qui reste déterminante par rapport à l'évaluation de l'intelligibilité. Dans le cas des églises, une faible diminution du rapport S/N n'a donc que peu d'importance si la réverbération est élevée.

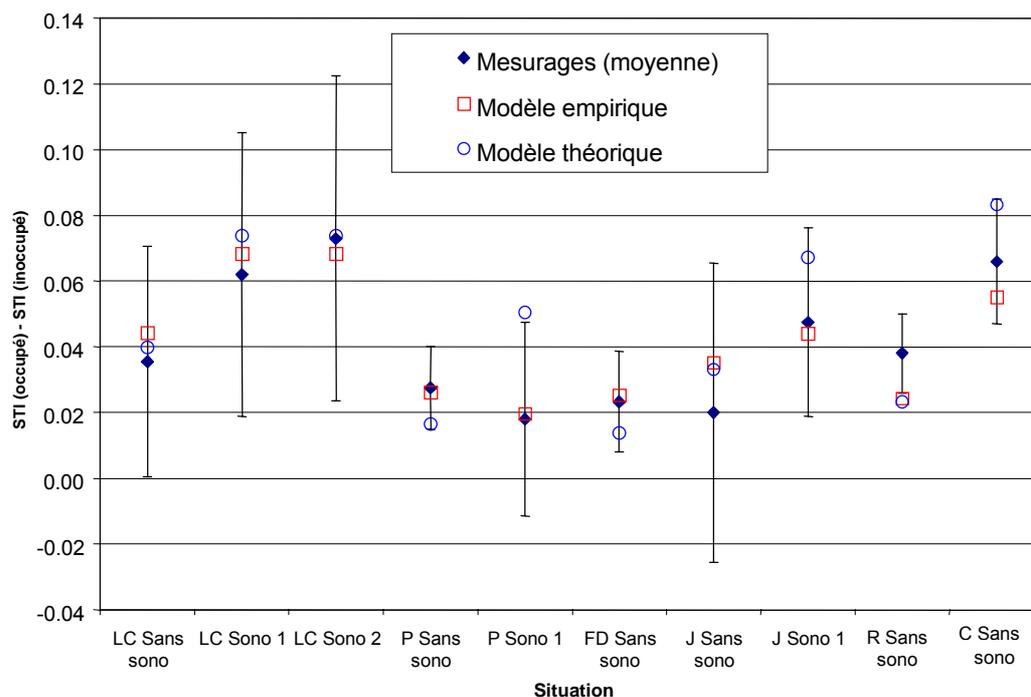


Figure 30 Comparaison entre les valeurs ΔSTI mesurées et calculées théoriquement (selon formule 3A) et empiriquement à partir du temps de réverbération à 2 kHz. [LA - La Chaux, P - Pasquart, FD - Fille-Dieu, J - St. Jean, R – Romanel, C - Cheseaux].

5.4.5.2 Modèle empirique

A partir des résultats de mesurages présentés dans cette étude, on peut effectuer une approche empirique pour modéliser plus simplement l'effet de l'occupation sur l'intelligibilité que le modèle théorique susmentionné. Les résultats de mesurages montrent que le principal facteur influençant l'intelligibilité est la variation de temps de réverbération (le facteur distance est peu significatif). Les paramètres climatiques (t , HR) n'ayant pas été mesurés in situ, la formulation logarithmique est simplement du type :

$$\Delta STI = a \cdot \ln(T_{inocc}/T_{occ}) + y$$

où le paramètre « a » prend en compte la contribution de la variation de réverbération et le paramètre « y » regroupe les autres contributions.

L'optimisation des paramètres pour les églises étudiées (de moyennes tailles) donne les formules suivantes pour la variation moyenne du STI dans une église:

$$\begin{aligned} \Delta STI &= 0.276 \cdot \ln(T_{inoccup}(2\text{kHz})/T_{occ}(2\text{kHz})) - 0.052 && \text{avec sonorisation } (R^2 = 0.96), \\ \Delta STI &= 0.102 \cdot \ln(T_{inoccup}(2\text{kHz})/T_{occ}(2\text{kHz})) && \text{sans sonorisation } (R^2 = 0.55). \end{aligned}$$

Les résultats du modèle empirique sont présentés en Figure 30. Les formulations empiriques n'ont cependant pas été testées dans de très grandes églises. Elles peuvent être inadéquates en dehors de leur domaine de validité (qui correspond à $V < 10\,000\text{ m}^3$ et $Tr < 5\text{ s}$).

Lorsque l'église est occupée, la réduction du temps de réverbération artificiel induit par la sonorisation, dans le cas de haut-parleurs directifs et orientés sur l'assemblée, peut expliquer la pente importante du modèle empirique avec la sonorisation. La détermination empirique de la valeur du paramètre «a» avec sonorisation donne une valeur plus élevée que celle donnée pour une condition théorique sans bruit de fond (0.189). Si l'on considère l'EDT au lieu du temps de réverbération, la valeur théorique [40] de «a» est de 0.2164 soit un accroissement du STI de 0.15 par diminution de moitié de la réverbération. Cette dernière valeur a été mise en évidence dans une étude, menée dans des salles de classe [41]. Dans le cas des salles de classe (faible volume spécifique et temps de réverbération assez élevé), l'occupation peut modifier considérablement l'intelligibilité (STI) qui est de 0.47 à 0.76 dans les classes vides, 0.61 à 0.77 dans les classes à moitié pleines, 0.65 à 0.82 dans les classes pleines.

5.4.6 Synthèse sur l'effet de l'occupation

Les mesures dans 6 églises vides puis occupées mettent en évidence un accroissement de l'intelligibilité avec l'occupation de $\Delta STI = STI_{occup} - STI_{inoccup} = 0.050 \pm 0.024$, avec sonorisation, respectivement 0.035 ± 0.014 sans sonorisation. L'amélioration observée de l'intelligibilité avec l'occupation est principalement due à la diminution du temps de réverbération de l'église (absorption complémentaire apportée par l'assemblée), ainsi que celle induite par la sonorisation (dans le cas de haut-parleurs directifs et orientés sur l'assemblée). La diminution du rapport signal/bruit (par augmentation du bruit de fond et décroissance du niveau sonore avec la distance dans l'assemblée) ou l'utilisation de sonorisation inadéquate (mauvaise directivité ou orientation des haut-parleurs) peuvent, dans certains cas particuliers, diminuer le gain d'intelligibilité dû à l'occupation. Les changements hygrothermiques dus à l'occupation (chauffage) peuvent entraîner une légère diminution du temps de réverbération (inférieure à 0.2 s) mais ils n'influencent que peu l'intelligibilité.

La variation d'intelligibilité avec l'occupation peut être déterminée de façon satisfaisante (erreur moyenne $\Delta STI < 0.007$) dans les églises de moyenne taille par des modèles théoriques et empiriques basés sur le temps de réverbération dans les églises inoccupées et occupées :

$$\begin{aligned} \Delta STI &= 0.276 \cdot \ln(T_{inoccup}(2\text{kHz})/T_{occ}(2\text{kHz})) - 0.052 && \text{avec sonorisation } (R^2 = 0.96), \\ \Delta STI &= 0.102 \cdot \ln(T_{inoccup}(2\text{kHz})/T_{occ}(2\text{kHz})) && \text{sans sonorisation } (R^2 = 0.55). \end{aligned}$$

La diminution du temps de réverbération liée à l'occupation dépend principalement du volume et du temps de réverbération de l'église inoccupée ainsi que du nombre et de la dispersion des personnes dans l'église.

L'absorption sonore moyenne par personne (A_{pers}) calculée pour le temps de réverbération moyen (500 et 1000 Hz) pour les diverses églises est de $0.64 \pm 0.09 \text{ m}^2$. La minimalisation des écarts entre mesurages et calculs permet une prévision satisfaisante du T_r dans tous les cas (erreur de $< 0.1\text{s}$).

5.5 Bibliographie chapitre 5

- [1] **Schueller, H.** (1988). *The Idea of Music: An Introduction to Musical Aesthetics in Antiquity and the Middle Ages*. Western Michigan University.
- [2] **Münger, F.** (1973). *Schweizer Orgeln von der Gotik bis zur Gegenwart*. Krompholz, Berne.
- [3] **Speich, K. et Schläpfer, H.** (1979). *Eglises et monastères suisses*. Ex Libris, Zurich.
- [4] **Sonnaillon, B.** (1984). *L'orgue - Instrument et musiciens*. Office du livre. Ed. Vilo, Paris.
- [5] **Maugars, A.** (1993 (réédition)). *Réponse faite à un curieux sur le sentiment de la musique d'Italie*. Minkoff, Genève.
- [6] **Horat, H.** (1988). *L'architecture religieuse*. Ars Helvetica, Disentis.
- [7] **Cavaillé-Coll, C. et Cavaillé-Coll, E.** *Aristide Cavaillé-Coll*. Fischbacher, Paris.
- [8] **Audsley, G. A.** (1905). *The art of organ-building*. Dover Publications, New York.
- [9] **Baculard, P., Guérard, J. et Poulin, L.** (1969). *Acoustique, orgue et cathédrale. Un entretien avec André Charlin*. Bulletin de l'Association des Amis de Léonce de Saint-Martin, Vol. 11.
- [10] **Bieler, A.** (1961). *Liturgie et architecture. Le temple des chrétiens*. Labor et Fides, Genève.
- [11] **Debuyst, F.** (1997). *Le génie chrétien du lieu*. Cerf, Paris.
- [12] **Bouyer, L.** (1967). *Liturgie et architecture*. Cerf, Paris.
- [13] **Grandjean, M.** (1988). *Les temples vaudois. L'architecture réformée dans le Pays de Vaud (1536-1798)*. Bibliothèque historique vaudoise, Lausanne.
- [14] **Reymond, B.** (1993). *Chaises ou bancs d'église. Une innovation de la Réforme*. Le Protestant, Vol. 1993(1).
- [15] **Reymond, B.** (1996). *L'architecture religieuse des protestants*. Labor et Fides, Genève.
- [16] **Reymond, B.** (1997). *Temples de Suisse romande*. Cabédita, Yens s/Morges.
- [17] **Viollier, L.** (1891). *Saint-Pierre ancienne cathédrale de Genève*. Association pour la restauration de Saint-Pierre, Genève.
- [18] **Debuyst, F.** (1988). *L'art chrétien contemporain de 1962 à nos jours*. Mame, Paris.
- [19] **Ratzinger, J.** (2001). *L'esprit de la liturgie*. Ad Solem.
- [20] **Cassina, G.** (1996). *L'église de Vétroz*. Paroisse de Vétroz.
- [21] **Bradley, J. S.** (1996). *The sound absorption of occupied auditorium seating*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 99(2), pp. 990-995.
- [22] **Bradley, J. S.** (1992). *Measuring and predicting the effect of an audience*. 124th ASA meeting, New Orleans.
- [23] **Arau, H.** (1997). *Variation of the reverberation time of places of public assembly with audience size*. Building Acoustics, Vol. 4(2), pp. 87-97.

- [24] **Schultz, T. J. et Watters, B. G.** (1964). *Propagation of sound across audience seating*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 35(5), pp. 885-896.
- [25] **Mommertz, E.** (1993). *Einige Messungen zur streifenden Schallausbreitung über Publikum und Gestühl*. Acustica, Vol. 79, pp. 42-52.
- [26] **Davies, W. J. et Lam, Y. W.** (1994). *New attributes of seat dip attenuation*. Applied Acoustics, Vol. 41, pp. 1-23.
- [27] **LoVetri, J., Marare, D. et Soulodre, G.** (1996). *Modelling of the seat dip effect using the finite-difference time domain method*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 100(4), pp. 2204-2212.
- [28] **Bradley, J. S.** (1991). *Some further investigations of the seat dip effect*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 90(1), pp. 324-333.
- [29] **CEI 60268-16** (1998). *Evaluation objective de l'intelligibilité de la parole au moyen de l'indice de transmission de la parole*. Commission Electrotechnique Internationale.
- [30] **Carvalho, A. P. O.** (2000). *The significance of the Church Occupancy in the RASTI values in a Catholic Church*. Congrès Français d'Acoustique CFA2000, Lausanne, pp. 477-480.
- [31] **Beranek, L.** (1996). *Concert and Opera Halls. How they sound*. Acoustical Society of America, Woodbury.
- [32] **Barron, M.** (1993). *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. E. F. Spon, London.
- [33] **Bradley, J. S.** (1992). *Predicting the absorption of pew cushions*. 124th ASA meeting, New Orleans.
- [34] **Beranek, L.** (2001). *Relation of acoustical parameters with and without audience in concert halls and a simple method for simulating occupied state*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 109(3), pp. 1028-1042.
- [35] **Hungerbühler, E.** (1994). *Dimensionierung, Sanierung und Betrieb von Elektroheizungen in Kirchen*. I. Ravel, Bern.
- [36] **PrEN 12354-6 (4rd draft)** (2000). *Estimation of acoustic performance of buildings from the performance of elements. Part 6 : Sound absorption in enclosed spaces*, Brussels.
- [37] **Desarnaulds, V.** (1995). *Mesurages des bruits de ventilation dans la cathédrale de Lausanne pour différents régimes de fonctionnement*. Bureau ing. G. Monay, Lausanne. Rapport No 1704.
- [38] **Lottermoser, W.** (1952). *Nachhallzeiten in Barockkirchen*. Acustica, Vol. 2, pp. 109-111.
- [39] **Ahnert, W. et Steffen, F.** (1993). *Beschallungstechnik. Grundlagen und Praxis*. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- [40] **Houtgast, M. et Steeneken, H.** (1985). *The modulation transfer function in room acoustics*. Brüel & Kjaer Technical Review, Vol. 3, pp. 3-12.
- [41] **Hodgson, M.** (1999). *Experimental investigation of the acoustical characteristics of university classrooms*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 106(4), pp. 1810-1819.

6 CONDITIONS ACOUSTIQUES SOUHAITABLES

6.1 Introduction

La détermination des conditions acoustiques souhaitables dans les églises constitue l'aboutissement logique de notre étude. Du fait qu'elle est basée sur une perception sensitive et subjective de la réalité, l'acoustique n'est pas une science exacte. La détermination des caractéristiques acoustiques souhaitables doit alors être envisagée dans la perspective d'une recherche de conditions permettant de satisfaire le plus grand nombre possible de personnes ou de diminuer au minimum les risques de plaintes de la part des utilisateurs. La notion de qualité se réduit ainsi souvent, au niveau de l'acoustique, plutôt à éviter les défauts acoustiques qu'à viser une perfection, unanimement et durablement reconnue, qui est illusoire dans ce domaine. La compréhension des phénomènes physiques, liés à l'acoustique, et psychophysologiques, liés à la perception des sons, permettent déjà d'éviter bien des erreurs. Les connaissances scientifiques, acquises sur la base d'études psychoacoustiques, nous donnent par ailleurs de précieuses indications sur les caractéristiques acoustiques permettant de satisfaire le plus grand nombre de personnes. Or, nous l'avons maintes fois vu, les divers utilisateurs d'une église ont généralement des exigences acoustiques très variées, voir divergentes, notamment entre les besoins d'une faible réverbération pour favoriser l'intelligibilité de la parole et les souhaits d'une réverbération flatteuse pour la musique. La détermination d'une acoustique satisfaisante (et non parfaite pour tous) passe donc par la recherche du meilleur (ou du moins mauvais) compromis. Les conditions souhaitables peuvent ainsi varier notablement d'une église à l'autre suivant les priorités fixées, notamment au niveau de la liturgie. Rappelons par ailleurs que l'acoustique ne constitue qu'un élément participant à la réussite (ou à l'échec) d'un projet de construction ou de transformation. La qualité architecturale d'un projet se traduit par une appréciation du choix des formes, des matériaux, de la lumière, du mobilier, mais également du confort thermique, de la qualité de l'air et des conditions acoustiques. Il est ainsi souvent difficile, voir impossible, d'isoler strictement cette dernière contrainte du contexte qui lui est propre. La réussite d'un projet, et en particulier de l'acoustique, passe ainsi par l'intégration des divers éléments et contraintes ce qui nécessite une étroite collaboration entre les intervenants.

Nous exposerons d'abord la méthodologie adoptée pour déterminer les conditions souhaitables, qui repose d'une part sur une étude bibliographique, et d'autre part sur la mise en relation des données statistiques mesurées avec celles subjectives obtenues grâce à une enquête auprès des utilisateurs. Nous présenterons alors des spécifications architecturales portant sur le volume, la forme et les matériaux. Une attention particulière sera portée à l'analyse du plafond qui apparaît comme un élément très important au niveau acoustique. L'analyse du temps de réverbération souhaitable constituera le cœur de notre recherche sur les conditions souhaitables. Nous poursuivrons avec des recommandations sur d'autres paramètres acoustiques comme le bruit de fond, l'intelligibilité et la sonorisation. Les caractéristiques souhaitables pour l'aménagement de l'espace, et en particulier la disposition de l'assemblée et de la position de l'orgue, seront abordées par une analyse plus large et pluridisciplinaire.

6.2 Méthodologie

La détermination des grandeurs souhaitables, du point de vue acoustique, dans le cadre de la construction ou de la transformation des églises, constitue l'aboutissement de ce travail. Elle se fera suivant deux méthodes distinctes. Nous effectuerons d'abord une étude bibliographique en essayant de synthétiser les recommandations publiées dans la littérature ou les fruits de l'expérience qui ont été dévoilés lors de notre survol historique. Nous compléterons cette démarche par l'analyse des résultats d'une enquête réalisée dans les églises ayant fait l'objet de notre analyse statistique (cf. chapitre 3).

6.2.1 Etude historique et bibliographique

Il existe une abondante littérature sur la construction ou la transformation des églises. L'obtention d'un lieu de culte satisfaisant passe par la mise en relation de nombreux domaines dont les exigences ne sont pas toujours faciles à concilier. On trouve ainsi des directives de constructions ou transformation aussi bien chez les architectes, pour des questions esthétiques que chez les théologiens pour des raisons liturgiques, mais également de la part des techniciens pour satisfaire les contraintes pratiques. C'est surtout chez ces derniers, et en particulier du côté des acousticiens, que l'on trouve des indications précises sur les dispositions à prendre pour obtenir une acoustique satisfaisante dans les lieux de culte. Parmi les nombreux sujets pouvant faire l'objet de recommandations pour obtenir de bonnes conditions acoustiques, nous nous limiterons à aborder, de façon essentiellement qualitative, les dispositions architecturales de base, à savoir le volume (et en particulier le volume spécifique), la forme (en particulier celle du plafond) et la matérialisation de l'église. Ce dernier aspect nous conduira à étudier précisément l'un des paramètres les plus importants du point de vue acoustique, le temps de réverbération souhaitable pour une église. Nous aborderons plus rapidement les autres paramètres acoustiques que sont l'intelligibilité, la répartition des niveaux sonore, le bruit de fond (extérieur et intérieur) ainsi que les possibilités d'amélioration et les limites des installations de sonorisation. Enfin les questions, souvent discutées, de la disposition souhaitable de l'assemblée et de la position et des conditions propices pour l'orgue seront abordées dans une discussion plus large, faisant intervenir des arguments architecturaux, théologiques et musicologiques.

6.2.2 Enquête

6.2.2.1 Méthodologie de l'enquête

6.2.2.1.1 Paramètres objectifs

L'étude sur les conditions acoustiques des églises en Suisse (cf. §3) nous a permis de recenser certains paramètres objectifs [1] (style architectural, confession actuelle, grandeurs géométriques, nombre de places, temps de réverbération (église vide) et bruit de fond par octave) dans 190 églises protestantes et catholiques sur l'ensemble du territoire helvétique.

Pour obtenir des données objectives complémentaires, nous avons demandé aux ministres des diverses paroisses contactées de remplir un questionnaire sur des données organisationnelles de l'église permettant notamment d'identifier la présence et l'utilisation d'une chaire, d'une installation de sonorisation, la disposition et la taille de l'assemblée, le nombre et la position du ou des orgues dans l'église ainsi que la fréquence des concerts d'orgue.

6.2.2.1.2 Appréciations subjectives

Pour obtenir les appréciations subjectives de ces églises, nous avons réalisé un questionnaire à choix multiple bilingue comportant vingt questions (cf. Annexe D) 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 (qualité de la sonorisation, répartition du niveau sonore et intelligibilité sans et avec sonorisation, bruits de fond);
- la position des sièges, le volume de l'église par rapport à sa fréquentation;
- l'orgue (position et niveau sonore comme accompagnement des chants de l'assemblée);
- compétence des personnes interrogées.

Ce questionnaire a été préalablement testé dans quatre églises sur une trentaine de fidèles par église [2]. Nous avons ainsi pu, d'une part revoir le libellé de 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 pour obtenir des résultats significatifs au vu de la distribution statistique des réponses.

Nous avons alors envoyé au ministre (pasteur ou prêtre) de chaque paroisse sept questionnaires, l'un devant être rempli par le ministre lui-même qui devait distribuer les six autres à des fidèles de la paroisse.

6.2.2.1.3 Taux de réponse

Le taux de réponse élevé nous a permis de réunir plus de 700 questionnaires (dont 113 pour le test sur les quatre premières églises) issus de 112 paroisses, soit un taux de réponse de 48%.

Tableau 1 Nombre de questionnaires envoyés et reçus

	Paroisses	Questionnaires	Questionnaires par paroisse
Envois	185	1460	7.9
Réponses	112	702	6.3
%	61%	48%	79%

6.2.2.1.4 Compétence

Le choix délibéré de notre étude était de se baser sur l'avis des utilisateurs des églises 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), cf. Figure 1). Nous avons vérifié cette affirmation en constatant que l'écart type moyen des réponses aux questions posées diminue lorsque la compétence moyenne par église augmente.

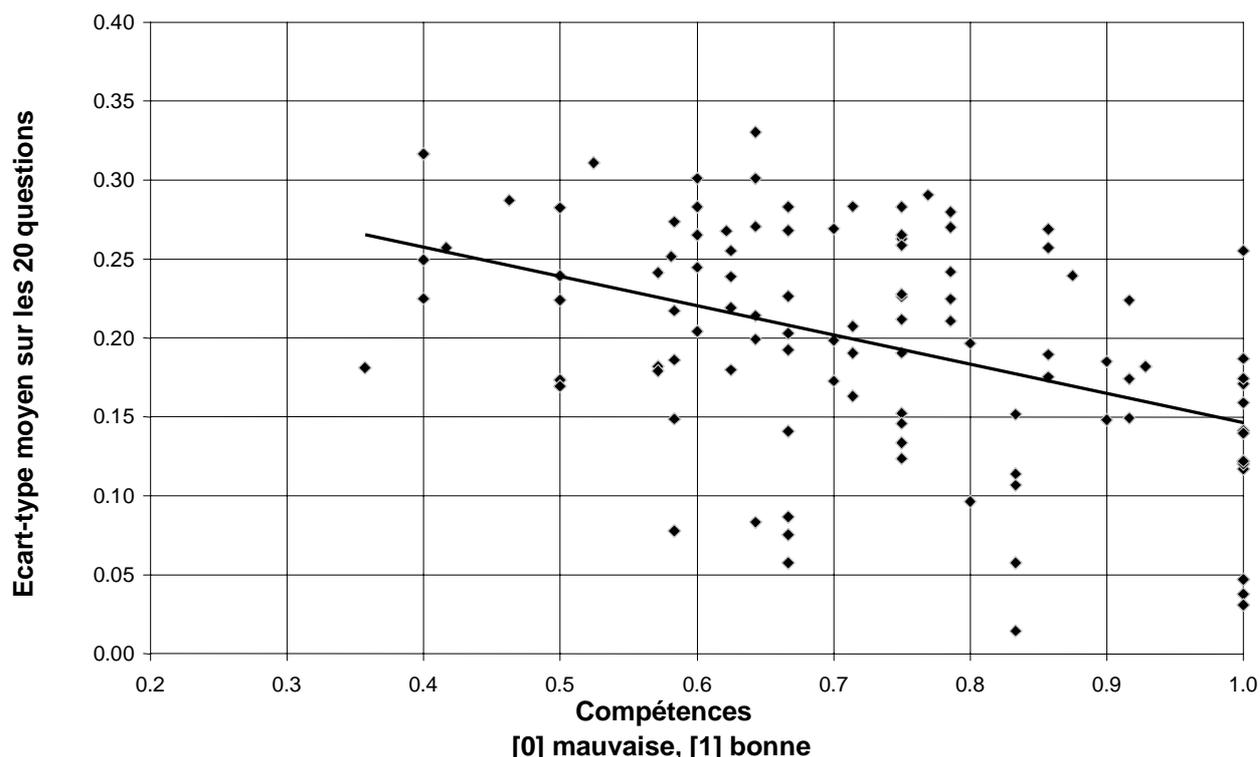


Figure 1 Moyenne des écarts-types sur les 20 questions en fonction de la compétence subjective moyenne pour chaque église.

6.3 Appréciation globale de l'acoustique

Avant d'analyser dans le détail les valeurs souhaitables des grandeurs géométriques et acoustiques, il est important de connaître leur importance relative du point de vue acoustique. La première question de l'enquête concerne ainsi « l'impression générale sur l'acoustique de l'église ».

Les corrélations entre l'appréciation générale de l'acoustique et les grandeurs géométriques relevées et le nombre de places, sont, dans l'ensemble, assez faibles (cf. Tableau 2). Ceci montre la difficulté des paroissiens de caractériser globalement l'acoustique¹. La hauteur moyenne puis le nombre de places sont les paramètres les plus importants pour l'appréciation générale. Par contre le volume et le volume spécifique ne semblent pas influencer le jugement général de l'acoustique. Par comparaison, les coefficients de corrélation linéaire entre les grandeurs géométriques et le nombre de places sont nettement meilleures avec la perception subjective de l'intelligibilité qui est plus facile à appréhender. Dans ce cas, on retrouve la hauteur moyenne comme paramètre principal.

Tableau 2 Coefficient de corrélation linéaire (r) entre l'appréciation subjective générale, l'appréciation de l'intelligibilité et les paramètres géométriques

Corrélation r	Volume	Surface	Hauteur moyenne	Places	m ³ /pers.
Appréciation générale	-0.13	-0.17	-0.31	-0.28	0.01
Appréciation intelligibilité	-0.39	-0.49	-0.63	-0.45	-0.32

L'analyse des paramètres acoustiques montre que le temps de réverbération ne présente pas une meilleure corrélation avec l'appréciation générale que celle obtenue avec la hauteur moyenne. Si l'on considère l'analyse en fréquence du temps de réverbération, les corrélations les plus fortes sont obtenues pour les bandes d'octaves centrées à 2000 Hz et 1000 Hz (cf. Tableau 3). Si l'on admet que la parole est un facteur 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 [3] soient celles qui influencent le plus l'appréciation subjective. Notons enfin que les coefficients de corrélation ne sont pas beaucoup modifiés si l'on considère le temps de réverbération des églises occupées (en prenant le taux moyen d'occupation de 35%).

Tableau 3 Coefficient de corrélation linéaire entre l'appréciation subjective générale et le temps de réverbération mesuré

Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	500+1000
r Vide	-0.27	-0.29	-0.26	-0.30	-0.31	-0.25	-0.29
r Occupé (35%)	-0.28	-0.27	-0.30	-0.30	-0.31	-0.26	-0.24

Mentionnons par ailleurs que le bruit de fond influence également de façon importante l'appréciation générale de l'acoustique (r de -0.32).

¹ Il aurait peut-être été plus facile pour les paroissiens de répondre à cette question en fin et non en début de questionnaire.

6.4 Spécifications architecturales

Le style architectural se manifeste aussi bien dans le choix du volume que dans les matériaux utilisés qui déterminent tous deux les conditions acoustiques d'un espace.

6.4.1 Volume et volume spécifique

6.4.1.1 Etude bibliographique

Le volume d'une église dépend non seulement de sa surface au sol, qui est souvent fixée en fonction de l'organisation souhaitable de l'espace, mais également de la hauteur, qui a une grande importance au niveau acoustique. Le volume d'une église devrait être fixé principalement en fonction de son occupation prévisible. C'est donc le volume spécifique qui est la grandeur principale à respecter.

Selon Fasold [4], le volume spécifique d'une église devrait se situer entre 5 et 15 m³ par personne. Pour des églises neuves, il recommande [5] de planifier un volume spécifique entre 6 et 10 m³/personne. Lauber [6] préconise, pour les églises, un volume spécifique optimum de 10 m³/personne (au moins 8 m³/personne et au plus 20 m³/personne) et Zorkoczy [7] entre 8 et 10 m³/personne. Pour les églises de concert, Fasold recommande d'avoir au moins 12 m³/personne [8]. La musique d'orgue demande un volume spécifique compris entre 10 et 14 m³ par personne et un volume maximum de 30'000 m³ [5]. Lehmann [9] préconise, pour la musique d'église, un volume spécifique de 17 à 20 m³/personne pour les petites et moyennes églises ($V < 3000 \text{ m}^3$) et de 20 m³/personne pour les grandes églises. Il propose par ailleurs diverses relations² pour fixer le nombre optimum d'auditeurs en fonction du volume de la salle. Notons que bien souvent, les églises sont trop grandes pour les célébrations (faible occupation) mais trop petite pour les concerts (occupation importante). En conclusion, une église devrait avoir un volume spécifique de **6 à 12 m³/personne pour les activités liturgiques et de 10 à 20 m³/personne pour les concerts.**

Selon Lauber [6], un orateur entraîné peut se faire entendre sans l'aide d'une installation de sonorisation si le volume de l'église est inférieur à 6000 m³. D'après de récentes recommandations [10], ce volume maximum sans sonorisation est ramené à 3000 m³ pour un orateur ordinaire, et à 5000 m³ pour un orateur entraîné (valeur également préconisée dans les églises par Eggenschwiler [11]). Notons cependant que le volume maximum dans lequel un orateur est bien compris dépend aussi du niveau de bruit de fond et des conditions acoustiques du local (en particulier sa réverbération).

6.4.1.2 Enquête

D'après les résultats de notre enquête, l'appréciation subjective de la taille d'une église ne dépend pas de son volume (cf. Figure 2). En moyenne, les églises sont

² Empiriquement, le nombre d'auditeurs optimum devrait avoisiner $1.54 \cdot V^{0.75}$ ou $3 \cdot V^{0.66}$ (suivant les auteurs [9]).

plutôt considérées comme trop grandes. L'appréciation subjective moyenne de la taille est, en effet, de 0.65 ± 0.19 sur une échelle de 0 (=trop petite) à 1 (trop grande). Cette remarque s'applique davantage aux églises réformées (appréciation subjective moyenne de 0.69 ± 0.19) que catholiques (appréciation subjective moyenne de 0.58 ± 0.16).

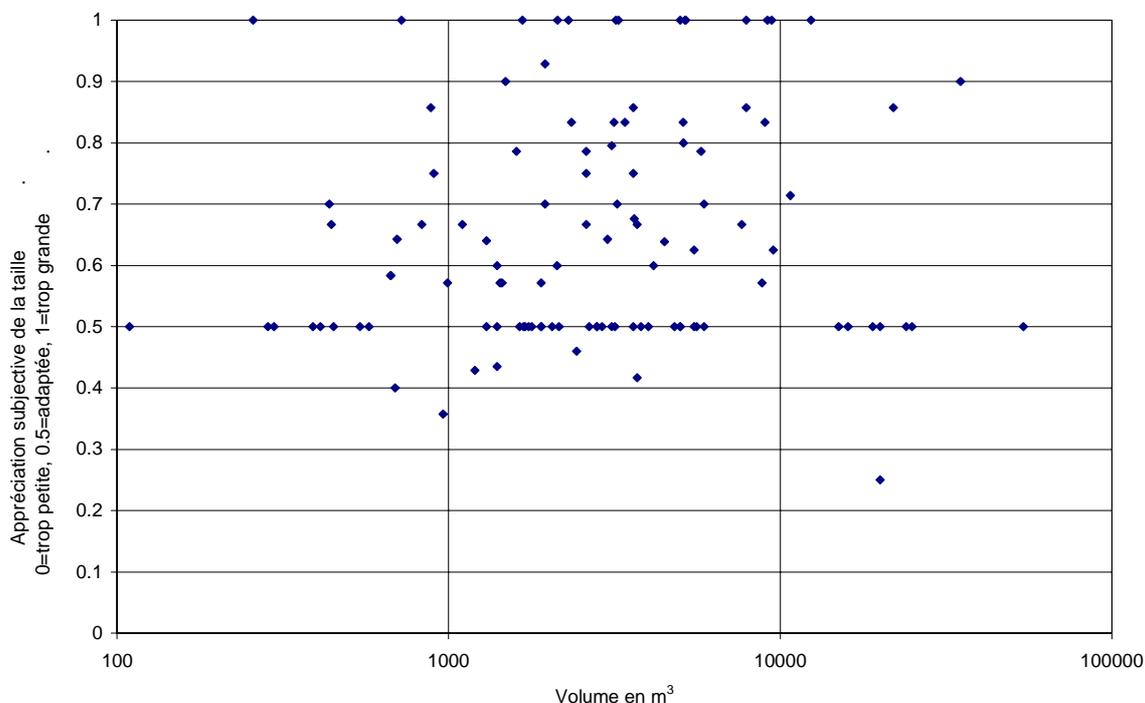


Figure 2 Appréciation subjective de la taille d'une église en fonction de son volume

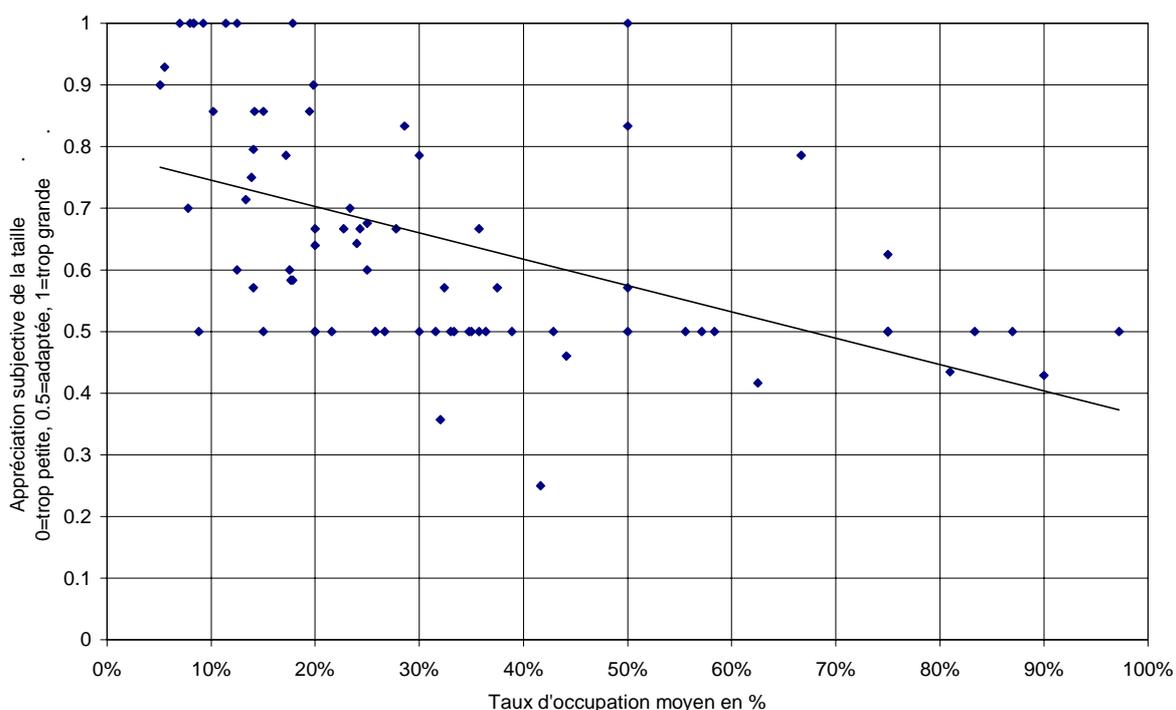


Figure 3 Appréciation subjective de la taille de l'église en fonction de son taux d'occupation

D'après les résultats de notre enquête, l'appréciation subjective de la taille d'une église est en fait proportionnelle à son taux d'occupation (cf. Figure 3). La taille d'une église est optimale (valeur d'appréciation subjective de 0.5) si son **taux d'occupation moyen avoisine 70%**. Le choix du volume lors de la construction ou la transformation d'une église implique donc une réflexion approfondie sur la taille de la communauté qui l'habitera.

Les faibles taux d'occupation observés trahissent par ailleurs la désaffectation des lieux de culte et posent la question du regroupement et de la réaffectation de ces édifices³, par exemple comme salles de concerts⁴.

6.4.2 Forme et matérialisation

Plusieurs auteurs, dont Carvalho [14] et Martellotta [15], ont effectué des recherches approfondies pour formaliser les relations entre les grandeurs géométriques dans les églises et les paramètres acoustiques [16-18] ainsi qu'avec l'appréciation subjective [19-21]. Nous nous contenterons donc dans cette analyse de remarques plus qualitatives que quantitatives. Il faut en effet relever qu'il n'y a pas une seule forme idéale pour les églises mais plutôt diverses géométries permettant d'obtenir de bonnes conditions acoustiques. Les formes souhaitables varient beaucoup suivant les choix liturgiques et l'organisation de l'espace (notamment la disposition de l'assemblée et la position de l'orgue). Il est donc réducteur et contraire à la liberté créatrice des architectes que de vouloir préconiser une forme type pour les églises. Il est par contre nécessaire de préciser les risques de défauts acoustiques engendrés par le choix de formes inappropriées.

6.4.2.1 Plan

La forme des églises est particulièrement importante pour la propagation des ondes sonores [22]. Le choix de la forme d'une église doit **favoriser la propagation du son**, des sources sonores (naturelles ou électroacoustiques) vers l'assemblée, **en évitant les phénomènes de focalisation**. Il est ainsi recommandé d'éviter les formes concaves ou alors de prendre des dispositions au niveau du choix des matériaux (absorbants) pour éviter la concentration du son en certaine position de l'assemblée.

Plusieurs acousticiens recommandent d'éviter les plans induisant une multiplication de volumes qui créent des effets de couplages acoustiques parfois gênants [23-25]. Glover [26], préconisait ainsi en 1933 que "dans la mesure du possible, l'église devrait être en une partie, sans transept". Il argumente ce choix, qui conduit à renoncer également aux chapelles latérales, non seulement du fait de l'apparition de taux de décroissance différents, mais également par la présence de nombreuses

³ Schwebel [12], qui aborde cette délicate question dans les milieux urbains, propose, comme piste, la transformation des églises en centres paroissiaux, en lieux publics de rencontre; la location des églises, voir l'utilisation non religieuse, en particulier culturelle des églises superflues. Notons que ces diverses utilisations exigent des conditions acoustiques parfois très éloignées de celles qu'on trouve dans les églises historiques, et demandent donc d'importantes corrections dans ce domaine.

⁴ Certaines églises, comme l'abbaye de Bonmont, ont pratiquement perdu leur utilisation religieuse et tendent à devenir des salles de concerts [13] ou des musées.

"notes résonantes" qui diffèrent entre elles. Il faut en effet éviter les volumes dont les proportions égales ou multiples peuvent présenter de forts modes propres qui créent une forte « coloration » du volume.

Une bonne vision directe de l'assemblée sur la zone de célébration permet d'avoir une contribution sonore venant directement de la source (ou amplifiée au moyen d'une installation électroacoustique), qui est très importante au niveau acoustique. Le choix de la forme doit contribuer à créer une bonne répartition du son au sein de l'assemblée.

La disposition de l'assemblée (en particulier « en long » ou « centrée », cf. §6.7) est un facteur déterminant par rapport au choix du plan d'une église. Les dispositions centrées, qui requièrent des plans dont la largeur est plus importante que la longueur (par exemple plan en large, en éventail ou circulaire), favorisent davantage l'intelligibilité de la parole. Plusieurs auteurs [27-30], principalement issus des mouvements liturgiques conservateurs, se montrent en défaveur de ce type de plan qui, par son manque de réflexions latérales, est peu adapté pour la musique. Au contraire, un plan présentant une grande longueur (par exemple le type basilical) et une faible largeur sera plus adapté à la musique qu'à la parole et conviendra parfaitement à une disposition de l'assemblée « en long ».

6.4.2.2 Plafond

Le plafond d'une salle se définit essentiellement par sa forme, sa hauteur et sa matérialisation, ces trois paramètres étant capitaux non seulement du point de vue de l'architecture mais également de l'acoustique. En effet, nous avons vu précédemment que la hauteur était la grandeur géométrique la mieux corrélée avec l'appréciation subjective et surtout avec l'intelligibilité de la parole (cf. §6.3). Le Tableau 4 montre que la hauteur moyenne d'une église est également déterminante par rapport à l'appréciation subjective de la résonance, de l'acoustique pour la parole, de la répartition des niveaux sonores et de la présence d'échos gênants.

Tableau 4 *Corrélation linéaire (r) entre hauteur moyenne et appréciation spécifique*

Résonance	0.41
Acoustique parole	-0.45
Niveau sonore	-0.46
Intelligibilité	-0.63
Echos gênants	-0.42

En effet, la forme du plafond détermine l'orientation des réflexions qui diffuseront ou focaliseront le son. L'architecte Lachèze [31] remarquait déjà en 1879 que « les voûtes et les plafonds à courbures (...) offrent des masses d'air nuisibles à la pureté des sons ; elles donnent lieu à des résonances, mais le plus souvent elles produisent des échos plus ou moins sensibles, par la concentration des ondes réfléchies en certains points, concentration qui est le résultat nécessaire des réflexions sur les parois à simple ou double courbure ». Afin d'éviter de tels effets, il formule alors cette invitation : « c'est un très bon exercice pour un architecte qui veut devenir acousticien, que de faire des épures pour se rendre compte graphiquement des phénomènes de réflexion des ondes sonores, et se familiariser avec tous les résultats qui se présentent dans la pratique de son Art, lorsqu'il s'agit d'acoustique ». L'importance et les effets acoustiques des voûtes ont été confirmés par diverses

études scientifiques [32] montrant notamment que la présence de voûtes induisait une concentration de l'énergie acoustique, en particulier si le rayon de courbure du plafond est de l'ordre de grandeur de la hauteur (cf. Figure 4) et si la source et le récepteur sont situés dans le plan de symétrie longitudinal. Cette inhomogénéité spatiale peut être recherchée, mais elle est, dans bien des cas, néfaste à la qualité acoustique de l'édifice.

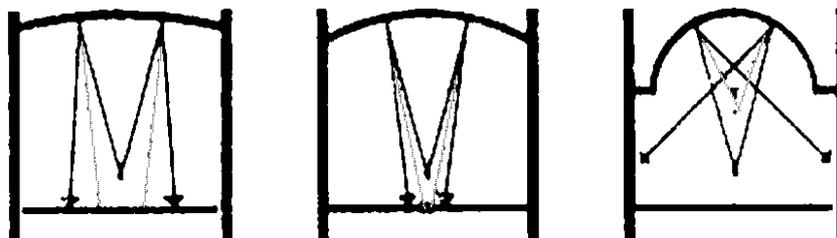


Figure 4 Effets de diffusion (rayon de courbure grand, à gauche, ou faible, à droite, par rapport à la hauteur) ou de focalisation (rayon de courbure de l'ordre de grandeur de la hauteur) du plafond [7]

La hauteur du plafond détermine principalement le retard entre le son arrivant directement à l'auditeur et celui issu de la réflexion par le plafond. Cette différence de chemin doit être inférieure à 12 m pour ne pas perturber la parole (environ 16 m pour la musique). Par ailleurs, le temps de réverbération, qui est un des paramètres acoustiques les plus importants, est généralement proportionnel à la hauteur. Enfin, selon la matérialisation du plafond, les ondes incidentes seront plus ou moins réfléchies (surfaces lisses et rigides), absorbées (surfaces absorbantes) ou diffusées (surfaces texturées, cf. Figure 5). Ces phénomènes, qui varient en fréquence, déterminent la réverbération du volume.

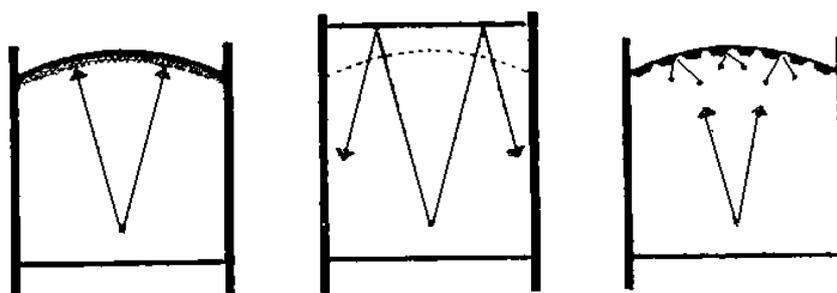


Figure 5 Les phénomènes de focalisations peuvent être atténués par le choix de matériaux absorbant (à gauche), transparent (au centre) ou diffusant (à droite) [7]

6.4.2.3 Echo

La conception architecturale peut également entraîner la formation de divers types d'échos qui sont à éviter, sauf dans les cas où l'on recherche à créer ces phénomènes, qui deviennent des curiosités acoustiques, pour des raisons

particulières⁵. Ces échos sont cependant fortement préjudiciables autant pour la parole que pour la musique. Il faut ainsi éviter d'avoir:

- une grande surface réfléchissante éloignée (ce qui peut être le cas de plafond haut comme nous l'avons vu dans notre analyse des chaires et abat-voix) source d'un "écho franc"⁶. L'écho est d'autant plus fort que la courbe de la surface focalise le son au point de réception.
- de grandes surfaces réfléchissantes parallèles source d'échos répétés, appelés "échos flottants". Pour éviter ce phénomène, il faut soit utiliser des matériaux absorbant ou diffusant sur l'une des surfaces, soit briser le parallélisme en ayant un angle d'ouverture d'au moins 7° pour chacun des murs [34]. On peut retrouver également ce phénomène avec un plafond dont le rayon de courbure est de l'ordre de grandeur de la hauteur (cf. Figure 6).
- des surfaces circulaires (sphère ou tambours à la base d'une coupole⁷), formant des guides d'ondes, et créant des "échos rampants" (cf. Figure 6). On peut, dans ces "galeries des murmures", entendre distinctement, le long de cette surface, une personne parlant contre cette surface formant le guide d'onde, même si elle est située à grande distance de l'auditeur.

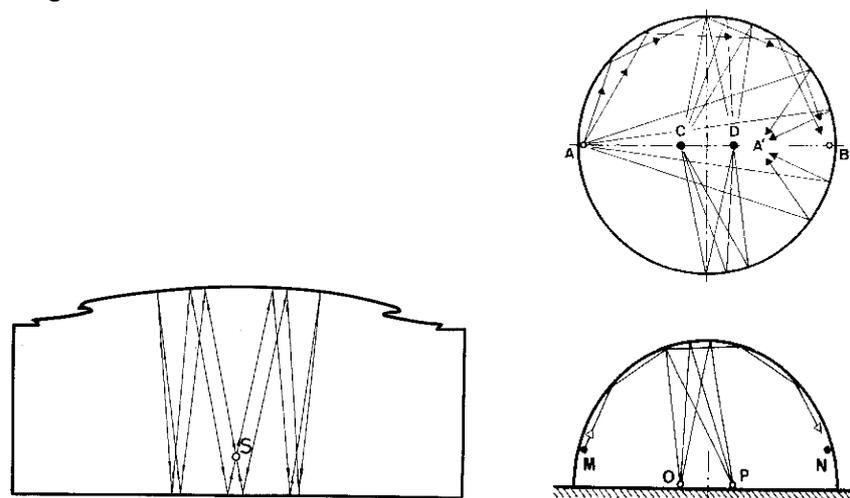


Figure 6 Schéma d'un écho flottant issu du plafond (à gauche) et d'un écho rampant dans une église semi-sphérique (à droite) [6]

Selon les résultats de notre enquête, les échos sont rarement⁸ gênant dans les églises. La réponse moyenne à la question sur la présence "d'échos gênants (répétition distincte du son)" est en effet de 0.83 ± 0.27 (sur une échelle de 0=présence d'échos à 1=absence d'écho). La perception d'écho est fortement liée à

⁵ Selon Crunelle, "si l'on considère qu'une architecture sacrée doit contenir certaines manifestations étonnantes, certaines règles représentatives des lois divines et de la cosmologie de l'époque, il est compréhensible que nos ancêtres aient voulu reproduire certains effets d'écho, à l'intérieur ou à l'extérieur d'édifices sacrés" [33].

⁶ Un écho franc se caractérise par la répétition tardive (plus de 90 ms) du signal sonore qui ne lui est plus intégré. Une réflexion plus précoce est intégrée au signal mais peut être ressentie comme gênante si elle dépasse une certaine limite (environ 35 ms pour la parole et 45 ms pour la musique).

⁷ Ces phénomènes sont particulièrement impressionnants dans l'église de la Trinité à Genève ou dans les dômes de St-Pierre de Rome ou St-Paul de Londres [33].

⁸ Parmi les églises où des échos sont ressentis comme gênants par les paroissiens, citons La Sainte Trinité à Genève, le Grand Temple de La Chaux-de-fonds, ou le temple du Pont (VD).

la hauteur moyenne de l'église (coefficient de corrélation de -0.49 entre ces paramètres). Notons que la perception d'écho est un paramètre déterminant pour l'appréciation générale de l'acoustique d'une église. En effet, le coefficient de corrélation avec l'appréciation générale est de -0.63 , ce qui représente, en valeur absolue, la valeur plus importante après l'appréciation de l'acoustique pour la parole. La notion d'écho est cependant parfois difficile à être appréhendée par les paroissiens qui la confondent souvent avec la réverbération.

6.4.2.4 Répartition des niveaux sonores

Le choix des formes géométriques ainsi que les revêtements utilisés dans une église peut entraîner de grandes différences de niveaux sonores entre les places. Ainsi une voûte, une abside ou toute forme concave réfléchissante peut conduire à focaliser le son en certaines positions de l'assemblée, ce qui entraîne une augmentation du niveau sonore à ces places. Du point de vue acoustique, il faut ainsi éviter ce type de forme (par exemple les plafonds de forme elliptique⁹) et préférer des surfaces permettant de diffuser le son (par exemple les formes convexes ou irrégulières). Au contraire, des fidèles positionnés sous une grande galerie, derrière une colonne ou dans un profond transept peuvent avoir un niveau d'écoute très faible (surtout en ce qui concerne le son direct, essentiel pour l'intelligibilité de la parole). Rares sont cependant les recommandations qui fixent une limite pour la répartition des niveaux sonores dans les églises. La valeur proposée par certains [35; 36] est de ± 3 dB(A). Un niveau sonore de 66 dB(A) doit par ailleurs pouvoir être atteint en toute position de l'église [35].

Tableau 5 *Appréciation subjective de la répartition des niveaux sonores (le niveau de la parole varie suivant la place: 0=beaucoup, 0.5=un peu; 1=très peu)*

	Moyenne	Ecart type entre églises	Ecart type entre réponses d'une même église
Sans sonorisation	0.38	0.28	0.29
Avec sonorisation	0.47	0.23	0.28

Les résultats de l'enquête (cf. Tableau 5) montrent que le niveau sonore de la parole varie un peu à beaucoup suivant les places. Les églises présentent donc une faible homogénéité des niveaux sonores. Notons que l'écart type entre les valeurs moyennes des diverses églises ainsi que l'écart type moyen entre les réponses données pour une même église sont relativement élevés. De par leur habitude de placement dans leur église¹⁰, il semble difficile aux paroissiens de juger ce paramètre. L'utilisation d'une installation de sonorisation permet de réduire quelque peu les différences de niveau sonore suivant les places ainsi que les écarts entre églises, sans toutefois conduire à des situations vraiment satisfaisantes.

⁹ Crunelle [33], cite divers exemples d'églises avec des voûtes elliptiques permettant de favoriser la propagation du son entre ses deux foyers.

¹⁰ Nombreux sont en effet les paroissiens qui ne changent pas de position dans l'église d'une célébration à l'autre, ayant, pour ainsi dire, réservé leur place par habitude.

6.4.2.5 Matériaux et position

Le choix des matériaux et leur positionnement est essentiel du point de vue acoustique. Les matériaux peuvent être classés selon trois grandes catégories suivant leur propriété acoustique : diffusant, réfléchissant ou absorbant.

La forme, les matériaux et le mobilier doivent favoriser la **diffusion** du son, qui permet notamment de mieux tolérer une réverbération un peu trop élevée et d'éviter les phénomènes de focalisation. Les surfaces convexes, très texturées, irrégulières et non parallèles sont ainsi très favorables du point de vue acoustique¹¹ (cf. Figure 7 et Figure 8). Lauber [6] regrette que de « nombreuses églises modernes manquent clairement de diffusion, mettant en évidence les temps de réverbération élevés qui sont ressentis comme gênants ».

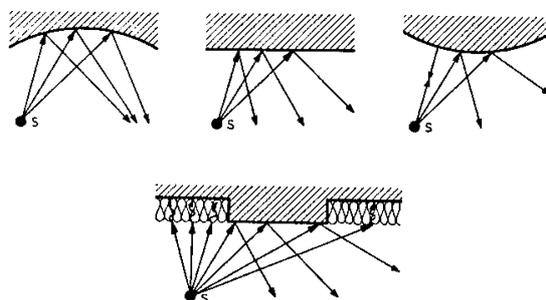


Figure 7 Les surfaces concaves focalisent le son (à gauche), planes elles le réfléchissent spéculairement (au centre), convexes (à gauche) ou irrégulières (en bas) elles le diffusent [7]



Figure 8 Reliefs et très diffusants du plafond et des murs de l'église de St-Luc à Lausanne

Les **matériaux réfléchissants** doivent être utilisés dans les zones permettant de renvoyer le son précoce vers l'assemblée. On emploiera donc des matériaux

¹¹ Les églises baroques catholiques avec leur riche ornementation sculpturale sont par exemple très favorables de ce point de vue. Au contraire, les églises romanes, dépouillée et avec une voûte en plein cintre peuvent manquer de diffusion.

réfléchissants (par exemple béton ou maçonnerie) proches des sources sonores¹², pour les plafonds bas (hauteur < 10 m) et sur les parties inférieures des murs latéraux. Une surface réfléchissante permet de renvoyer spéculairement (comme un miroir) les sons dont la longueur d'onde est inférieure aux dimensions de cette surface.

Les **matériaux absorbants**, caractérisés par un coefficient d'absorption élevé, doivent être mis en place pour supprimer les phénomènes acoustiques gênants comme les échos et régler la réverbération de l'église¹³. On utilisera donc des matériaux absorbants sur des surfaces concaves produisant des phénomènes de focalisation, sur une partie des plafonds très hauts produisant des réflexions tardives ou sur le mur du fond de l'église. Ce type de matériaux peut éventuellement être ajouté lors de transformation comme mesure d'assainissement acoustique. Durant la première moitié du XX^e siècle, il était d'usage de corriger l'acoustique des églises classées historiquement et trop réverbérantes par la projection de crépi poreux¹⁴ voir d'amiante¹⁵. Rappelons que les propriétés d'absorption dépendent de la fréquence et qu'on doit généralement combiner divers type de matériaux, (absorbant chacun pour une gamme fréquentielle déterminée), pour obtenir une bonne réponse en fréquence de la réverbération. Klepper [40] met en garde contre l'utilisation excessive, dans les églises, de boiseries, qui n'absorbent que les basses fréquences, et de tapis ou de crépis poreux, qui ne sont efficaces qu'en hautes fréquences. L'utilisation de laine minérale recouverte de panneaux de bois perforés, de lames ajourées ou de crépis poreux permet par exemple une absorption sur l'ensemble du spectre¹⁶. Notons que certains éléments des églises historiques, comme les planchers en bois sous les bancs, les boiseries, les retables [41] ou les parements poreux (par exemple en tuf) présentent une certaine absorption, surtout aux basses fréquences pour les deux premiers exemples cités. Leur suppression entraîne donc une augmentation, parfois significative, du temps de réverbération¹⁷.

L'utilisation de coussins sur les bancs (cf. Figure 9), d'absorption intégrée aux bancs (cf. Figure 10) ou de chaises rembourrées (cf. Figure 20 du chapitre 5) est très

¹² Les sources non amplifiées, en particulier les formations musicales, doivent bénéficier de suffisamment de réflexions précoces pour s'entendre mutuellement. En général, la voix peut par contre être renforcée par une installation de sonorisation.

¹³ En considérant la formulation du temps de réverbération avec une équivalence cubique [37] (cf. §3.2.4.1) ainsi que le temps de réverbération souhaitable dans une église selon une formulation en puissance (cf. §6.5), on peut en déduire l'absorption acoustique moyenne souhaitable des surfaces de l'église qui est de $\alpha=0.27$, ce qui semble particulièrement élevé. Recknagel [38] donne en effet pour l'absorption moyenne des matériaux mis en place dans les églises la valeur de 0.03 à 0.08, qui semble plus proche de situations réelles.

¹⁴ Villard [39], mentionne le traitement des églises de Saignelégier, d'Amriswil et des temples de Morges, Glion, Lyss et St-Pierre de Genève par la projection de Spray Limpet Asbet.

¹⁵ Les églises ayant subi un traitement à l'amiante, comme par exemple la Croix d'Ouchy à Lausanne, sont maintenant soumises à l'obligation de défloquer cette mesure de correction acoustique dont la toxicité a été démontrée.

¹⁶ La compatibilité thermique de ces matériaux doit cependant être bien vérifiée afin d'éviter les problèmes de condensation.

¹⁷ La mise en place d'un crépi à la chaux sur les voûtes en tuf de l'église romane de Grandson entraîne ainsi par exemple un doublement de la réverbération de cette église.

controversée¹⁸. En effet, plusieurs auteurs [6; 42; 43] préconisent ce type de mesure pour compenser un faible taux d'occupation et améliorer les performances des systèmes de sonorisation bien conçus qui concentre le son amplifié sur la zone des bancs. Cependant, il est reconnu que la mise en place de coussins absorbant sur les bancs, diminue la qualité acoustique du chant communautaire. Cette mesure, ainsi que la mise en place de tapis sous la zone des bancs, est donc critiquée par certains auteurs [30; 44] qui désirent favoriser cet aspect liturgique. L'utilisation de coussins doit donc être étudiée au cas par cas, selon le taux d'occupation et l'importance donnée au chant de l'assemblée [40].



Figure 9 Coussins sur les bancs de l'église d'Oberuzwil

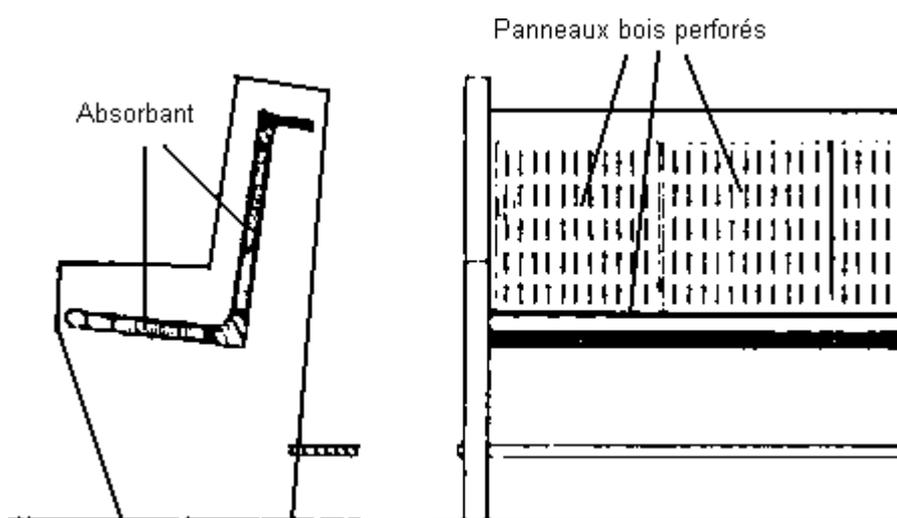


Figure 10 Bancs intégrant une absorption acoustique [6]

¹⁸ On trouve par exemple des coussins sur les bancs des églises de Zufikon, Yens, Le Bouveret et Oberuzwil. Les églises de Cugy, Froideville, Rolle et du Pasquart à Bienne possèdent des chaises rembourrées.

6.5 Temps de réverbération

6.5.1 Etude bibliographique

6.5.1.1 Distinction suivant l'utilisation

Le choix de la réverbération d'une église est une gageure dans la mesure où, durant une célébration religieuse, on a une succession rapide d'évènements qui ont des besoins acoustiques divers. Comme le souligne Ballou [45], une célébration peut faire intervenir de la musique d'orgue (temps de réverbération souhaitable Tr_{opt} de plus de 2.5 s), de la musique instrumentale ($Tr_{opt} = 1.4$ s), des lectures et une prédication ($Tr_{opt} < 1$ s), une chorale ($Tr_{opt} = 1.8$ s) et des chants de l'assemblée ($Tr_{opt} = 1.6$ s). Ainsi, en moins d'une heure, les exigences pour le temps de réverbération varient de moins d'une seconde à plus de 2.5 secondes. Une acoustique trop réverbérante peut transformer la liturgie en brouhaha alors qu'une acoustique trop sèche, étouffant prématurément les sons fera que les fidèles se sentiront "isolés, séparés, inhibés, atteints dans leur droit à prendre part activement et vocalement à la célébration" [46]. Certains auteurs [4; 7; 47], qui considèrent des églises essentiellement destinées à une liturgie parlée, préconisent un temps de réverbération inférieur à 1.5 secondes, et ce même pour des grands volumes (par exemple $10'000\text{ m}^3$). La liturgie orthodoxe russe chantée dans de grandes églises demande une réverbération de l'ordre de 4.0 ± 0.5 s [48]. L'orgue demande une assez grande réverbération pour prolonger et bien mélanger les sons émis et obtenir une « patine » suffisante pour ce type de musique. Ainsi Glover [26], qui conçoit l'église surtout pour la musique, juge comme acceptable une réverbération de plus de 7 s dans les grands édifices, même avec une grande assemblée présente¹⁹. Le temps de réverbération souhaitable pour la musique d'orgue étant sujet à d'innombrables controverses, nous traiterons spécifiquement de cette question dans un chapitre ultérieur (cf. 6.8.2.2).

Il semble alors pertinent²⁰ de distinguer, à la suite de certains auteurs, le temps de réverbération souhaitable selon le type de célébration²¹ (liturgique ou plutôt orientés sur la parole ou la liturgie [47; 50]) ou selon la confession²² [49; 51]. Rappelons cependant que notre analyse statistique des célébrations actuelles (cf. §2.4) a mis en évidence la proximité des exigences acoustiques pour les liturgies catholiques et protestantes en Suisse Romande.

¹⁹ Paradoxalement, il recommande d'utiliser des matériaux "raisonnablement absorbant", en particulier des crépis acoustiques sur le mur ouest et sur les autres parties susceptibles de créer des échos.

²⁰ Cette pertinence est cependant indûment contestée par Joyner [30] qui défend une acoustique favorisant la musique (avec un temps de réverbération notamment plus élevé que les recommandations de Knudsen [49]) quelle que soit la confession.

²¹ Lauber [6] préconise ainsi un temps de réverbération de 2 à 3 secondes pour la musique liturgique et de 1 à 1.5 s pour la prédication.

²² Knudsen affirme ainsi [49] qu'il est "nécessaire de reconnaître la nature générale des exigences acoustiques des églises de différentes confessions. La musique a une fonction importante dans toutes les églises. Le sermon est plus important dans les églises protestantes que dans les églises catholiques".

6.5.1.2 Formulation du temps de réverbération souhaitable

Le temps de réverbération souhaitable est généralement donné sous forme d'une valeur cible ou d'une fourchette, et plus rarement d'une valeur minimale [52] ou d'une valeur maximale [53]. Rare sont cependant les auteurs qui précisent explicitement ou distinguent [54] l'état d'occupation pour le temps de réverbération. Le temps de réverbération optimal est parfois donné pour des églises vides [53; 55], légèrement occupées [56] ou pleines [7; 57]. Furrer [53] propose non seulement de limiter à 2 s le temps de réverbération dans les églises occupées pour permettre une intelligibilité suffisante sans altérer la qualité musicale (de l'orgue et du chœur) mais il recommande également de ne pas dépasser 3 à 3.5 s dans les églises vides pour tenir compte des conditions avec un faible taux d'occupation. En général, le temps de réverbération optimum est donné pour les moyennes fréquences (moyenne des bandes d'octaves centrées à 500 et 1000 Hz [8; 11; 51; 55], ou uniquement à 500 [9; 52] ou 1000 Hz [58]). Dans de nombreux cas cependant, on ne connaît pas la bande fréquentielle considérée pour le temps de réverbération.

Le temps de réverbération souhaitable est généralement donné en relation avec le volume selon une fonction logarithmique [4; 7; 8; 11; 51; 55; 56] (cf. Figure 11), en puissance [37; 39; 55; 57] (cf. Figure 12), ou selon une fonction complexe du volume [59], par exemple polynomiale. Mentionnons que certains auteurs fixent les conditions souhaitables pour la réverbération indépendamment du volume [5; 35; 50; 52; 53].

6.5.1.3 Comparaison des valeurs souhaitables

6.5.1.3.1 Evolution du temps de réverbération souhaitable avec le volume

Si l'on compare les valeurs optimales du temps de réverbération [60], on constate rapidement que la plage d'appréciation est relativement large selon les divers auteurs. Avec une formulation logarithmique du temps de réverbération avec le volume ($Tr = a \cdot \log(V) + y$; cf. Figure 11), la pente des courbes est assez similaire entre les auteurs (pente moyenne $a = 0.25 \pm 0.14$), mais nettement inférieure à nos résultats de mesurages (en gras sur la Figure 11, $a = 0.87$ églises vides et 0.46 églises pleines). La différence entre les auteurs provient donc davantage de la valeur de l'ordonnée à l'origine ($y = -0.31 \pm 0.79$ s) qui permet d'estimer la plage de tolérance des valeurs acceptable de du temps de réverbération qui est donc de ± 0.8 s.

Les évaluations du temps de réverbération souhaitable avec une équation en puissance du volume ($Tr = j \cdot V^n$, avec j et n les deux paramètres de l'équation) sont plus cohérentes entre elles (à l'exception des valeurs maximales envisagée par Fry [62], cf. Figure 12). Ces valeurs souhaitables sont comprises entre nos résultats de mesurages pour des églises pleines et avec une occupation de 35 %. Les valeurs des paramètres moyens des équations en puissance sont ainsi de 0.20 ± 0.13 pour le facteur multiplicatif (j) et 0.30 ± 0.09 pour la puissance (n). Remarquons que la plage du coefficient de puissance (n) comprend bien la valeur théorique de 0.33, qui correspond à la racine cubique du volume.

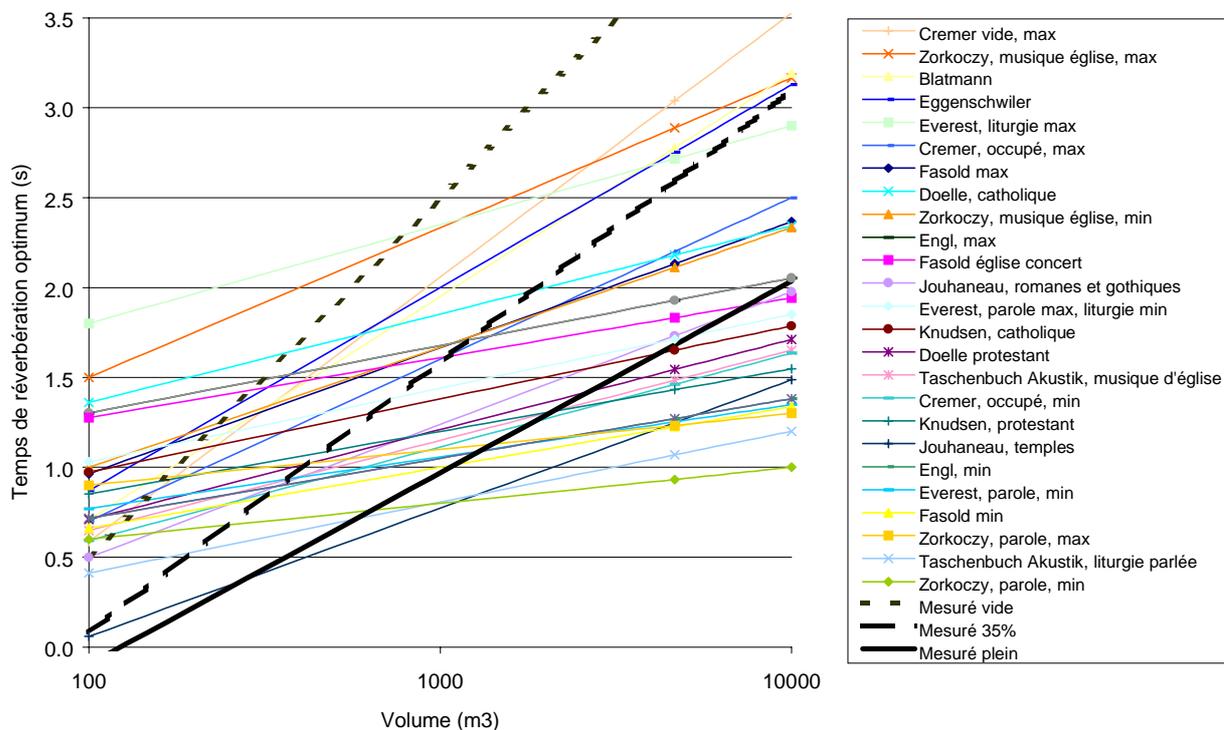


Figure 11 Temps de réverbération souhaitable (et valeurs mesurées) en fonction du volume (équation logarithmique $Tr=a.logV+y$)

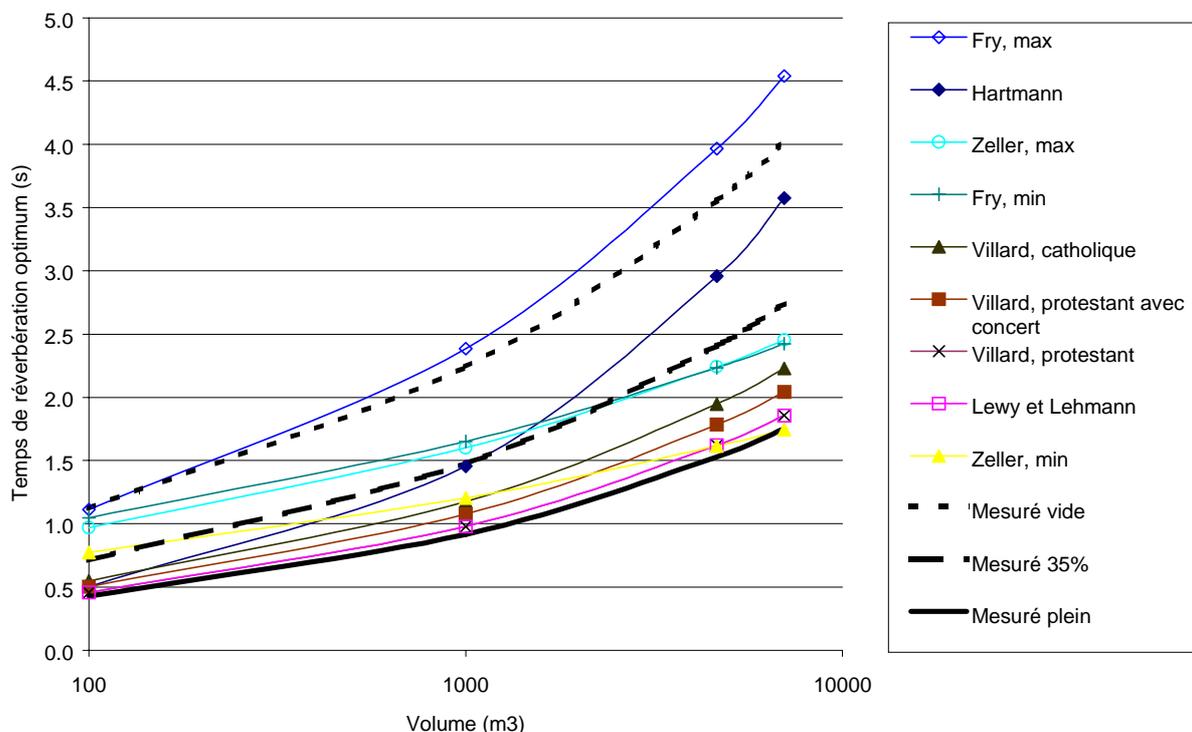


Figure 12 Temps de réverbération souhaitable (et valeurs mesurées) en fonction du volume (équation en puissance du volume $Tr=j.V^n$)

6.5.1.3.2 Comparaison pour un volume fixe

Pour permettre une meilleure comparaison des valeurs souhaitables préconisées par les divers auteurs, nous avons considéré un volume fixe de 4645 m³, correspondant à la valeur moyenne obtenue dans les églises suisses mesurées. Nous distinguerons, pour une question de présentation, les auteurs qui proposent une plage admissible (cf Figure 13) de ceux qui préconisent une valeur cible (cf. Figure 14).

Nous constatons alors clairement une distinction entre les églises avec un accent plus sur la parole, dont la réverbération souhaitable est relativement faible (entre 0.8 et 1.7 s)²³, des églises mettant plus d'importance sur la liturgie et la musique, dont la réverbération souhaitable est plus élevée (entre 1.8 et 2.8 s). La largeur moyenne de la plage admissible est de 0.7 s (valeur de 0.2 à 1.7 s) pour le volume considéré. En excluant les extrêmes, les auteurs donnent des valeurs souhaitables relativement consistantes entre elles. **La plage acceptable de temps de réverbération souhaitable pour une église de 4645 m³ étant de 1.2 à 2.2 secondes.**

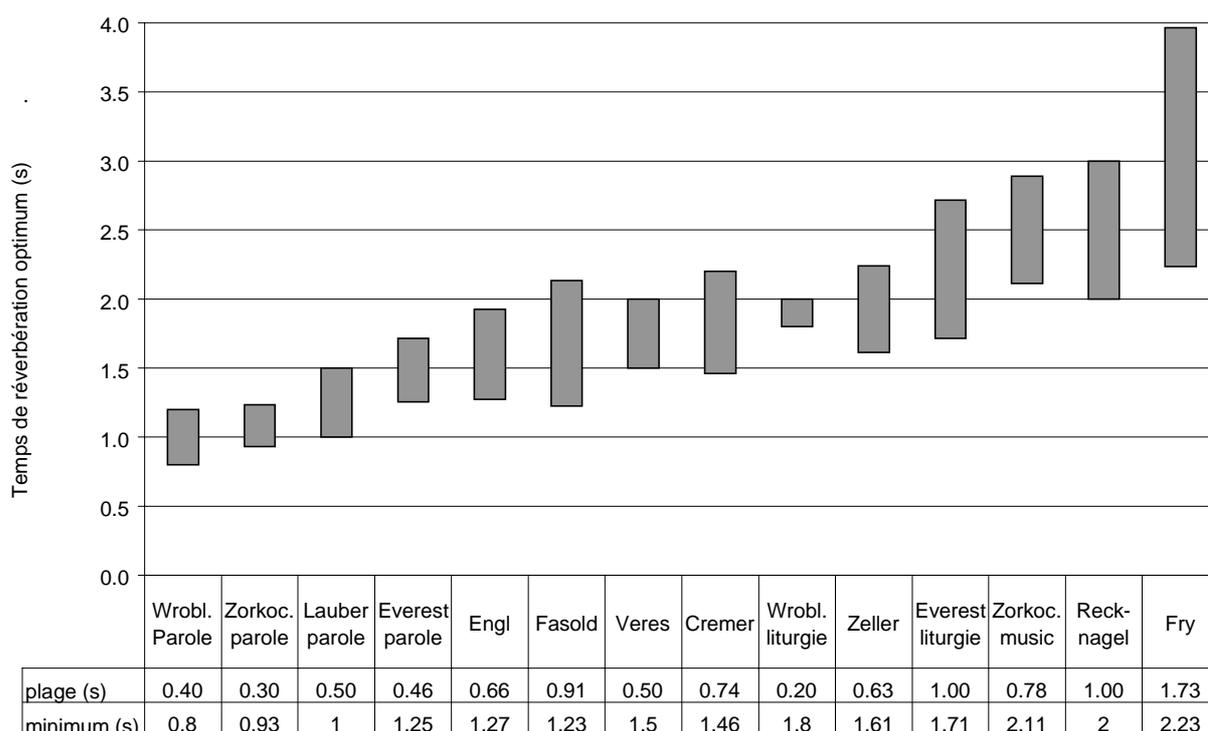


Figure 13 Plage souhaitable du temps de réverbération pour un volume de 4645 m³

²³ Du fait que ces valeurs sont rarement atteintes dans les églises en Suisse, on peut se demander avec Boespflug [61], si « l'idée que la communication du salut se fait essentiellement par la parole de la prédication a jamais commandé l'architecture religieuse ».

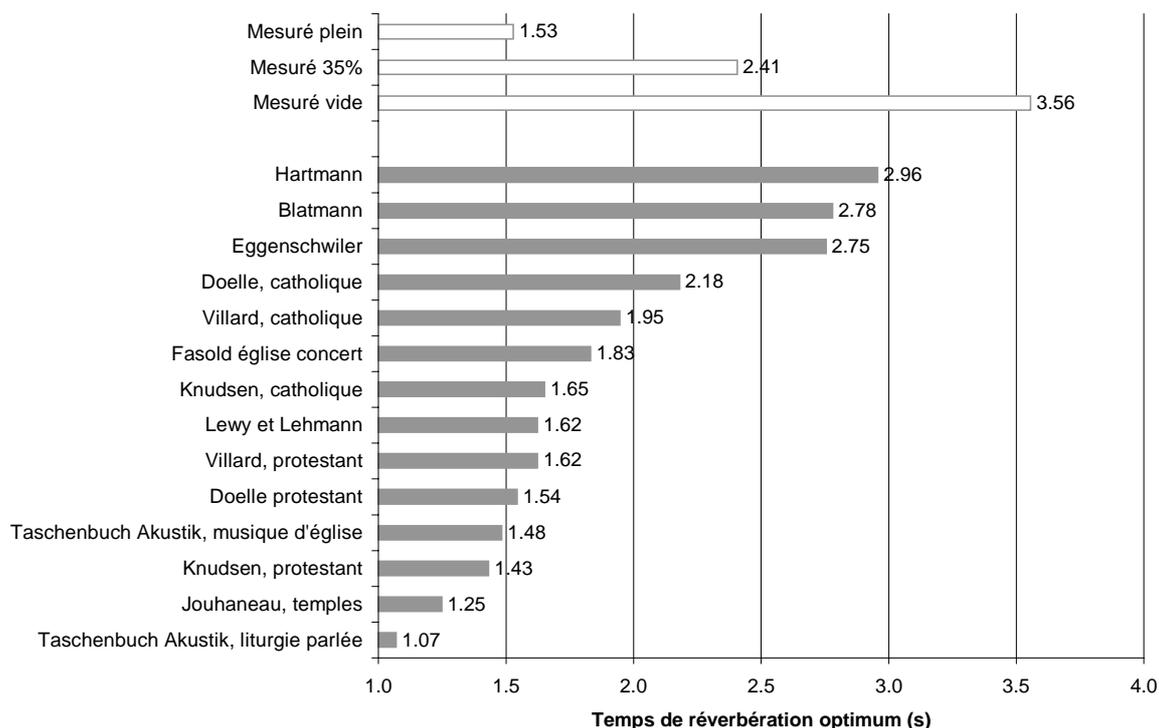


Figure 14 Valeurs souhaitables et mesurées du temps de réverbération pour un volume de 4645 m^3

En ce qui concerne les valeurs cibles, nous constatons également une distinction des églises suivant la confession, les temples protestants ayant une réverbération souhaitable plus faible (entre 1.07 et 1.62 s) que les églises catholiques (entre 1.65 et 2.18 s). Remarquons que les trois auteurs (Hartmann, Blatmann et Eggenschwiler) qui proposent des valeurs cibles notablement plus hautes considèrent explicitement ou implicitement des églises vides ou avec un faible taux d'occupation. Les valeurs moyennes de nos mesurages adaptés à des églises pleines (1.53 s) correspondent bien à une valeur cible moyenne des églises catholiques et protestantes. Si l'on considère l'occupation moyenne effective (35 %), la valeur moyenne du temps de réverbération des églises suisses (2.41 s) apparaît comme trop élevée pour la plupart des auteurs. La valeur moyenne du temps de réverbération mesuré dans les églises vides (3.56 s) est enfin plus élevée que les recommandations des trois auteurs qui considèrent cette situation.

6.5.2 Enquête

6.5.2.1 Introduction

De nombreux ouvrages traitant de l'acoustique des salles proposent des valeurs optimales pour le temps de réverbération des églises mais nous avons vu que ces valeurs varient très largement selon les auteurs. 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. jugées bonnes subjectivement par les utilisateurs), nous avons tenté de corrélérer, 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 T_r dans la suite du texte) mesurées dans celles-ci.

6.5.2.2 Appréciation de la résonance

Nous avons tout d'abord interrogé les paroissiens sur leur perception subjective de la "résonance" de l'église, qui est bien corrélée avec le temps de réverbération mesuré (cf. Tableau 6) et plus particulièrement avec les 3 bandes d'octaves autour de 1000 Hz (soit 500 à 2000 Hz). Cette remarque illustre la pertinence du choix, fait par la plupart des auteurs, de considérer les valeurs de temps de réverbération autour de 1000 Hz (typiquement 500 + 1000 Hz) comme représentative de la réverbération.

Tableau 6 Coefficient de corrélation linéaire (r) entre l'appréciation subjective de la résonance (réverbération) et le temps de réverbération mesuré

Fréquence (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	500+1000
r Vide	0.46	0.52	0.55	0.60	0.54	0.47	0.58
r Occupé (35%)	0.43	0.48	0.48	0.49	0.45	0.43	0.48

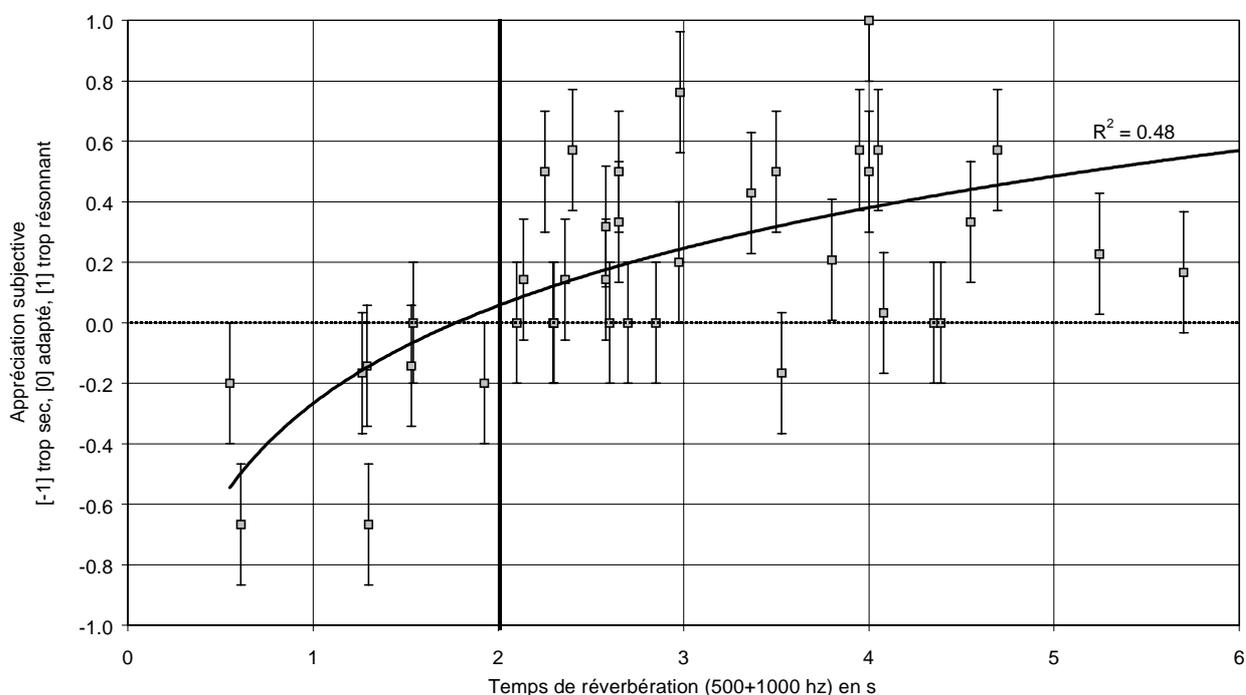


Figure 15 Résonance subjective en fonction du temps de réverbération (église vide). Les barres d'erreurs (ici pour plus de 6 réponses par église) correspondent à un intervalle de confiance de 68%

L'analyse détaillée de l'appréciation subjective de la résonance (cf Figure 15) met en évidence que **les églises sont jugées trop réverbérantes dès 1.8 s** et que les églises sont rarement jugées trop sèches. L'appréciation subjective de la résonance n'est cependant que moyennement reliée au temps de réverbération mesuré ($R^2=0.48$).

6.5.2.3 Temps de réverbération et satisfaction

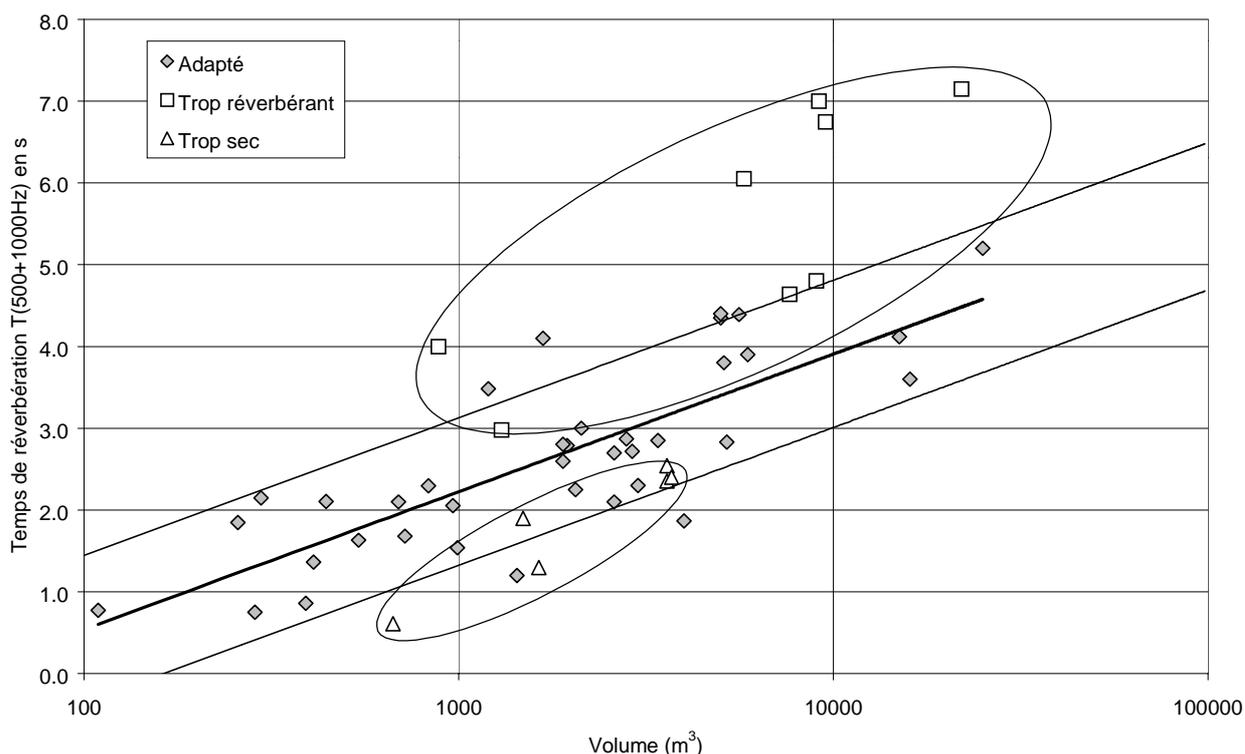


Figure 16 Appréciation subjective du temps de réverbération (vide) en fonction du volume

L'évolution de la zone considérée comme "bonne" (cf. Figure 16) suit les équations logarithmiques suivantes:

$$\text{Tr}(500+1000)_{\text{opt, vide}} = 0.73 \ln(V) - 2.82, R^2 = 0.65 \quad (1a)$$

$$\text{Tr}(500+1000)_{\text{opt, plein}} = 0.44 \ln(V) - 2.03, R^2 = 0.62 \quad (1b)$$

Si l'on considère une relation en puissance du volume, on a les équations suivantes :

$$\text{Tr}(500+1000)_{\text{opt, vide}} = 0.23 V^{0.31}, R^2 = 0.64 \quad (2a)$$

$$\text{Tr}(500+1000)_{\text{opt, plein}} = 0.07 V^{0.36}, R^2 = 0.71 \quad (2b)$$

L'expression du Tr souhaitable selon une fonction en puissance du volume [55] permet d'augmenter sensiblement le coefficient de détermination (R^2) dans les églises pleines mais entraîne une légère baisse pour les églises vides. 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 quelques églises jugées trop sèches ou trop réverbérantes.

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

Tableau 7 Temps de réverbération optimum en fonction de V

Volume (m ³)	Tr vide selon formule (1a)	Tr vide selon Hartmann [55]	Tr plein selon formule (1b)	Tr plein selon Zeller [57]
1'000	2.2 ± 0.8	1.5 ± 0.2	1.0 ± 0.4	1.3 ± 0.3
5'000	3.4 ± 0.8	3.1 ± 0.5	1.7 ± 0.8	1.7 ± 0.5
10'000	3.9 ± 0.8	4.2 ± 0.6	2.0 ± 0.8	1.9 ± 0.6

La comparaison de nos résultats avec diverses études similaires (cf. Tableau 7) montre que Hartmann (étude sur 16 églises vides [55]) préconise, pour les églises vides, un Tr plus faible que notre étude pour de petits et moyens volumes mais plus grand pour de grands volumes. Nos résultats pour les églises pleines correspondent bien à ceux de Zeller [57] qui donne cependant des valeurs de Tr légèrement plus élevées pour des petits volumes.

Pour mieux comprendre l'appréciation subjective globale de la « résonance » d'une église, il faut effectuer une distinction selon les différentes utilisations.

6.5.2.4 Distinction selon l'utilisation

Les quatre types de sources sonores actuellement les plus utilisées dans les églises en Suisse sont (cf. §2.4) :

- la parole (lecture, prédication, prières et liturgie);
- l'orgue (prélude, interlude, postlude et 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. Figure 17) que l'adéquation de l'acoustique pour la parole décroît lorsque le temps de réverbération augmente. On constate cependant 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 et bruit de fond) influencent l'intelligibilité de la parole.

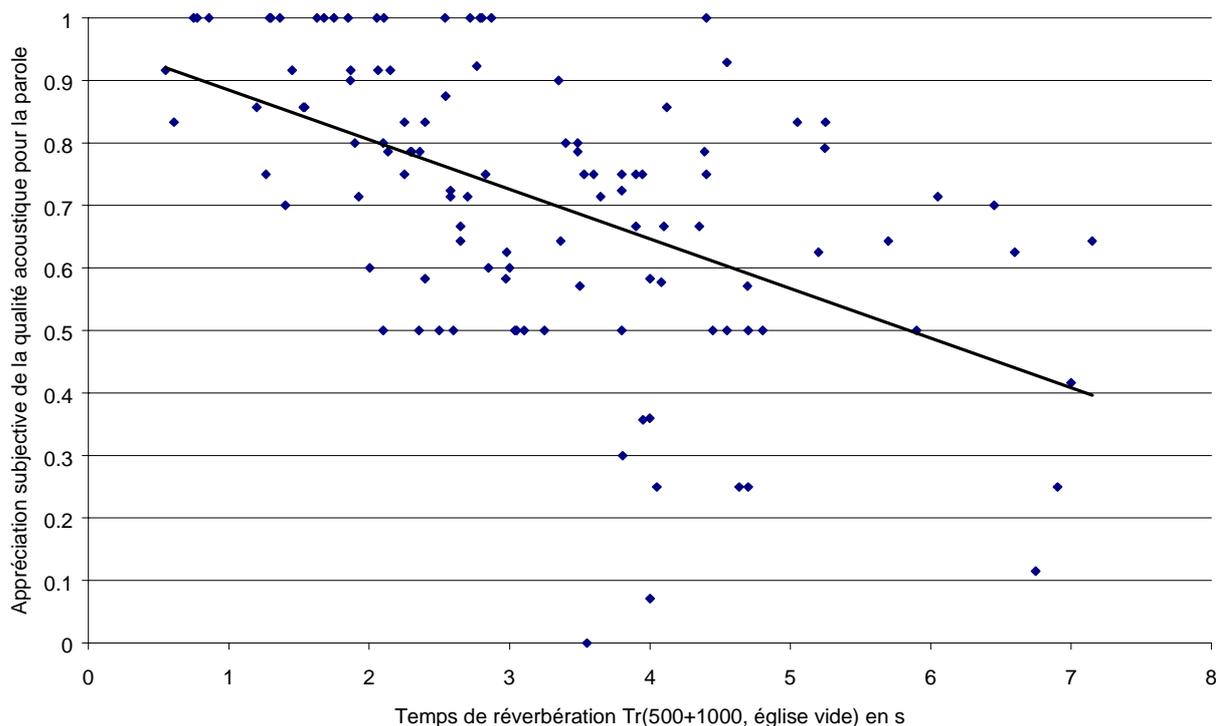


Figure 17 *Appréciation subjective de la qualité acoustique pour la parole (0 =mauvais, 1=bon) en fonction du temps de réverbération moyen (église vide)*

Ainsi lorsque l'on tient compte du volume, la distinction entre églises satisfaisantes et insatisfaisantes pour la parole devient plus claire (cf. Figure 18). **Une acoustique est toujours jugée satisfaisante pour la parole lorsque le temps de réverbération (église vide) est inférieur à 2.1 s et que le volume est inférieur à 2000 m³.** Si l'une de ces conditions n'est pas respectée l'acoustique peut se révéler insatisfaisante pour la parole. Les conditions acoustiques sont ainsi généralement jugées insatisfaisantes pour la parole dans les moyennes ou grandes églises ($V > 3000 \text{ m}^3$) réverbérantes ($Tr > 3 \text{ s}$).

Le temps de réverbération des églises (vides) satisfaisantes pour la parole suivent la l'équation logarithmique suivante (cf. Figure 18):

$$\text{Tr}(500+1000)_{\text{opt. parole, vide}} = 0.64 \ln(V) - 2.34 \quad \text{avec } R^2 = 0.68 \quad (3a)$$

$$\text{Tr}(500+1000)_{\text{opt. parole, plein}} = 0.38 \ln(V) - 1.69 \quad \text{avec } R^2 = 0.62 \quad (3b)$$

Une comparaison numérique (cf. Tableau 8) montre que les valeurs optimales pour la parole sont légèrement inférieures à celles trouvées pour l'appréciation générale de la résonance.

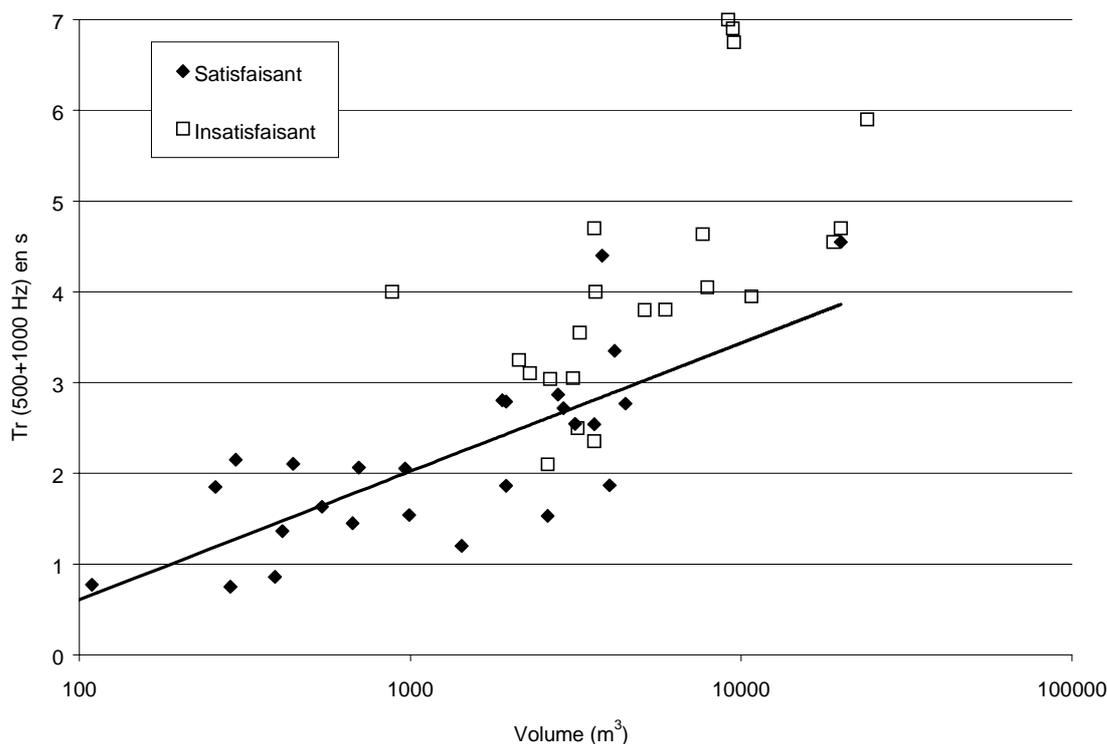


Figure 18 Adéquation du temps de réverbération (église vide) par rapport à la parole en fonction du volume - Ligne de régression faite seulement avec les églises "satisfaisantes"

Tableau 8 Tr optimal (église vide) en fonction du volume

Volume (m ³)	Tr_{opt} Parole (s) selon (3a)	Tr_{opt} Résonance (s) selon (1a)
1000	2.1	2.2
5000	3.1	3.4
10000	3.5	3.9

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 catholiques depuis le concile Vatican II), nous pouvons conclure qu'il faut disposer d'une église de faible dimension (<2000 m³) dont le Tr se situe en dessous de 2.1 s.

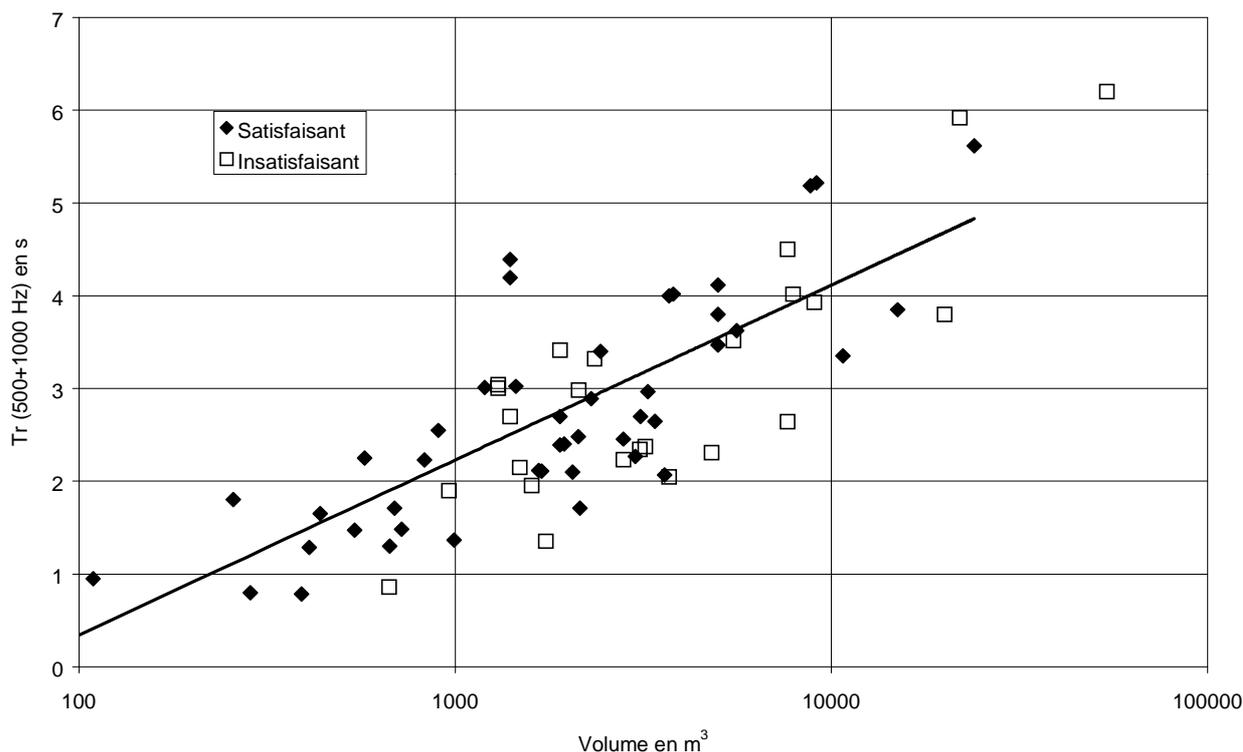


Figure 19 Adéquation du temps de réverbération (église vide) par rapport au chant en fonction du volume - Ligne de régression faite seulement avec les églises "satisfaisantes"

Il est par contre plus difficile de tirer des conclusions lorsque l'on veut favoriser le chant (par exemple pour une liturgie chantée), car les églises jugées satisfaisantes ne peuvent être isolées de celles jugées insatisfaisantes pour le chant (cf. Figure 19). On remarquera cependant que **les petites églises ($V < 1000 \text{ m}^3$) sont généralement satisfaisantes pour le chant**. Comme pour le chant, on ne peut dissocier clairement les églises satisfaisantes des églises insatisfaisantes pour la musique d'orgue et les concerts.

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.

6.5.2.5 Corrélations

Cette analyse confirme (cf. Tableau 9) **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.

Tableau 9 Corrélation (r) entre appréciation spécifique et générale

Appréciation subjective spécifique pour	Corrélation (r) avec l'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:

$$S_{\text{général combiné}} = 1.113 \times S_{\text{parole}} + 0.301 \times S_{\text{chant}} + 0.480 \times S_{\text{orgue}} + 0.122 \times S_{\text{concert}} - 0.813$$

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

6.5.2.6 Synthèse de l'enquête

Notre étude a montré que l'appréciation subjective de la résonance d'une église et de sa qualité acoustique en général dépendait essentiellement de son adéquation pour la parole. L'adéquation aux autres utilisations comme le chant, les concerts ou la musique d'orgue a une influence plus secondaire sur l'appréciation générale. Il semble donc que l'intelligibilité de la parole est devenue la préoccupation prioritaire des fidèles conformément à l'évolution de la liturgie (en langue vernaculaire avec une importance particulière donnée à l'homélie).

Cette étude nous a amenés à déterminer en fonction du volume des valeurs de temps de réverbération souhaitable dans les églises actuelles afin que l'acoustique soit considérée comme bonne par une majorité d'utilisateurs. Les valeurs calculées représentent un compromis moyen entre une intelligibilité satisfaisante de la parole et une ambiance musicale suffisante qui permet de rester en accord avec une architecture et ambiance " sacrée". 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.

6.6 Autres paramètres acoustiques

6.6.1 Bruit de fond

6.6.1.1 Introduction

Selon une récente enquête en Suisse [62], les églises ne représentent des lieux de silence que pour 13.3% des personnes, qui le trouvent davantage dans la nature (71.3%) ou chez eux (62.9%). Le bruit de fond, par son intensité et son contenu, peut favoriser ou perturber le déroulement d'une célébration. Le silence, qui peut être défini par un bruit de fond quasiment inaudible, favorisera la méditation, la contemplation²⁴ mais également l'attention lors de l'écoute de parole ou de musique. Avec le silence, l'église s'isole de son milieu et conduit donc le fidèle et l'assemblée à l'intériorité. Au contraire un léger bruit de fond contribue à une communion et une ouverture vers l'extérieur (de soi, de l'assemblée, de l'église), ce qui est également fondamental dans la foi chrétienne. Le bruit de fond, s'il reste modeste, nous rappelle au monde. Contrairement à Reymond [63], je ne pense donc pas que les églises soient assimilables à des salles de concert et que « l'existence d'édifice isolant du bruit extérieur est devenue une nécessité pour ceux et celles qui, dans les villes veulent participer à un culte » et qu'il faille absolument "éviter que l'assemblée des fidèles ne soit perturbée par les nuisances extérieures». L'isolation doit en effet se limiter à préserver les conditions d'écoute, sans pour autant isoler le lieu de culte du monde qui l'entoure et des bruits qui le manifestent. En effet, le culte doit rester incarné et attaché au monde dans lequel il est vécu. Il ne faut donc pas "vouloir protéger à tout prix le lieu cultuel du bruit et de la banalité de l'existence quotidienne (...) et de laisser sous-entendre que nous puissions selon nos préférences, nous placer hors de notre hic et nunc" [63]. Le bruit qui filtre de l'extérieur de l'église est nécessaire à rappeler aux participants du culte leur enracinement à la vie du dehors et leur permet de rester en communion avec elle. En isolant trop les églises de la vie extérieure, on risque de faire de celles-ci des havres de paix et de tranquillité, des lieux repliés sur eux-mêmes et détachés du monde. Le problème du bruit de fond lié à la perte d'intelligibilité apparaît donc comme un faux problème lorsque les orateurs du culte parlent à haute et intelligible voix.

6.6.1.2 Bruit extérieur

Le niveau acceptable du bruit de fond en provenance de l'extérieur dépend d'une part de l'utilisation de l'église (chapelle, célébration, concert) et d'autre part du type de bruit. A niveau égal, un bruit d'origine naturelle (cloches de vache, fontaine, etc.) est mieux accepté qu'un bruit issu de l'activité (cri, musique, etc.) et surtout des transports humains (route, trains, avions, etc.). Les caractéristiques physiques du bruit (en particulier son impulsivité et ses composantes tonales) sont déterminant également pour son acceptabilité.

²⁴ Selon une récente enquête de Lorenz [62], les suisses associent notamment au mot silence les notions de recueillement (ou paix intérieure, 16.7% des réponses), la méditation (12.4%) ou même d'expérience religieuse (7.1%).

Une note pastorale de la conférence des évêques italiens sur la construction de nouvelles églises [64] mentionne ainsi qu'il faut éviter de construire une nouvelle église dans une zone fortement exposée à des nuisances acoustiques. En présence de bruit persistant, il faut étudier la nécessité d'une isolation acoustique avec l'extérieur (double porte, double vitrages, etc.). Les valeurs limites du bruit de fond acceptable concernent surtout les installations techniques intérieures ou le bruit de fond globalement acceptable à l'intérieur d'une église, quel qu'en soit l'origine (intérieur, extérieur ou dû à l'assemblée elle-même).

6.6.1.3 Bruit intérieur

De tout temps on a tenté de limiter les bruits parasites dans les églises, qu'ils viennent des installations techniques (chauffage, ventilation, soufflerie ou humidificateur d'orgue) ou des fidèles eux-mêmes²⁵. Le niveau de bruit de fond acceptable dans une église dépend de nombreux paramètres. Selon Lawrence [66], le niveau maximum acceptable dans une grande église (avec une installation de sonorisation), est de 35 dB(A) (ou un Noise Criteria de NC-30) alors que dans une petite église (sans installation de sonorisation), il est préférable d'avoir un bruit de fond inférieur à 30 voir 25 dB(A) (NC-25 voir 20). Tan [34] propose une limite intermédiaire, mais uniquement pour le bruit des installations techniques, de NC-25 à NC-30. De Buglio [35], qui tient compte également du bruit de fond de l'assemblée préconise de ne pas dépasser NC-45 pour permettre d'obtenir un rapport signal/bruit d'au moins 25 dB.

En effectuant une synthèse des recommandations de divers auteurs (cf. Tableau 10), on peut accepter, comme **limite supérieure du bruit de fond** dans les églises la valeur de **35 dB(A)**.

Tableau 10 Valeurs limites du bruit de fond dans les églises

Auteur	Critère	Limite (critère)	Limite dB(A)	Remarque
Crocker [67]	NC/PNC	20-25	25-30	
Lawrence [66]	NC	25-30	30-35	Petites églises
Lawrence [66]	NC	30	35	Grandes églises
Fry [68]	NC/NR	25-30	30-35	
Tan [34]	NC	25-30	30-35	Installations techniques
ASRHAÉ [69]	NC	30	35	
Recknagel [38]	dB(A)		35	
De Buglio [35]	NC	45	50	Avec public

6.6.1.4 Appréciation subjective

Les résultats de l'enquête (cf. Tableau 11) montrent que les paroissiens sont en général peu gênés par le bruit de fond, en particulier lorsque celui-ci vient d'une installation technique intérieure²⁶ (ventilation chauffage, humidification, etc.) ou de

²⁵ "Les constitutions de l'Eglise de Genève, en date du mois de septembre 1483, décrètent-elles des peines contre ceux qui, pour officier, se chaussent de soques et font ainsi du bruit en marchant et contre ceux qui causent tout haut ou à l'oreille de leurs voisins" [65].

²⁶ Notons que, dans la plupart des cas, les installations techniques bruyantes sont coupées durant les célébrations ou les concerts.

l'assemblée. Dans ces cas, l'écart entre les appréciations moyennes pour les différentes églises est pratiquement égal à la différence d'appréciation subjective entre les fidèles d'une même paroisse. Le bruit de fond issu de l'extérieur, sur lequel les fidèles n'ont généralement que peu de possibilité d'action, est ressenti comme légèrement plus gênant, mais il reste cependant considéré comme acceptable dans la plupart des cas (moyenne de 0.71 sur une échelle de 0=gênant à 1=pas gênant). L'écart type entre les appréciations moyennes pour les différentes églises est plus élevé pour le bruit de fond extérieur que pour les bruits de fond intérieurs. Ceci s'explique en partie par la grande diversité d'exposition sonore des églises, en particulier en fonction de leur implantation en zone urbaine ou rurale (cf. §3.2.5).

Tableau 11 Appréciation subjective du bruit de fond (0=gênant; 1=pas gênant)

Type de bruit de fond	Moyenne	Ecart type (variation entre églises)	Ecart réponses (variation dans chaque église)
Extérieur	0.71	0.35	0.24
Intérieur	0.88	0.21	0.17
Assemblée	0.85	0.24	0.19

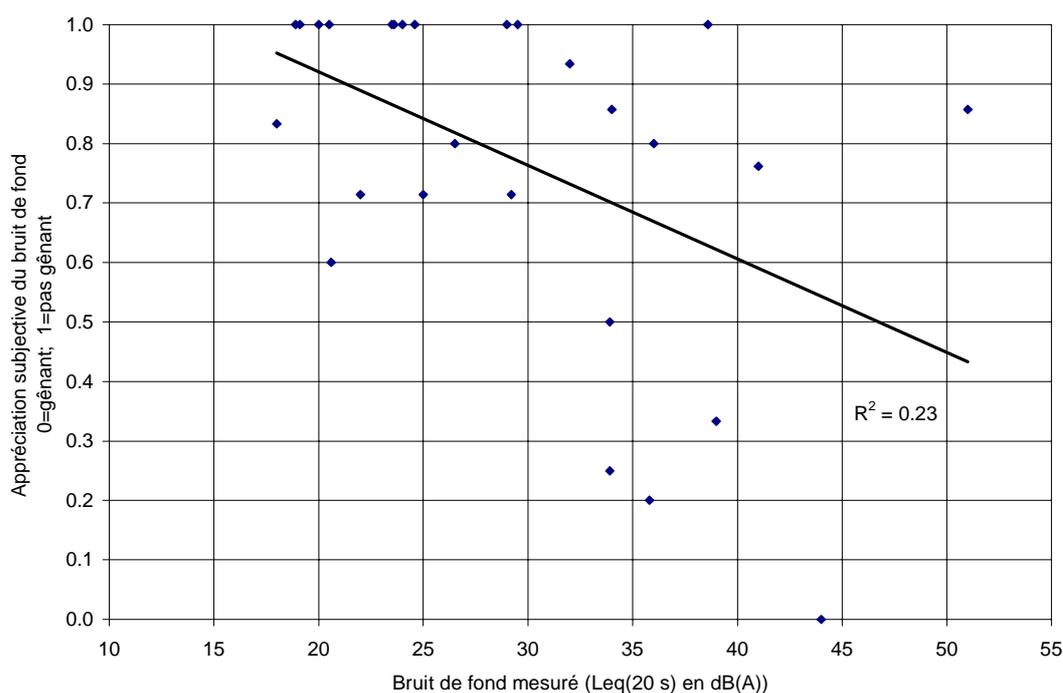


Figure 20 Relation entre l'appréciation subjective et valeur mesurée du bruit de fond

On constate (cf. Figure 20) que l'appréciation subjective du bruit de fond extérieur est moyennement corrélée avec la valeur mesurée de celui-ci (le coefficient de détermination n'est que de 0.23). En dessous de 34 dB(A) le bruit de fond est toujours considéré comme peu gênant. D'après la courbe de régression, le seuil de gêne (0.5 sur une échelle de 0 à 1) est atteint pour 47 dB(A).

6.6.2 *Intelligibilité*

6.6.2.1 Introduction

Rare sont les auteurs qui fixent des valeurs limites d'intelligibilité de la parole dans les églises alors que nous avons maintes fois vu lors de cette étude que cette exigence est essentielle dans les célébrations. Les récentes recommandations de la Société Suisse d'Acoustique pour les installations de sonorisation de la parole [10] fixent une limite pour intelligibilité minimale de $STI=0.45$ dans les églises qui semble nettement plus réaliste que la valeur de 0.75 préconisée par Wroblewska [50]. De Buglio [35] préconise quant à lui d'obtenir une intelligibilité de $92 \pm 2\%$ en toute place de l'assemblée.

Rappelons que l'intelligibilité de la parole dépend, en ce qui concerne le milieu de propagation, principalement de deux paramètres, à savoir l'émergence du signal (la parole) sur le bruit de fond et le temps de réverbération.

6.6.2.2 Effet du bruit de fond

Les résultats des mesurages de bruit de fond dans les églises donnent des valeurs de 36 dB(A) en milieu urbain et de 23 dB(A) en milieu rural. Sachant que la voix d'un prédicateur dans une église de taille moyenne (inférieure à 3000 m³) est supérieure à 55 dB(A), l'émergence sur le bruit de fond est donc de plus de 15 dB(A), ce qui permet de ne pas perturber l'intelligibilité même en milieu urbain. Or, l'augmentation de participation plus active des laïcs conduit de nombreuses personnes, dont la voix n'est généralement pas bien posée, à prendre la parole au culte, qui pour une lecture, qui pour une prière ou pour des annonces. Le faible volume sonore de ces orateurs occasionnels repose cependant le problème de l'émergence. Il me semble personnellement plus judicieux de former et de retenir des orateurs intelligibles plutôt que d'inviter chacun à remplir un ministère (car lecteur est pour moi un ministère) pour lequel on n'a pas de charisme et qui rendra indispensable l'utilisation délicate d'une sonorisation. Nous reviendrons plus tard sur les implications de cette participation diversifiée, qui est une chance et une manifestation de la responsabilité partagée du culte par toute l'assemblée, mais qui présente des difficultés du point de vue acoustique.

6.6.2.3 Effet des conditions acoustiques intérieures

En mesurant le niveau sonore aux positions éloignées de l'orateur, on constate cependant que celui-ci émerge suffisamment du bruit de fond. La perte d'intelligibilité à ces positions éloignées vient donc plus de la faible quantité de son venant directement de l'orateur par rapport à la quantité de son indirect réfléchi (réverbéré) qui atteint l'auditeur plus tardivement (après 35 ms). Le facteur principal qui détériore la compréhension de la parole dans les églises serait donc la résonance élevée de celles-ci. L'analyse des valeurs objectives d'intelligibilité (exprimées en STI) avec pour paramètre le temps de réverbération nous a effectivement clairement montré (cf. §3.2.6) que celui-ci est la cause principale de la faible intelligibilité dans les églises. L'analyse du temps de réverbération souhaitable dans les églises nous a par ailleurs montré que seule une acoustique sèche ($Tr < 2$ s) permet une bonne compréhension de la parole.

6.6.2.4 Effet de l'assemblée

La distance séparant l'orateur des fidèles est également très importante du point de vue de la compréhension de la parole. En effet l'intelligibilité dans une église est en général minimale aux positions les plus éloignées de l'orateur. L'analyse statistique des mesurages (cf. §3.2.6) montre d'ailleurs que la valeur minimale de l'intelligibilité est inversement proportionnelle à la surface de l'édifice. C'est pour cela que les premiers chrétiens, qui utilisaient des lieux de culte de petites dimensions, ne devaient pas connaître trop de problèmes d'acoustique. Les difficultés acoustiques viennent souvent de la taille importante des églises. Le volume spécifique d'une église où la compréhension de la parole est importante, ne devrait ainsi pas dépasser 10 m³/personne. La position des fidèles devrait être la plus proche possible de celle de la zone de célébration et de la chaire (cf. §6.6), ce qui nous ramène au modèle du plan centré. La communication, comme la communion, est favorisée par la proximité des intervenants. Par ailleurs, nous avons vu précédemment que le temps de réverbération diminue lorsque l'assemblée augmente. Les mesurages montrent effectivement que l'intelligibilité augmente avec le nombre de participants. Cela illustre encore l'importance de la communauté pour la compréhension de la parole. Même en tant qu'auditeur, chaque fidèle contribue ainsi par sa présence dans l'église à clarifier quelque peu le message adressé à la communauté. Les Réformateurs l'avaient bien expérimenté, en faisant construire des temples où une assemblée nombreuse et compacte pouvait prendre place. L'assemblée contribue à la clarté du message pour autant qu'elle ne soit pas elle-même une source de bruit qui couvre le message. Le "parler en langue" continu, les exclamations ou les commentaires de chaque fidèle dans certaines assemblées créent en effet un tel bruit de fond qu'aucune parole n'en demeure intelligible pour l'ensemble de l'assemblée. Chaque fidèle est alors ramené à lui-même et la piété en devient individualiste au lieu d'être édifiante pour la communauté tout entière.

6.6.2.5 Appréciation subjective

L'analyse des résultats de notre enquête montre que l'appréciation subjective de l'intelligibilité est bien corrélée avec le temps de réverbération mesuré. Nos résultats confirment par ailleurs (cf. Tableau 12) l'importance, relevée par plusieurs auteurs [3; 70], des hautes fréquences (bandes d'octave centrées à 2000 Hz et autour) pour l'intelligibilité.

Tableau 12 Coefficient de corrélation linéaire (*r*) entre l'appréciation subjective de l'intelligibilité (sans sonorisation) et le temps de réverbération mesuré

Fréquences (Hz)	125	250	500	1000	2000	4000	500+1000
r Vide	-0.50	-0.51	-0.50	-0.54	-0.55	-0.53	-0.53
r Occupé (35%)	-0.49	-0.50	-0.50	-0.53	-0.54	-0.52	-0.54

Il est par contre surprenant de constater la faible corrélation entre l'appréciation subjective de l'intelligibilité et les résultats de mesurages objectifs avec l'indice RASTI (cf. Tableau 13). Cette constatation questionne sur la pertinence des mesurages d'intelligibilité avec l'indice RASTI [71], en particulier dans les églises

vides²⁷. Il est également étonnant que les coefficients de corrélation soient plus faibles avec que sans sonorisation alors que la question considérée portait sur l'intelligibilité avec sonorisation. On constate que les valeurs les plus significatives sont les moyennes spatiales des résultats de mesurages. Sans sonorisation, la valeur minimum du RASTI semble également importante alors qu'avec l'utilisation de la sonorisation, la valeur maximale obtenue pour l'intelligibilité est aussi bien corrélée que la moyenne.

Tableau 13 Coefficient de corrélation linéaire (r) entre l'appréciation subjective (avec sonorisation) et la mesure objective de l'intelligibilité

RASTI	minimum	maximum	moyenne
r sans sonorisation	0.39	0.32	0.46
r avec sonorisation	0.15	0.36	0.36

L'analyse des résultats de notre enquête confirme que l'appréciation subjective de l'intelligibilité (sans sonorisation) n'est que moyennement influencée par le bruit de fond extérieur (qui est en général relativement faible). On observe (cf. Figure 21) une légère tendance à une diminution de l'intelligibilité subjective avec l'augmentation du niveau de bruit de fond, mais la corrélation entre ces deux paramètres est très faible. La corrélation entre intelligibilité subjective et bruit de fond est de $r=-0.38$ avec sonorisation et -0.22 sans sonorisation. Notons qu'avec une installation de sonorisation le bruit de fond est toujours considéré comme acceptable (la valeur d'intelligibilité subjective est supérieure ou égale à 0.5 sur une échelle de 0=mauvaise à 1=bonne). Cette analyse donne une valeur de 32 dB(A) comme seuil acceptable (valeur d'intelligibilité subjective de 0.5) pour le bruit de fond sans sonorisation et de plus de 50 dB(A) avec sonorisation. Le fait que l'intelligibilité subjective soit très mauvaise dans certaines églises avec un faible bruit de fond montre l'influence d'autres paramètres.

²⁷ Il serait intéressant d'étudier si le calcul des valeurs d'intelligibilité en présence du public selon la méthodologie proposée au chapitre 5 permet une amélioration des corrélations entre appréciations subjectives et mesures objectives de l'intelligibilité.

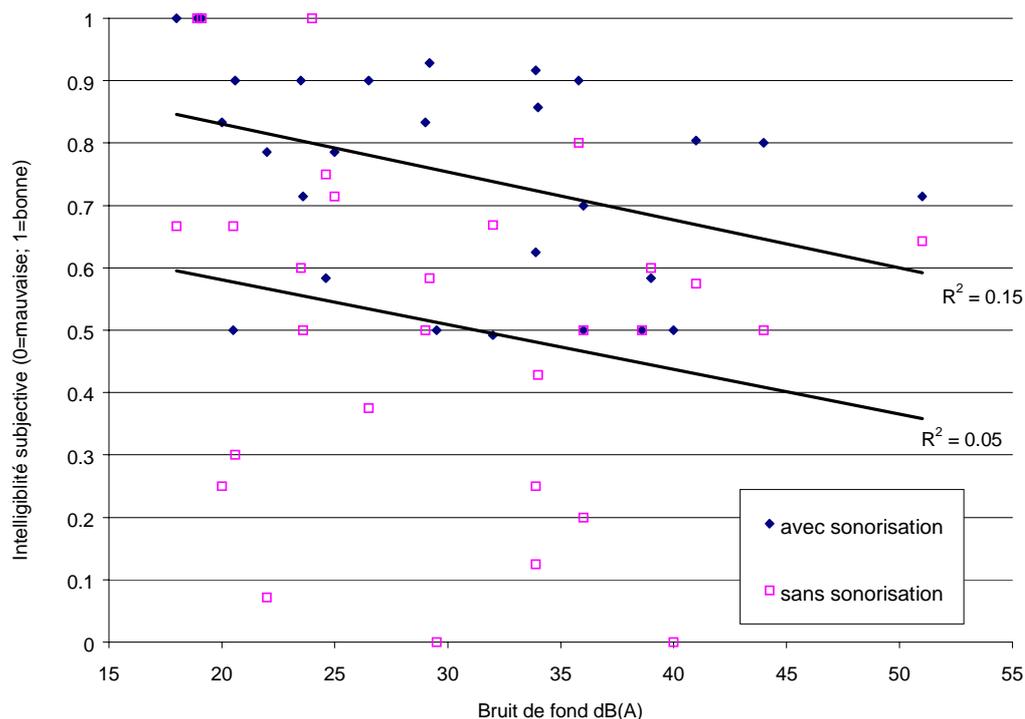


Figure 21 Appréciation subjective de l'intelligibilité (sans sonorisation) en fonction du bruit de fond mesuré

L'appréciation subjective de l'intelligibilité est nettement mieux corrélée avec le temps de réverbération (cf. Figure 22), ce qui confirme que ce paramètre est essentiel dans l'évaluation acoustique des églises. **L'intelligibilité est généralement suffisante lorsque le temps de réverbération (dans une église vide) est inférieur à 1.8 s.** L'intelligibilité peut être considérée comme **acceptable** (seuil de 0.5 sur une échelle de 0=mauvaise à 1=bonne) **lorsque le temps de réverbération est inférieur à 2.5 s.** Ces valeurs confirment celles obtenues pour l'évaluation du temps de réverbération souhaitable dans les églises.

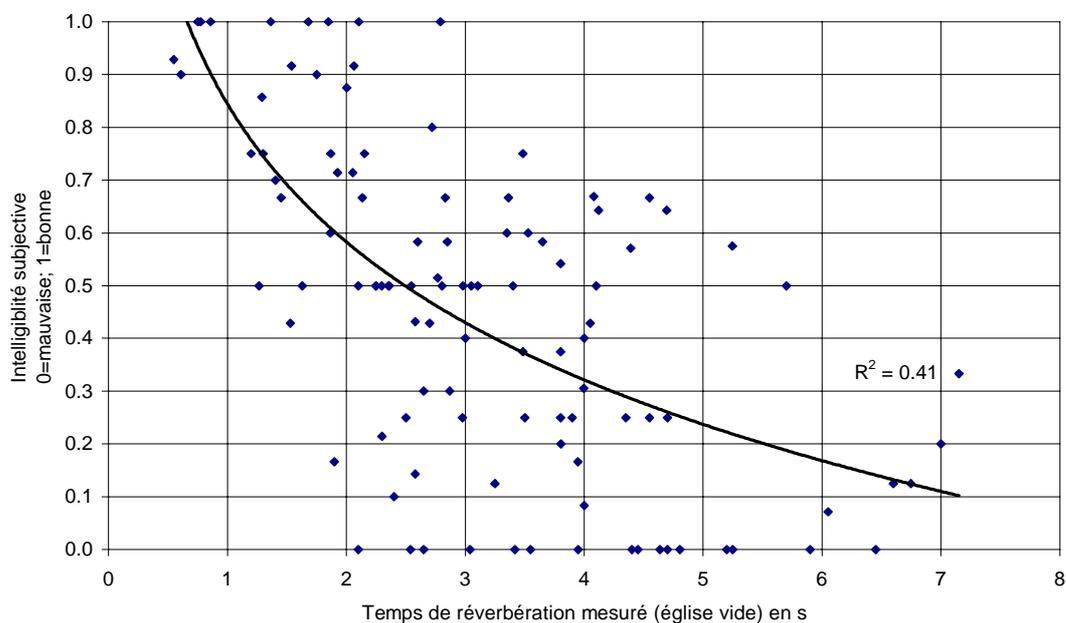


Figure 22 *Appréciation subjective de l'intelligibilité (sans sonorisation) en fonction du temps de réverbération mesuré*

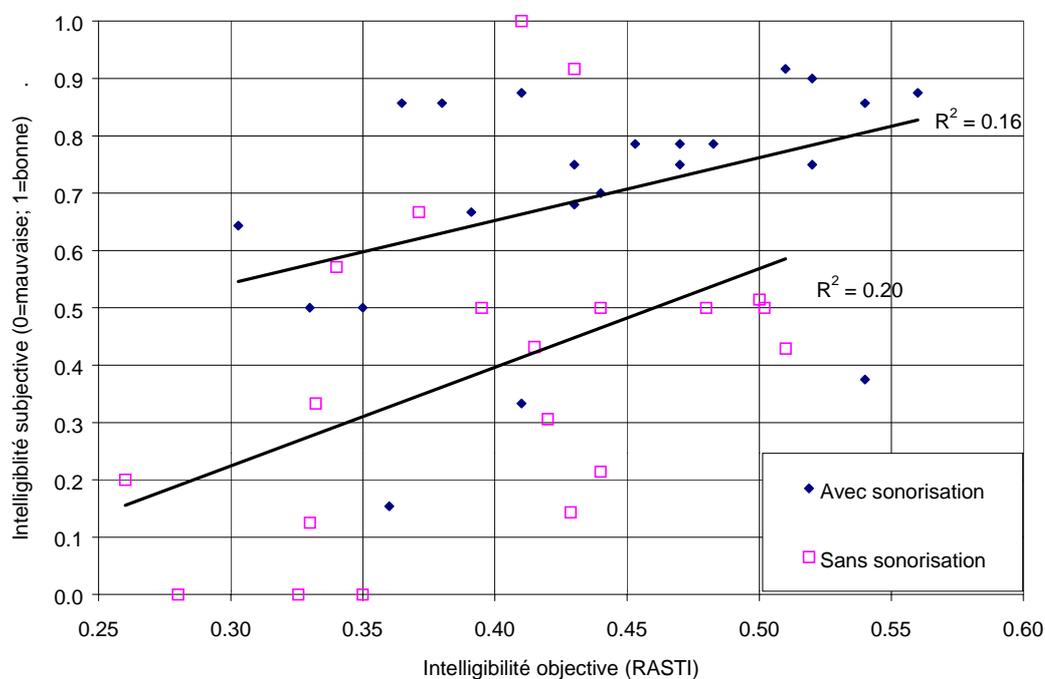


Figure 23 *Relation entre appréciation subjective et mesure objective (RASTI) de l'intelligibilité*

Le coefficient de détermination entre l'appréciation subjective et la mesure objective (valeur moyenne de l'indice RASTI) de l'intelligibilité est étonnamment faible (R^2 de 0.16 à 0.20, cf. Figure 23). Ceci peut s'expliquer, d'une part, par la méthodologie de mesurage (moyenne spatiale des positions d'évaluation dans les églises vides) et d'autre part, par l'imprécision des réponses données au questionnaire (l'écart type de l'appréciation subjective de l'intelligibilité entre les fidèles d'une même église est de l'ordre de 0.25 sur une échelle de 0 à 1). Remarquons cependant que l'utilisation d'une installation de sonorisation permet d'accroître sensiblement l'intelligibilité subjective (cf. Figure 23).

6.6.3 Sonorisation

6.6.3.1 Objectifs d'une sonorisation

Une installation de sonorisation devrait permettre d'augmenter la puissance sonore d'un orateur²⁸, de compenser (et non corriger) partiellement les défauts d'une mauvaise acoustique (généralement une réverbération trop élevée) et de parler en diverses positions de l'église en conservant une même qualité d'intelligibilité. L'amplification de la parole permet aussi à celle-ci de renoncer au ton déclamatoire, posé et solennel des pasteurs de jadis, et d'adopter une couleur plus intimiste, personnelle, qui rend ainsi le prédicateur plus proche de ses fidèles. Une installation de sonorisation permet généralement, en plus des possibilités d'amplification en direct, de diffuser de la musique préenregistrée ou d'enregistrer tout ou partie du déroulement d'une célébration.

Contrairement à une pensée très répandue, la qualité d'une installation ne dépend pas de sa puissance mais bien plutôt du choix et du positionnement des haut-parleurs qui doivent, idéalement, transmettre le message avec clarté et si possible naturel. Le premier objectif d'une installation de sonorisation pour la parole est donc d'obtenir en toutes places une bonne intelligibilité de la parole même dans les cas de faible occupation. Dans la mesure du possible il est également souhaitable d'avoir en plus une bonne localisation de la source et un timbre assez naturel.

6.6.3.2 Exigences et choix d'installation

Ces objectifs peuvent se traduire sous la forme des exigences suivantes, qui ont été adoptées par la Société Suisse d'Acoustique²⁹:

1. Intelligibilité : $STI \geq 0.45$ pour plus de 80% des places.
2. Répartition des niveaux sonores : Ecart maximum de ± 3 dB(A) entre les places.

²⁸ Cela peut être nécessaire lorsque l'orateur a une voix peu entraînée (par exemple enfant) ou que la distance source-orateur est trop grande ou encore que le bruit de fond est trop élevé.

²⁹ L'auteur a fait parti de la commission spécialisée "Sonorisation", mandatée par la Société Suisse d'Acoustique, pour établir des recommandations suisses sur les installations de sonorisation pour la parole. Les travaux de cette commission ont débouché sur la publication d'un guide de 100 pages en allemand [36] qui fut traduit en français [10].

3. Timbre correct³⁰ : ± 2 dB entre 200 et 2000 Hz, avec une baisse de 6 dB/octave en dessous de 200 Hz (une baisse de 3 dB/octave est tolérée en dessus de 2000 Hz).

Il existe diverses possibilités d'installation de sonorisation permettant de satisfaire ces exigences. Chaque église est un cas particulier avec des besoins et contraintes spécifiques, notamment architecturales, qui demandent une conception particulière. Nous ne détaillerons pas ici les divers types de sonorisation adaptés aux églises, ni leurs éléments constitutifs ou leurs conditions d'installation qui ont fait l'objet d'une étude et d'une publication détaillée sur le sujet [10].

On peut cependant mentionner le rôle essentiel des haut-parleurs qui doivent diffuser le son de façon très sélective sur l'assemblée et donc présenter généralement un coefficient de directivité élevé. Les haut-parleurs les plus efficaces dans ce domaine, sont les colonnes sonores à commande électronique ou les haut-parleurs à pavillon (utilisés dans les systèmes de sonorisation centrale en cluster).

6.6.3.3 Effet pervers de la sonorisation

Une installation de sonorisation est un soutien surtout pour les personnes malentendantes qui ne pourraient plus participer au culte sans cette aide. Peut-être que la prolifération des installations de sonorisation dans les églises est une des expressions du vieillissement de la population des fidèles au culte. Malheureusement les personnes âgées, souvent malentendantes, qui ont le plus besoin d'un soutien technique pour comprendre ce qui se dit au culte, utilisent rarement la combinaison particulièrement efficace de leurs prothèses auditives avec les boucles magnétiques installées dans la plupart des églises³¹.

Comme il était descendu de la chaire pour s'approcher de l'assemblée, le pasteur peut maintenant, grâce à la sonorisation, abaisser le ton de sa voix pour utiliser celui plus naturel des membres de la communauté. Je ne pense personnellement pas que ce type d'effort des pasteurs pour s'approcher de leur communauté renforce particulièrement la communion et soit source d'édification. Ce genre de démarche, qui est souvent sincère de la part de ceux qui l'entreprennent, tient cependant un peu du mimétisme. Elle conduit plutôt à un pseudo-rapprochement qui entraîne plus une perte d'identité qu'une véritable rencontre.

Comme nous l'avons vu, la majorité des églises recensées disposent de système d'amplification avec des haut-parleurs distribués dans l'espace. Cette configuration, qui permet une bonne intelligibilité lorsqu'on est proche des haut-parleurs conduit inévitablement l'assemblée (ou du moins ceux qui croient avoir besoin de la sonorisation pour comprendre le culte) à se disperser pour se concentrer sur les zones "arrosées" par les haut-parleurs. Cet éparpillement, engendré insidieusement par la sonorisation, est tout à fait contraire à l'esprit fraternel et rassembleur d'un

³⁰ Dans des situations particulièrement difficiles où l'intelligibilité doit être favorisée au détriment du timbre, on peut avoir un spectre qui augmente sensiblement autour de 2000 Hz.

³¹ On peut déplorer que l'existence de telles installations soient rarement rappelée par la présence d'un sigle spécifique sur la porte d'entrée ou même sur les bancs qui présentent la meilleure zone de réception.

culte chrétien, et il nuit profondément au chant communautaire³². Rares sont les installations qui, grâce à un système de diffusion central³³ situé à proximité de l'orateur, rassemblent la communauté tout en préservant la perception de la direction de la source sonore.

La sonorisation induit insidieusement d'autres conséquences au niveau de la liturgie. Elle est essentiellement un intermédiaire entre les intervenants. Destinée à servir la communication entre les humains, elle s'immisce entre eux et crée une distance préjudiciable à cette même communication. Les facilités qu'elle propose, obligent ceux qui l'utilisent à se soumettre au cadre et aux usages assez stricts qu'elle impose. Par l'utilisation d'une sonorisation le culte subit une forte contrainte tant visuelle que logistique. En effet, les micros (s'ils ne sont pas sans fil³⁴) occupent des positions fixes et contraignent fortement les utilisateurs dans leurs mouvements, non seulement physiques mais également oratoires. La sonorisation diminue en effet dramatiquement les possibilités quant à la dynamique de l'amplitude, car lorsque la voix veut s'élever un peu, l'assistance est vite abasourdie par un niveau sonore trop élevé. L'orateur, qui n'entend généralement pas la restitution de ses paroles par le système d'amplification, a nécessairement de la difficulté à régler le débit et l'intensité de sa voix. Le réglage d'une sonorisation est délicat et nécessite donc l'intervention répétée voir constante de personnel qualifié³⁵, car chaque changement d'orateur (donc de volume et de tonalité) demande des adaptations particulières. C'est ainsi que la sonorisation, qui devait permettre une plus grande participation des laïcs (aux voix peu entraînées), conduit bien souvent à des critiques, généralement justifiées, des acteurs occasionnels, l'un parlant trop près du micro, l'autre trop loin, l'autre encore ayant oublié d'allumer son micro. Il est par ailleurs difficile de passer d'une voix sonorisée à une voix naturelle. La sonorisation n'encourage ainsi pas la participation spontanée des fidèles (par exemple lors de prière partagée) par la peur qu'elle génère, de ne pas être compris du reste de l'assemblée. En ne le servant que modestement, la sonorisation ritualise et contraint largement le culte. Les officiants de la célébration deviennent vite les esclaves de ce qui devait être un outil. Le passage du microphone d'une personne à l'autre impose une gestique particulière, artificielle et bien peu spirituelle. Et c'est sûrement de la perte du naturel dans le culte que la sonorisation est la plus coupable. Non seulement elle déforme les timbres des voix, mais elle délocalise souvent les sources sonores. Ainsi, la plupart des sonorisations donneront l'impression que c'est le mur sur lequel est fixé le haut-

³² J'ai récemment participé à un culte, où une panne de sonorisation avait obligé toute l'assemblée à se concentrer sur les premiers bancs qui font face à la chaire. Jamais le culte n'a été aussi fraternel et le chant de l'assemblée si beau et malgré l'absence de sonorisation, personne ne s'est plaint de n'avoir pas compris une parole de ce culte...

³³ Ces "clusters" sont utilisés dans la grande majorité des églises américaines qui font plus grand cas des performances acoustiques que de l'impact esthétique d'une installation de sonorisation.

³⁴ Les micros sans fil, s'ils présentent l'avantage de la mobilité, sont sujets à d'autres contraintes et difficultés comme la diffusion d'émissions parasites (transmissions radio) complètement extérieures au déroulement du culte ou des sifflements lorsque le micro se trouve dans le champ d'un haut parleur (effet Larsen).

³⁵ Ce personnel fait généralement défaut dans les églises. On trouve maintenant sur le marché des appareils (mixer automatique) qui tentent de suppléer à ce manque.

parleur le plus proche et toujours ce mur qui parle, malgré le déplacement visible des sources sonores (effet Haas³⁶).

Notons enfin que la sonorisation sait par elle-même se rendre indispensable en entraînant rapidement les ministres du culte dans un cercle vicieux. En disposant d'une sonorisation, ceux-ci s'y habituent et n'ont plus l'occasion d'exercer leur voix. Ne sachant plus guère parler d'une "claire et intelligible voix" pour se faire comprendre sans l'aide de cette "prothèse vocale", ils redoutent de s'en passer et ils deviennent ainsi non seulement des "paresseux des cordes vocales" mais également des prisonniers de la technique. Cette technique va même jusqu'à se substituer aux hommes. Ainsi la sonorisation est parfois utilisée pour diffuser de la musique pour les interludes et même pour accompagner les chants de l'assemblée. Personnellement, je désapprouve cette "technicisation" du culte, qui l'appauvrit en le standardisant, en palliant ou gommant les différences, les imperfections, et les limites des hommes, qui peuvent justement être la source inépuisable de richesses et de solidarité dans le culte.

6.6.3.4 Appréciation subjective

L'analyse des résultats de notre enquête montre que les installations de sonorisation sont jugées globalement plutôt satisfaisantes par les paroissiens. En effet, la caractérisation moyenne de la sonorisation obtient une valeur de 0.67 ± 0.22 sur une échelle de 0 à 1 (0=mauvaise; 1=bonne).

Une installation de sonorisation permet d'améliorer sensiblement l'intelligibilité subjective (cf. Tableau 14 et Figure 23) ce qui semble contredire nos résultats de mesurages objectifs dans les églises (cf. §3.2.6.4) qui montraient une faible augmentation de l'intelligibilité avec l'utilisation d'une installation de sonorisation.

Tableau 14 *Appréciation subjective de l'intelligibilité avec et sans sonorisation*

	Moyenne	Ecart type (variation entre églises)	Ecart réponses (variation dans chaque église)
Sans sonorisation	0.45	0.31	0.26
Avec sonorisation	0.75	0.19	0.25

On peut alors expliquer l'impact subjectif positif de la sonorisation d'une part par l'imprécision de la grandeur physique utilisée (STI et RASTI) dans le cas particulier des églises. D'autre part, la sonorisation, même médiocre, permet d'augmenter sensiblement le niveau sonore³⁷ et d'en diminuer les variations d'une place à l'autre. Nous avons en effet constaté (cf. Tableau 5) que la sonorisation permettait de diminuer les inhomogénéités de niveau sonore issues notamment de l'éloignement

³⁶ Cet effet peut être diminué dans une configuration avec plusieurs haut-parleurs grâce à l'introduction d'un retard temporel du signal transmis par les haut-parleurs qui permet de localiser correctement la source sonore initiale.

³⁷ Rappelons que la moyenne d'âge des fidèles participant régulièrement aux cérémonies religieuses est actuellement relativement élevée et qu'on peut légitimement supposer que l'acuité auditive est plus faible que celle considérée par les indices d'intelligibilité. L'importance d'une augmentation de niveau sonore (en particulier la prise en compte d'un seuil de rapport signal/bruit souhaitable élevé), est alors, dans le cas de paroissien, sous-estimé par les indices d'intelligibilité traditionnels.

de la source. Enfin, rappelons que les mesurages objectifs d'intelligibilité (avec et sans sonorisation) ont été réalisés dans des églises vides. Nous avons cependant observé que les améliorations d'intelligibilité étaient généralement beaucoup plus importantes dans les églises occupées (cf. § 5.4).

Subjectivement, la sonorisation permet donc d'améliorer sensiblement les conditions d'écoute (intelligibilité et niveau sonore) malgré la qualité généralement médiocre des installations. Il serait cependant souhaitable d'améliorer la conception et la réalisation des installations de sonorisation pour la parole en suivant notamment les recommandations élémentaires dans ce domaine [10].

6.7 Disposition de l'assemblée

6.7.1 Approche pluridisciplinaire

Riches d'une prise de conscience de la richesse et de la complexité de l'héritage historique dont est issue l'organisation des sièges dans nos églises (cf. §5.3), nous pouvons orienter notre réflexion sur le sens et l'adéquation entre les dispositions de l'assemblée dans nos églises et les besoins liturgiques actuels.

6.7.1.1 Disposition en long pour favoriser l'affectivité

Dans la grande majorité de nos églises, les bancs sont actuellement orientés en long (cf. §5.3.3.1), généralement en deux travées face à un espace liturgique où l'on retrouve la table de communion, la chaire (ou l'ambon), et souvent le baptistère, tous trois symboles de la rencontre et de l'Alliance de Dieu avec son peuple. En orientant chaque fidèle dans la même direction, cette disposition met l'accent sur une dimension particulière du culte qui est de se tourner ensemble vers le Christ, tête unique de l'Eglise qui donne son seul sens au rassemblement (cf. Figure 24). L'espace liturgique situé devant l'assemblée est extérieur à elle, ce qui, symboliquement, met l'accent sur la transcendance du Dieu Tout Autre. La logique de cette disposition veut en plus que l'accès unique se fasse de façon axiale, généralement³⁸ par le fond de l'église (par une allée centrale ou éventuellement par des bas-côtés). Chaque fidèle « monte » personnellement et symboliquement vers le Christ, en particulier pour l'Eucharistie qui se déroule par défilé dans cette logique. Ce pèlerinage symbolique transparait encore différemment lorsque le baptistère (et éventuellement une forme de narthex) se trouve à l'entrée de l'église. Le parcours spirituel de la vie de chaque fidèle s'inscrit et est tracé alors symboliquement dans une telle organisation de l'église, où l'on passe du monde profane extérieur à l'Eglise au baptême (entrée dans l'alliance de Dieu et dans l'Eglise) puis à la pleine communion dans l'Eucharistie qui se déroule dans le chœur, image du Paradis. Une telle disposition favorise une participation plus individualiste que communautaire. En effet, chacun étant tourné dans une seule direction (symboliquement celle du Christ), on ne peut voir que le dos des autres fidèles. La communion entre fidèles est alors plus spirituelle (en Christ) que visuelle. Lors de faible fréquentation (ce qui devient de

³⁸ On trouve cependant quelques contre-exemples comme le temple de St. Laurent à Lausanne, où l'entrée se fait par l'avant (du côté de la chaire)

moins en moins rare), les fidèles, qui accèdent par le fond de l'église, peuvent (et choisissent de) se disperser dans l'ensemble de l'espace, ce qui a pour effet de diminuer encore la visibilité communautaire du culte. Enfin pratiquement, de par l'éloignement des derniers bancs, une telle disposition n'est avantageuse ni du point de vue visuel ni pour l'audition de la parole.



Figure 24 Disposition en long d'une assemblée tournée vers une même direction (temple de Clarens)

La disposition en long est en outre peu favorable au chant choral de l'assemblée, car on entend alors surtout les voix situées juste derrière soi. Cette disposition, parfois farouchement défendue par les tenants d'une liturgie assez conservatrice [28; 30; 72] est cependant favorable à l'écoute de la musique. Une telle disposition, qui se rapproche de celle des bonnes salles de concerts en "carton à chaussures" (cf.), permet, en effet, d'avoir de nombreuses réflexions latérales, qui sont essentielles pour l'audition musicale [29].

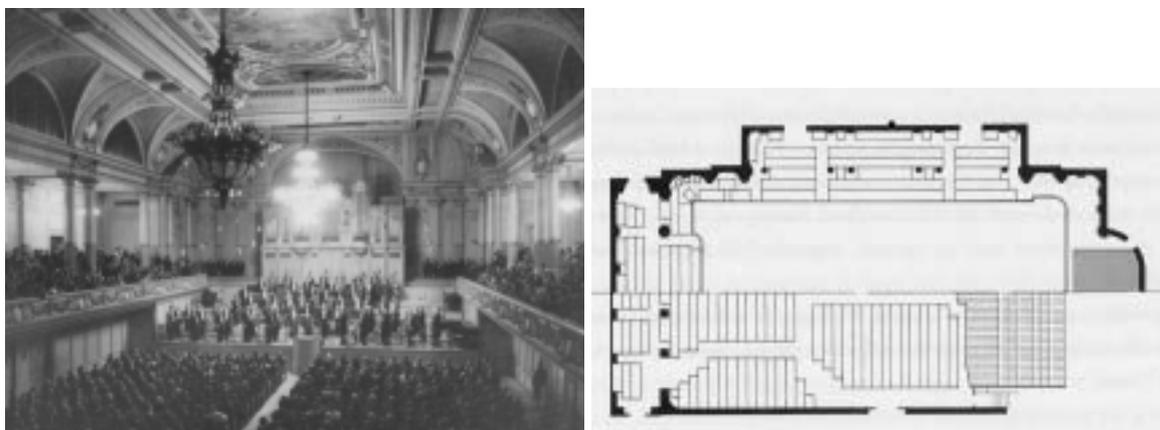


Figure 25 Photo et plan de la Tonhalle de Zurich dont l'acoustique réputée provient en partie de son plan en « carton à chaussures » [29].

En conclusion, une **disposition en long** qui **favorise surtout l'écoute de la musique, est adaptée dans le cas d'une liturgie "traditionaliste"** où les fidèles, tournés ensemble vers le Christ, sont amenés à regarder le ministre qui prend une place essentielle. Cette disposition, qui n'est pas favorable pour l'intelligibilité de la parole et pour le chant de l'assemblée, apparaît donc assez peu adaptée à un culte chrétien contemporain, relativement participatif.

6.7.1.2 Disposition centrée pour signifier la communauté

Une disposition centrée, c'est à dire avec les bancs non plus en face mais autour de l'espace liturgique, permet d'éviter les inconvénients pratiques et symboliques de la disposition en long. En effet, une disposition en demi-cercle ou en « U », permet à chacun d'être tourné vers un même lieu (l'espace liturgique), tout en ayant une communion visuelle avec les autres fidèles. La liturgie ne se déroule plus devant, à l'extérieur mais au milieu, au cœur de l'assemblée. Symboliquement, cette disposition met l'accent sur le Dieu qui se fait proche, qui vient au milieu de son peuple. N'ayant plus de fond mais une périphérie, cette disposition intègre plus qu'elle ne hiérarchise et permet que les divers accès se fassent de façon radiale (pour le demi-cercle) ou latérale (disposition en quadrangle faisant un « U »). Les fidèles « convergent » ainsi ensemble vers le centre (le Christ), en particulier pour la Sainte Cène qui se déroule dans cette logique par table(s) communautaire(s). Une telle disposition favorise une participation communautaire. Les fidèles peuvent en effet se voir par delà la table de Communion, lieu par excellence d'accueil, de pardon et d'amour. L'espace liturgique qui intercepte le regard entre fidèles, peut alors le transformer. La communion entre fidèles est alors non seulement spirituelle (en Christ) mais visuelle. La disposition centrée présente par ailleurs des avantages techniques non négligeables. En effet, cette disposition permet non seulement une optimisation de l'occupation de l'espace (densification des places), mais elle réduit notablement la distance entre l'espace liturgique et les bancs les plus éloignés, ce qui améliore et la vision et l'audition de la parole en augmentant la contribution du son direct par rapport au champ réverbéré. L'intelligibilité de la parole, ainsi que la vision, sont encore davantage favorisés lorsqu'en plus l'assemblée est disposée en pente, ce qui rapproche ainsi logiquement cette configuration d'un auditorium (cf. Figure 26).

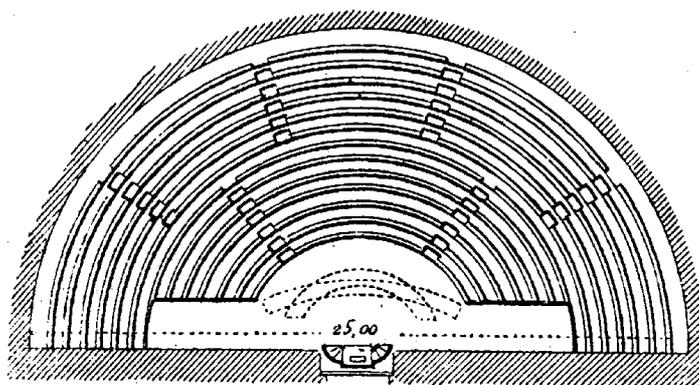


Figure 26 Auditorium avec une disposition centrée permettant de réduire la distance orateur-auditeur et d'optimiser l'intelligibilité de la parole

Enfin, cette disposition est particulièrement favorable pour le chant choral de l'assemblée, car les voix se faisant face sont mieux perçues (cf. Figure 27). Lors de faible fréquentation, les fidèles sont naturellement conduits par les accès à se regrouper de façon communautaire vers le centre. La disposition centrée présente donc de nombreux avantages tant pratiques que symboliques. Cette disposition est caractéristique des périodes qui succédèrent à la Réforme et au Concile Vatican II.

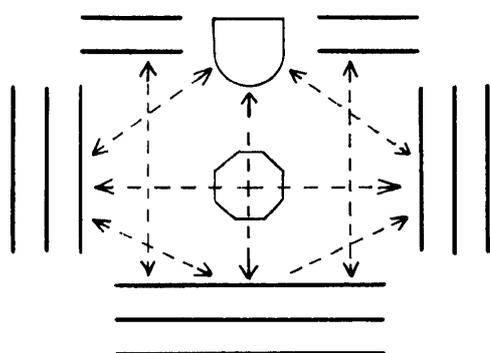


Figure 27 Schéma d'une disposition centrée en quadrangle favorisant la vision et l'écoute entre les intervenants [63] avec l'exemple (à droite) du temple de Coppet (XV^e)

En conclusion, **une disposition centrée favorise l'aspect communautaire l'intelligibilité de la parole et le chant communautaire.** Ce type d'organisation, qui correspond bien aux besoins de la liturgie contemporaine continue à se développer dans les églises catholiques. Elle doit par contre être impérativement redécouverte dans les églises protestantes. Pour cela, il faut le courage, la liberté et la foi³⁹ d'abandonner les vieilles habitudes figées pour remettre le Christ et ses attributs, que sont la table de communion et la chaire, au milieu et non devant l'assemblée. Une telle réorientation ne peut que contribuer à favoriser, dans notre société individualiste, l'aspect communautaire des cultes chrétiens.

³⁹ Certaines paroisses tant catholiques (par exemple St. Joseph de Prilly) que protestantes (changements ponctuels pour le temps de l'Avent à la Sallaz à Lausanne) montrent déjà l'exemple.

6.7.2 Résultats de l'enquête

Les résultats de notre enquête montrent que les fidèles sont en général peu critiques sur la disposition de l'assemblée, probablement du fait de l'habitude. En effet, l'appréciation moyenne est de 0.81 ± 0.21 (écart type) sur une échelle de 0 (mauvaise disposition) à 1 (bonne disposition). L'analyse détaillée des résultats (cf. Tableau 15) montre cependant que les fidèles préfèrent une disposition en demi-cercle (appréciation moyenne de 0.96 ± 0.08). L'autre disposition de type centré, en quadrangle semble satisfaire les fidèles (appréciation moyenne de 0.85 ± 0.12). Par contre, la disposition en long, bien que la plus répandue dans les églises en Suisse, est moins appréciée des fidèles (appréciation moyenne est de 0.78 ± 0.23) de même que sa variante en épi (appréciation moyenne est de 0.80 ± 0.20).

Tableau 15 *Appréciation subjective de la disposition de l'assemblée (0=mauvaise, 1=bonne)*

Disposition	Long	Epi	Quadrangle	Demi-cercle	Toutes
Moyenne	0.78	0.80	0.85	0.96	0.81
Ecart type	0.23	0.20	0.12	0.08	0.21

L'analyse de la relation entre la disposition de l'assemblée et l'appréciation subjective et objective (indice RASTI) de l'intelligibilité permet de compléter cette analyse. Nous constatons en effet (cf. Tableau 16) que les positions centrées (en quadrangle ou en demi-cercle) permettent d'obtenir subjectivement et objectivement des meilleures conditions d'intelligibilité de la parole. Cela confirme d'une part la préférence des paroissiens pour les dispositions centrées, et d'autre part l'importance de l'intelligibilité dans l'appréciation subjective des églises.

Tableau 16 *Appréciation subjective et objective de l'intelligibilité en fonction de la disposition de l'assemblée*

Appréciation	Subjective*		Objective (RASTI)	
	sans	avec	sans	avec
Disposition/sonorisation				
En long	0.42	0.73	0.37	0.43
En épi	0.49	0.76	0.37	0.40
Quadrangle	0.63	0.87	0.41	0.43
En demi-cercle	0.49	0.77	0.45	0.50

* 0=mauvaise; 1=bonne

6.8 Position et acoustique pour l'orgue

6.8.1 Position de l'orgue

6.8.1.1 Multiplicité des intervenants et des motivations

Les considérations qui président aujourd'hui au choix de la position d'un orgue sont multiples. Les critères avancés sont non seulement acoustiques, mais également pratiques, liturgiques ou esthétiques. Dans le choix d'un orgue et de sa position, il y a divers intervenants et diverses motivations :

- Le prêtre ou le pasteur, qui se préoccupe des enjeux ecclésiologiques et liturgiques;
- Le chœur paroissial et son chef, qui considère le choix d'un point de vue vocal;
- L'organiste, qui se fie à son expérience musicale et instrumentale de l'orgue;
- Le facteur d'orgues, qui se base sur les aspects instrumentaux afin que sa création puisse se conserver dans le temps et donner le meilleur d'elle-même;
- L'architecte, qui se soucie de l'aspect esthétique et de l'intégration architecturale;
- Le conservateur des monuments historiques, qui vérifie le respect de l'intégrité du bâtiment;
- La communauté, qui va écouter l'instrument et/ou se laisser conduire par lui;
- L'acousticien, qui donnera éventuellement son avis sur des bases techniques et scientifiques.

Ce faisceau de personnes et d'intérêts pas toujours convergents peut conduire à des profonds quiproquos, malentendus ou dissensions au sein des commissions qui décident généralement du choix d'un orgue et de sa position⁴⁰. Nous nous pencherons plus spécialement sur les aspects acoustiques, après avoir évoqué brièvement le point de vue théologique (liturgique et ecclésiologique), musical et architectural.

6.8.1.2 Point de vue théologique et musical

La fonction première et reconnue de l'orgue⁴¹ est de susciter, d'accompagner ou de conclure la louange du peuple assemblé. Du point de vue liturgique et musical, il faut obtenir une bonne cohésion (visuelle⁴² et auditive) entre les divers intervenants et cela influence le choix de la position de l'orgue. Cet aspect est cependant plus ou moins important suivant le type de liturgie. Pour les églises où la musique est particulièrement importante dans la liturgie (par exemple de l'Eglise catholique, en particulier avant Vatican II ou dans les offices monastiques) et fait appel à divers

⁴⁰ L'exemple des débats sur l'orgue de l'église de Dombresson en est une illustration récente [73].

⁴¹ On n'a jamais tant joué de l'orgue en liturgie qu'aujourd'hui, remarquait Gaston Litaize [74].

⁴² Selon le mot de l'organiste André Luy « on entend aussi avec les yeux ». L'utilisation de divers systèmes (miroirs ou transmission vidéo) peuvent cependant palier dans une certaine mesure à un manque de vision.

intervenants (chœur, solistes, instrumentistes et officiants), la position de l'orgue ou des orgues est dictée par l'organisation liturgique de la célébration afin d'en préserver la cohésion. Le regroupement des sources musicales s'impose, en général dans ou proche du chœur si les officiants prennent une part importante au niveau de l'animation musicale de la liturgie⁴³. En cas de manque de place au niveau du chœur de l'église ou si l'exhibition des musiciens est perçue comme inconvenante (seul l'autel ou la chaire doit retenir le regard), la solution la plus courante consiste à utiliser une grande galerie au fond de l'église (sur le portail occidental pour les églises orientées) permettant d'accueillir tous les musiciens⁴⁴. Cette solution est généralement tout à fait satisfaisante du point de vue musical, surtout si les officiants n'ont pas une part importante au niveau de l'animation musicale de la liturgie. Cette solution est cependant moins satisfaisante du point de vue ecclésiologique car les musiciens, mis spatialement à l'écart du lieu de célébration de la liturgie, sont plus difficilement considérés comme de véritables officiants du service divin.

D'autre part dans les églises où la musique d'orgue est destinée essentiellement à souligner des moments particuliers de la liturgie (par le prélude, les interludes et le postlude) ou à accompagner le chant de l'assemblée (par exemple dans les églises issues de la Réforme), la position de l'orgue est moins critique. Il suffit en général, dans ces cas, de positionner l'orgue dans un endroit suffisamment haut et exposé afin que l'orgue soit bien entendu. Cela crée, comme mentionné plus haut pour les services religieux très liturgiques, une difficulté ecclésiologique (mais également pratique) d'intégration de l'organiste au sein de la célébration et de l'assemblée. Du point de vue purement ecclésiologique, la musique, comme la prédication, devrait être faite non seulement à proximité des officiants mais au sein même de l'assemblée et non pas à l'écart d'elle (devant ou derrière et/ou au-dessus). Le fait de positionner l'orgue près de l'assemblée favorise non seulement la communication avec les autres ministres du culte, mais elle permet surtout une bonne cohésion entre le jeu instrumental et le chant des fidèles. La proximité de l'instrument et des fidèles permet une meilleure écoute mutuelle, facilite le mélange des voix et de l'instrument et réduit la tendance à ralentir. Cette disposition, qui répond à cette attente ecclésiologique, n'est cependant pas toujours favorable du point de vue musical et acoustique. En effet l'orgue a besoin, comme le prédicateur, mais pour des raisons différentes, de hauteur pour être entendu de tous de façon satisfaisante. La solution, développée en France, au XIX^e siècle, consistant en un grand orgue faisant « respirer » toute l'architecture de l'église à partir d'une galerie ouest et dialoguant avec un petit orgue d'accompagnement situé dans ou à proximité du chœur, semble être finalement la plus satisfaisante du point de vue musical et ecclésiologique.

⁴³ Une note pastorale de la conférence des évêques italiens sur la construction de nouvelles églises [64] mentionne ainsi que "l'emplacement idéal de l'orgue et des autres instruments musicaux, comme pour le chœur, est la position intermédiaire entre l'assemblée et le prêtre".

⁴⁴ Selon Thurian [75], "l'emplacement des orgues le plus convenable est sur une tribune au-dessus de la porte centrale. La tribune sera suffisamment grande pour le chœur paroissial ou la maîtrise, mais pas de telle façon qu'on y puisse placer des fidèles. La communauté serait ainsi divisée fâcheusement".

6.8.1.3 Point de vue esthétique

Le point de vue esthétique, à considérer dans le choix de la position de l'orgue, appartient principalement à l'architecte, et celui-ci l'épouse avec plus ou moins de bonheur. Selon l'expression de Hameline [76], « l'orgue s'insère dans tout un ensemble où se joue quelque chose du temps, de l'espace, du rapport de l'un à l'autre, du lien entre les personnes (les acteurs de la liturgie), du rapport entre les diverses pièces du mobilier qui habitent et servent de lieu à la liturgie ». Par ses proportions et sa fonction, l'orgue peut, soit être considéré comme un meuble, soit devenir un élément marquant de l'architecture intérieure. Suivant sa position dans l'église, l'orgue peut être mis en scène (lorsqu'il est devant l'assistance) ou au contraire presque dissimulé (dans une niche ou derrière l'assistance⁴⁵). L'intégration dans l'édifice se fait non seulement par le choix du buffet mais également par la structure qui l'attache à l'église (par exemple une tribune ou une niche). A la suite de Laugier, qui formulait déjà en 1765 diverses recommandations pour l'intégration architecturale de l'orgue⁴⁶, chaque architecte donne aujourd'hui sa réponse personnelle à cette problématique.

Nous avons vu dans le survol historique qu'il faut distinguer deux cas de figures qui diffèrent fondamentalement du point de vue architectural. Il y a d'une part les églises nouvelles dans lesquelles l'implantation de l'orgue peut être pensée au niveau du projet architectural et, d'autre part, l'ajout ou le changement d'un orgue dans une église existante, qui doit être comprise et respectée par l'architecte et, selon la valeur du bâtiment, par le conservateur des monuments historiques. L'encombrement de l'instrument, qui reste cependant un facteur décisif du point de vue architectural,

⁴⁵ La gêne due à l'absence de vision de l'orgue (et de l'organiste) durant un concert a conduit dans certains cas (par exemple à St.-Jacques à Lausanne) à utiliser un système vidéo de projection sur écran pour le public.

⁴⁶ «L'usage des orgues présente une nouvelle incommodité dans nos églises. La pratique la plus ordinaire est de les placer au-dessus de la grande porte. On les y suspend ou bien on construit exprès une grande tribune où elles puissent être placées commodément. Il est difficile que cet arrangement ne tourne pas au préjudice de l'ordonnance. Le buffet de l'orgue, quelque bien suspendu qu'il soit, masque toujours une partie des colonnes et de l'entablement. Une grande tribune ne peut avoir lieu que lorsqu'il y a deux étages d'Architecture. Dans tout autre système, elle tranche l'ordonnance dans sa hauteur...Ces défauts sont très sensibles. On peut les éviter en plaçant le buffet de l'orgue au-dessus de l'entablement, dans le vide que le cintre de la grande voûte laisse au-dessus de la grande porte...On peut craindre que la trop grande élévation du buffet ne diminue l'effet des jeux de l'orgue. Une manière qui n'a point encore été pratiquée, serait de couper le buffet de l'orgue en trois parties, et de les distribuer dans les trois entre-colonnements qui doivent être au fond de la nef. On pourrait établir les jeux principaux dans le grand entre-colonnement du milieu, et jeter toutes les pédales dans les petits entre-colonnements d'à côté. On éviterait aisément que ces trois parties de buffet n'empiétassent sur les colonnes et sur l'entablement (...). L'extrémité de la nef, du côté du portail, ordinairement c'est la place que l'on réserve au buffet de l'orgue et c'est tout ce que l'on peut faire de mieux. Mais je n'approuve point l'usage presque universel de construire une grande tribune pour cet effet. Cette tribune n'entrant point effectivement ou plutôt étant tout à fait étrangère à l'Architecture de l'église, ne peut qu'en corrompre et vicier l'ordonnance. Il serait beaucoup mieux au-dessus de la principale porte intérieure d'élancer une coquille de bois, soutenue avec effort par des figures d'anges, et établir sur cette base le buffet de l'orgue, qui aurait alors très bonne grâce, paraissant porté au milieu des airs...On peut aussi, lorsque la grandeur du buffet le demandera, faire régner le portique inférieur en forme de bas-côté devant la grande porte et alors on aura au-dessus une tribune assez vaste pour y placer le buffet dans le fond, le positif sur le devant, et les soufflets de part et d'autres» [77].

impose généralement l'emplacement de l'instrument⁴⁷. De part leurs positions souvent tranchées et mal comprises, les architectes sont souvent considérés comme « les plus grands ennemis des facteurs d'orgues et des musiciens »⁴⁸.

6.8.1.4 Aspects acoustiques

Laissons ici cependant les considérations liturgiques et musicales, architecturales ou esthétiques, qui réserve une grande place à l'appréciation personnelle et subjective, pour nous pencher sur les critères de choix dictés par des considérations acoustiques, dont nous pouvons attendre une certaine objectivité.

6.8.1.4.1 Critères acoustiques

L'argumentation au niveau acoustique peut se développer suivant divers plans et critères :

- Éviter les **retards** entre les sources sonores. Les intervenants musicaux (orgue, chœur et instruments) devraient idéalement se situer dans un rayon de 13 m pour éviter des retards importants qui nuisent à la cohésion musicale⁴⁹. Il faut également garder une synchronisation suffisante entre le chant de l'assemblée et son accompagnement par l'orgue, sous peine de désunion entre eux et de perpétuels ralentissements. Pour l'accompagnement du chant de l'assemblée, il faut en outre distinguer le retard de l'orgue pour l'assemblée, le retard au sein de l'assemblée et le retard de l'assemblée pour l'organiste (cf. Figure 29). En plaçant l'orgue le plus près possible de l'assemblée (au milieu de la nef), on réduit son retard pour l'assemblée. Une position à l'arrière de l'assemblée permet par contre une bonne cohésion du chant (faible retard au sein de l'assemblée) qui parvient cependant plus faiblement (direction opposée) et avec un important retard à l'organiste. Pour minimiser le retard du chant de l'assemblée pour l'organiste, on peut placer la console (rapportée) au sein ou en bordure de l'assemblée (au milieu de la nef, cf. Figure 28)⁵⁰ ou utiliser un dispositif électroacoustique⁵¹. Du point de vue des retards, la position frontale de l'orgue est la plus défavorable, car elle cumule les désavantages et pour l'assemblée et pour l'organiste. Les retards peuvent aussi venir d'une importante différence de chemin (dL) entre le son direct et une forte réflexion sur une surface éloignée (par exemple un plafond haut). Ces réflexions tardives entraînent une détérioration du son (dL>16 m), voir un écho franc (dL>25 m). Il faut donc éviter de disposer l'orgue trop loin d'une surface qui réfléchit fortement le son vers l'assemblée.
- Obtenir la meilleure **homogénéité** ou répartition des niveaux sonores dans l'assemblée. L'orgue doit être entendu partout dans le public de façon

⁴⁷ A la question de l'emplacement souhaitable de l'orgue dans une église, Klotz [78] répond simplement que « celui-ci doit être mis à l'endroit où il y a le plus de place ».

⁴⁸ L'organiste P.-A. Clerc est l'auteur de cette formule cinglante.

⁴⁹ L'orgue d'écho (*Fernwerk*, par exemple dans l'église catholique de Montreux), dont le buffet est éloigné du buffet principal, est une exception car cet instrument joue justement sur l'effet spécial, produit par le retard et l'éloignement de cette source par rapport à l'orgue principal.

⁵⁰ Ce système permet par ailleurs à l'organiste qui entend son instrument comme le public de bien préparer sa registration.

⁵¹ L'utilisation d'un micro dans ou en bordure de l'assemblée (ou de l'orchestre dans le cas d'un concert) et d'un casque d'écoute pour l'organiste permet de minimiser ce retard.

satisfaisante (faible écart type entre les places), autant du point de vue du niveau sonore que du mélange des timbres des différents jeux. L'homogénéité est d'autant meilleure que l'orgue se trouve loin de l'assemblée ou que celle-ci est disposée de façon équidistante de l'orgue (par exemple en hémicycle ou en « U »).



Figure 28 Maître J. Guillou à la console rapportée dans la nef de l'orgue de l'église St-Eustache à Paris (Ducroquet, 1854)

- Eviter les **interférences**⁵² par une forte réflexion induisant un déphasage entre l'onde directe et réfléchi. Cela conduit à une modification fréquentielle (« filtre en peigne ») ou la création d'ondes stationnaires dans certains cas (forte inhomogénéité spatiale pour des sons continus) lorsque l'onde émise correspond à un mode propre du volume. Ce phénomène est parfois présent aux basses fréquences. Pour obtenir un bon couplage entre la source et la salle, il faut que le son produit excite suffisamment de mode propre de la salle, ce qui n'est plus le cas lorsque les longueurs d'ondes émises deviennent de l'ordre de grandeur des dimensions du volume. Il faut donc éviter de disposer l'orgue dans une zone

⁵² Charlin l'expose en ces termes : « Pour l'orgue qui est un instrument à son soutenu, il y a des ondes stationnaires qui proviennent de ce que les sons issus d'un tuyau viennent se réfléchir sur les parois, puis sur une autre, reviennent sur elles-mêmes et se retrouvent soit en phase, soit en contre-phase; dans un cas, l'intensité est augmentée, dans l'autre cas, elle est au contraire annulée. Une onde stationnaire peut faire varier un son depuis + 6 décibels, c'est à dire le double de son amplitude, jusqu'à moins l'infini, c'est à dire l'annulation totale; dans ce dernier cas, on continue à entendre, mais ce qu'on entend, ce n'est plus le " son fondamental " qui est réellement annulé, mais les harmoniques du tuyau qui subsistent. Dans ces conditions-là, l'instrument est franchement dénaturé. Lorsque le volume et la largeur de l'édifice sont suffisamment grands, ce phénomène est moins gênant. Pour les sons aigus, nos deux oreilles permettent déjà d'atténuer considérablement cet inconvénient, mais pour les sons graves, nos deux oreilles se comportent comme une seule et, à ce moment-là, l'instrument devient très irrégulier: certaines notes, pour une place donnée dans l'église, sont énormes, alors que d'autres au contraire n'ont aucun " corps " » [74].

présentant un mode propre important, au risque de créer une onde stationnaire dont la fréquence, si elle est voisine (mais différente) d'un composant principal (fondamentale ou harmonique prédominant) d'un son émis, ressortira à la coupure de celui-ci en changeant le timbre voir la justesse de ce son. Il est préférable de mettre l'orgue dans un coin ou un angle du volume plutôt qu'au milieu du volume afin d'obtenir une excitation suffisante des divers modes propres et d'augmenter le rayonnement (directivité) de l'instrument.

- Conserver l'**accordage** des divers jeux en évitant les changements de température⁵³. Lorsque la température est variable avec la hauteur (chauffage laminaire), il est préférable de disposer les jeux plutôt en largeur que sur une grande hauteur afin d'éviter les différences de température et donc d'accord entre les tuyaux situés à des hauteurs très différentes. Pour les mêmes raisons, il faut éloigner le plus possible les tuyaux des sources de chaleur ponctuelles (chauffage, fenêtres en été, en particulier celles exposées au sud) ou des zones refroidies localement (fenêtres ou portes mal isolées en hiver). On se placera ainsi si possible à une distance minimum de 1 m d'un mur extérieur ou d'une fenêtre non isolée. La prise d'air à l'intérieur de l'église doit être située également dans une zone aux conditions stables et équivalentes à celles régnant aux abords des tuyaux. Ces mesures visent également à une bonne conservation de l'instrument dans le temps. Winkel [79] jugeait que « la position de l'orgue en dessus de l'entrée principale était essentiellement due à des raisons pratiques. Les facteurs plaçaient leurs instruments de manière à les protéger au mieux du soleil et de l'humidité ».

« Dans l'absolu, le meilleur emplacement de l'orgue est celui qui donne le volume spatial le plus important au développement des ondes sonores » [80].

D'après le célèbre ingénieur du son Charlin [69], il faut placer l'orgue à une distance telle que le temps de réverbération global d'une église ne soit pas gênant pour analyser les détails d'un trait et à une hauteur telle que le positif soit réellement brillant, net, incisif, très articulé, puisque c'est son rôle dans l'écriture musicale; il faut que les jeux du grand orgue soient volumineux, imposants avec des basses profondes, bien claires, et exemptes d'ondes stationnaires et, enfin, que le jeu du récit paraisse, au contraire, nettement décalé, à l'arrière plan. Ainsi sont obtenus les trois plans de l'orgue; bien nets et bien différents. C'est grâce à la mise en valeur de ces trois plans que l'on mettra en valeur les partitions, le compositeur ayant tenu compte justement des caractères de chacun de ces trois plans dans son écriture musicale.

6.8.1.4.2 Position dans le plan de l'église

Plusieurs acousticiens et architectes [26; 81-83], pensent que la meilleure position pour un orgue est dans l'axe principal de l'église (derrière l'autel ou sur une galerie au fond de l'église). Une position divisée dans le chœur (à l'espagnole) ou dans le transept apparaît comme moins favorable du point de vue acoustique.

⁵³ Lorsque l'air contenu dans un tuyau se réchauffe, sa densité diminue, son oscillation s'accélère, et le ton du tuyau augmente.

Selon Sonnaillon [80], « l'emplacement le plus usuel de l'orgue dans la plupart des églises reste la **tribune au-dessus du portail occidental** : les sonorités de l'instrument bénéficient à cette place de la meilleure propagation (...). Cet emplacement jouit généralement des meilleures qualités acoustiques ». Cependant une telle disposition peut présenter une inhomogénéité spatiale (mauvaises places sous la galerie ou trop loin de l'orgue) et d'importants décalages temporels si les musiciens sont séparés (par exemple un ensemble vocal dans le chœur accompagné par un orgue au fond de la nef⁵⁴). D'après Beyron,⁵⁵ un orgue placé sur une galerie au fond de la nef sur le portail occidental est la meilleure solution pour accompagner le chant de l'assemblée. L'analyse acoustique du décalage temporel entre l'assemblée et l'orgue relativise cependant un peu cette conclusion (cf. Figure 29a). En effet, si cette disposition est la meilleure du point de vue de l'assemblée pour le mélange des sons de l'orgue et du chant issu de l'assemblée située derrière (pas de retard au sein de l'assemblée), elle entraîne une difficulté de synchronisation pour l'organiste. Celui-ci entend relativement faiblement l'assemblée qui présente un décalage d'autant plus grand qu'elle s'étend loin de lui. Selon Charlin [74], « On a intérêt à ce que l'orgue soit contre le mur du fond de l'édifice, de manière à ce que les sons très graves, en particulier, qui ont des longueurs d'onde allant jusqu'à une vingtaine de mètres ne commencent pas à s'en aller vers le fond de l'église pour être réfléchis, revenir passer au-dessus de l'orgue avec une phase qui n'a plus rien à faire avec celle émise par l'orgue au moment où ils repassent, ce qui accroît donc sensiblement le phénomène d'interférence ».

⁵⁴ Charlin [74] nous expose son expérience en ces termes : « On a commencé à faire des concerts à Saint-Eustache. Les premiers concerts auxquels j'ai assisté étaient vraiment désastreux à tous points de vue. La chorale et l'orchestre étaient placés dans le chœur avec un petit orgue sans valeur sur le côté du chœur et le grand orgue à 100 mètres de là dans le dos du public; jusqu'au jour où j'ai proposé de renverser la situation complètement, de mettre l'orchestre et les chœurs au-dessous du grand orgue, de construire tout un échafaudage permettant d'étager tout ce personnel: orchestre et chœur sous l'orgue, et, de ce fait, de mettre le public le dos à l'autel. Cela a changé déjà considérablement. J'ai encore amélioré en mettant des réflecteurs sur les côtés, en faisant ce qu'il fallait pour que le son porte. Mais l'orgue avait sa console là-haut, insérée entre le positif et le grand orgue, et l'organiste était dans l'incapacité totale de suivre un chef qui se trouvait en bas du système. Comme on devait refaire cet orgue, j'ai pu obtenir que l'on mette une console électrique au bout du banc d'œuvre, en bas, c'est-à-dire un petit peu en arrière du chef d'orchestre (cf. figure 5). L'organiste fait face à son buffet. Il entend son orgue comme le public et il peut donc régler sa registration en conséquence et en tenant compte de l'orchestre et des chœurs. De plus, il voit le chef d'orchestre en avant et à gauche de lui et il peut attaquer en même temps que tout le monde. Evidemment, quand j'ai fait cela j'ai eu toutes sortes d'observations de la part des organistes qui ont dit: mais nous allons être trop loin de l'orgue, est-ce que réellement, nous allons pouvoir suivre? Finalement, ils ont tous essayé, et ils ont tous conclu qu'après tout ça marchait très bien. En effet, la distance n'est pas encore assez grande pour que le décalage soit trop important: il y a environ 15 à 18 mètres et le son parcourt 340 m par seconde. Le décalage est donc de 1/21 de seconde ce qui est négligeable par rapport au retard naturel de l'instrument; mais il y a tellement d'avantages que cela compense très largement le petit inconvénient d'entendre avec une fraction de seconde de retard l'attaque sur la touche ». Notons que l'éloignement de la console du buffet implique une traction électrique qui ne permet pas (encore) d'avoir une qualité de touché comparable à une traction mécanique.

⁵⁵ « Le son de l'orgue accroche au passage toutes les personnes. Elles s'entendent en même temps et ont alors l'impression de chanter ensemble. L'organiste joue un rôle important dans l'accompagnement car c'est alors lui qui conduit entraîne le chant par son rythme, sa registration claire » [84].

En suivant le raisonnement de Charlin, il faut, pour éviter les phénomènes stationnaires lorsque l'orgue se trouve installé latéralement (au niveau de la nef, du transept ou même du chœur), que la largeur soit grande devant les longueurs d'onde de l'orgue. Une position au **milieu de la nef** est cependant satisfaisante, si elle est suffisamment élevée, car l'assemblée, qui sera ainsi bien répartie autour de l'orgue, bénéficiera d'une bonne homogénéité et de faibles retards (cf. Figure 29c), particulièrement favorable au chant communautaire accompagné par l'orgue. Comme nous l'avons vu, cette proximité de l'assemblée (qui réduit donc les retards) est par ailleurs la meilleure position pour l'organiste lui-même, lorsqu'il tient le rôle d'accompagnateur du chant de l'assemblée. Si la hauteur de l'orgue n'est pas suffisante par rapport à la proximité de l'assemblée, il y aura un important manque d'homogénéité spatiale. Les personnes proches de l'orgue seront assourdies et elles ne bénéficieront pas du mélange des jeux alors que celles qui sont éloignées l'entendront plus faiblement du fait de l'absorption des fidèles.

Un orgue au **fond du transept**, n'est pas fameux du point de vue de l'assemblée située dans la nef, car il y a un effet de diffraction qui est sélectif en fréquence. Dans la nef, les sons graves sont alors moins atténués que les sons aigus pour lesquels le mur du transept fonctionne comme un écran acoustique. Le même phénomène a lieu lorsque l'orgue se trouve latéralement dans un chœur fermé par un jubé. Dans ces cas, la mise en place de l'orgue à l'anglaises sur le jubé est alors une solution satisfaisante du point de vue acoustique pour autant qu'il ne divise pas trop nettement les volumes (nef et chœur). Une telle entrave visuelle du chœur est cependant difficilement acceptable du point de vue architectural⁵⁶.

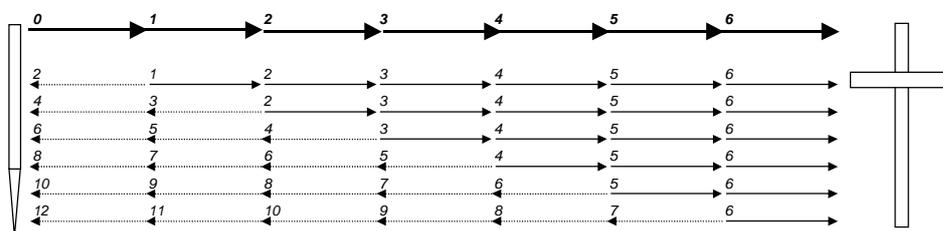
Notons enfin que pour un instrument de concert uniquement, une position élevée **face à l'assemblée** est la meilleure, car au niveau psychoacoustique, il est préférable d'écouter un son qui vient de face plutôt que de derrière⁵⁷. La position frontale est utilisée d'ailleurs dans la grande majorité des salles de concert⁵⁸. Il faut, dans ce cas, ménager une place suffisante entre l'orgue et le public pour y accueillir d'autres musiciens (chœur ou orchestre). Cependant, cette position est défavorable pour la cohésion du chant de l'assemblée. Comme le remarque Beyron [84], lorsqu'un orgue est placé au fond du chœur, face à l'assemblée « le chant des membres les plus éloignés de l'assemblée parvient avec du retard aux oreilles les plus rapprochées de l'orgue. La synchronisation est difficile à obtenir » (cf. Figure 29b). Cette position n'est cependant pas moins favorable que la tribune au fond de la nef pour entendre l'orgue ou pour l'organiste lui-même qui accompagne le chant de la communauté. En effet, pour une assemblée de même profondeur, la position frontale engendre les mêmes retards mais une meilleure audition du chant pour l'organiste que lorsque l'orgue est situé derrière l'assemblée (cf. Figure 29a).

⁵⁶ Selon le Rev. Sir Frederick A. Gore Ouseley (cité par Audsley [83]) : « La meilleure place pour un orgue est probablement sur le jubé, au centre de l'édifice. Architecturalement parlant, ce n'est peut-être pas la meilleure place, du fait qu'il devient impossible d'avoir une vue ininterrompue d'ouest en est dans la cathédrale. Mais, musicalement parlant, c'est la meilleure place ».

⁵⁷ Ceci pour des raisons de timbre d'abord, de par la disposition du pavillon de l'oreille, mais également à cause de notre instinct qui se méfie des sources qu'on ne voit pas.

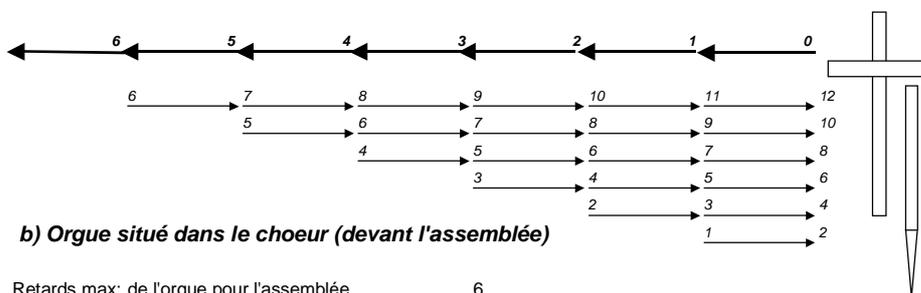
⁵⁸ Certaines églises de concert (par exemple Lutry ou St.-François à Lausanne) disposent de bancs réversibles permettant de « retourner » l'assemblée pour les concerts.

L'assemblée est orientée vers l'autel (symbolisé par une croix), l'orgue est représenté par U (en gras, propagation des sons d'orgue; en léger propagation du chant de l'assemblée)



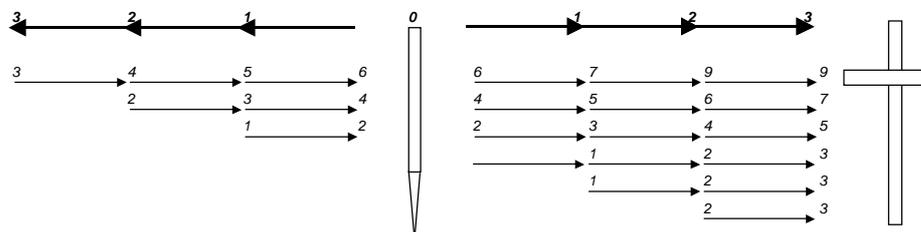
a) Orgue situé au fond de la nef (derrière l'assemblée)

Retards max: de l'orgue pour l'assemblée 6
 de l'assemblée pour l'assemblée 0 dans le sens de propagation, 10 en sens contraire
 de l'assemblée pour l'orgue 12 (venant de l'arrière de l'assemblée)



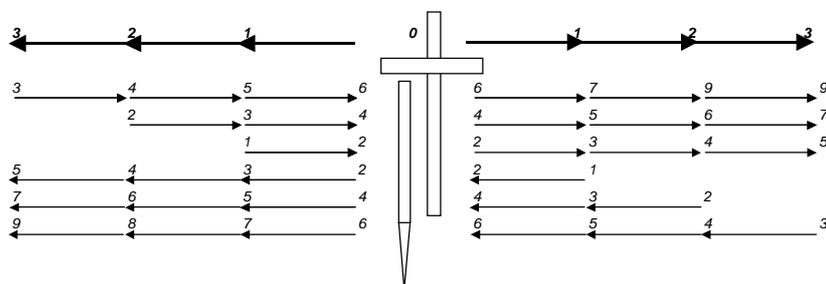
b) Orgue situé dans le chœur (devant l'assemblée)

Retards max: de l'orgue pour l'assemblée 6
 de l'assemblée pour l'assemblée 10
 de l'assemblée pour l'orgue 12



c1) Orgue situé au milieu de la nef (autel dans le chœur)

Retards max: de l'orgue pour l'assemblée 3
 de l'assemblée pour l'assemblée 6
 de l'assemblée pour l'orgue 6



c2) Orgue et autel situé au milieu de la nef

Retards max: de l'orgue pour l'assemblée 3
 de l'assemblée pour l'assemblée 6
 de l'assemblée pour l'orgue 6

Figure 29 Etude des retards entre l'orgue et l'assemblée (partagée en 6 secteurs) pour diverses configurations (en gras, propagation des sons d'orgue; en léger, propagation du chant de l'assemblée)

Une position frontale suffisamment élevée devient même particulièrement favorable à l'accompagnement du chant de l'assemblée, si celle-ci est disposée en large (face au plus long côté de l'église) ou en hémicycle car elle sera ainsi bien répartie autour de l'orgue, et bénéficiera d'une bonne homogénéité et de faibles retards (cf. Figure 29c2). Enfin, un orgue situé latéralement dans le chœur, est nettement mieux entendu dans le chœur lui-même (par les officiants ou les moines) que par le public situé dans la nef qui ne bénéficie pas ou peu du son issu directement de l'orgue. Dans ce cas, il est avantageux d'avoir des ouvertures latérales (du côté de la nef) sur le buffet d'orgue ou de situer ce dernier à l'angle du chœur et du transept pour diminuer les distorsions spectrales et l'atténuation sonore dans la nef.

Rappelons enfin que la technique permet aujourd'hui d'obtenir une certaine mobilité des orgues même de relativement grandes dimensions. On peut ainsi adapter la position au gré des besoins (liturgie ou concerts)⁵⁹.

6.8.1.4.3 Elévation

Il est en général préférable de placer l'orgue **plus haut que l'assemblée** pour obtenir une bonne répartition du niveau sonore dans l'assemblée. Dans le cas de grandes orgues, qui disposent d'une grande puissance sonore (contrairement à la parole), il faut en effet ménager une hauteur suffisante entre l'instrument et l'assemblée pour diminuer les effets d'atténuation induits par les auditeurs et éviter que ceux-ci ne soient assourdis par le volume sonore et qu'ils puissent profiter du mélange des différents timbres⁶⁰. En général plus le volume et la hauteur sont grands, plus l'orgue doit être situé haut pour obtenir une bonne répartition sonore dans l'assemblée. Une surélévation permet par ailleurs de profiter des réflexions sur le plafond pour diriger le son indirect sur l'assemblée sans craindre un phénomène d'écho (lorsque le plafond est à plus de 12 m de la source sonore). Cette réflexion peut cependant donner lieu à un phénomène de focalisation dans l'axe de l'église dans le cas d'une voûte en plein cintre. La surélévation de l'orgue doit cependant ménager un espace suffisant au-dessus des tuyaux (minimum 1.5 m) et permettre aux autres sources musicales (chœur ou instrumentistes, qui doivent être placées proches de lui), de jouer ou chanter en s'entendant bien, sous un plafond réfléchissant pas trop bas (hauteur souhaitable de 4 à 10 m). Dans des petites églises, on peut utiliser un podium (plate-forme), dans les grandes, une galerie pour surélever l'orgue.

⁵⁹ Chopard [73] affirmait ainsi pour la mise en place d'un nouvel orgue dans l'église de Dombresson « qu'il est aberrant de décider d'implanter un instrument fixe dans un espace où tout le mobilier est déplaçable. Tout en sachant bien qu'un orgue ne se remue pas comme un banc d'église. A cet égard, le projet sur coussin d'air (...) représente un assez bon compromis. (...) Cet orgue mobile pourrait intégrer, pour les célébrations religieuses, le coin nord-ouest de la nef pour faciliter la circulation à l'entrée, et venir au milieu pour améliorer l'acoustique mise à mal par la porte intérieure, vitrée et lisse, lors de concerts».

⁶⁰ Isoir relevait [79] « qu'au XIX^e siècle, à l'époque romantique, beaucoup de facteurs ont augmenté la pression dans les sommiers afin d'obtenir une plus grande intensité sonore. A Notre Dame (de Paris), Viollet le Duc a ainsi dû surélever la tribune d'environ 10 m ».

Seul un orgue de petite dimension peut prendre place dans ou à proximité de l'assemblée⁶¹, si possible légèrement surélevé par rapport à elle. Notons encore que les lieux d'émissions sonores des orgues de moyennes dimensions posés au sol sont en général situés relativement haut par rapport à l'assemblée.

6.8.1.4.4 Conditions locales

Le volume qui entoure l'orgue contribue à la qualité de fusion et à la rondeur des timbres; il est ainsi une sorte de prolongement de l'instrument. Les conditions d'implantation locales de l'orgue doivent contribuer à **favoriser le rayonnement** acoustique des sons émis par le buffet et procurer les réflexions nécessaires au mélange des voix d'orgue. Des mesures simples peuvent être prises dans l'implantation en plan et en élévation pour favoriser ce rayonnement (cf. Figure 30). Il faut notamment éviter d'enfermer l'orgue dans une niche trop étroite⁶² ou un transept trop profond, ce qui entraverait la diffusion du son, favoriserait les phénomènes d'interférences et focaliserait le son dans l'axe de cette niche. Il faudrait idéalement laisser un espace d'au moins 1 à 2 mètres entre le buffet et les murs les plus proches. Un volume plus important peut permettre d'amplifier les basses fréquences (mise en résonance des modes propres).

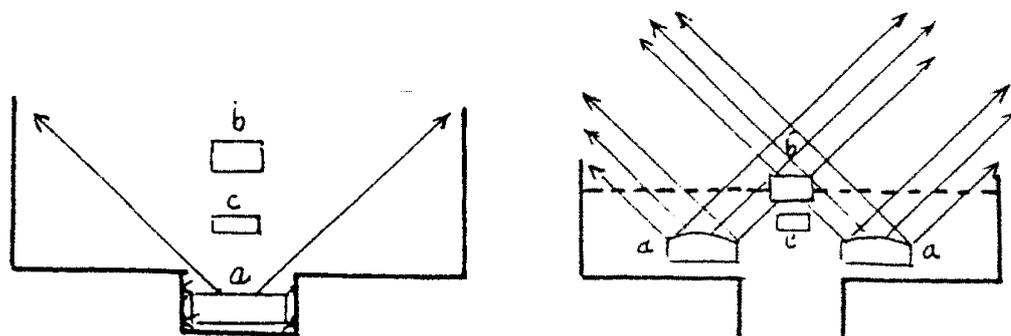


Figure 30 Conditions locales en plan d'un orgue (a=grand orgue, b=positif, c=console). Position défavorable d'un orgue enfermé dans une niche étroite (à gauche) et favorable pour le rayonnement (à droite) [84]

Afin de favoriser le rayonnement direct du son sur l'assemblée, il faut supprimer dans la mesure du possible les écrans acoustiques formés par de grandes balustrades fermées, des murs ou corniches ou par des parties du buffet lui-même lorsqu'il est divisé en plusieurs éléments. Il vaut mieux, dans ce dernier cas, disposer les éléments en largeur plutôt qu'en profondeur⁶³.

⁶¹ C'est le cas par exemple à St.-Matthieu (Lausanne) ou à St.-Maurice (Pully, où l'orgue a été ramené, lors de la récente transformation, de la galerie située derrière l'assemblée au niveau et à côté de l'assemblée). Certaines grandes églises, comme la cathédrale de Lausanne, n'utilisent, durant les cultes ordinaires, pas ou peu les grandes orgues mais un petit instrument situé près de l'assemblée.

⁶² Les transformations successives de l'orgue de la cathédrale de Lausanne ont ainsi conduit à désenclaver progressivement l'instrument (avancement dans la nef). L'implantation de l'orgue de St.-Matthieu à Lausanne dans une niche basse et étroite est un exemple à ne pas suivre.

⁶³ Pour diminuer les phénomènes d'interférence, il est préférable de fixer les orgues contre une paroi murale de l'édifice. Il y a cependant beaucoup d'endroits où l'on trouve des orgues qui sont en plein

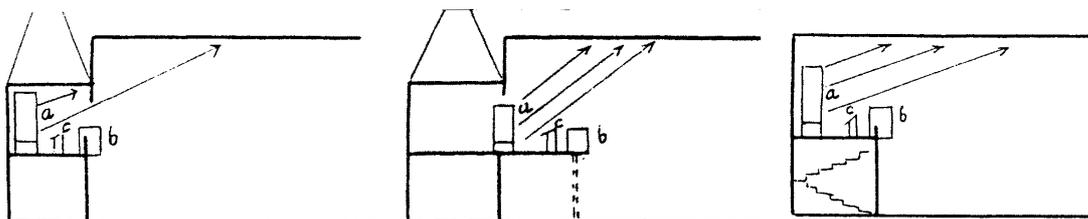


Figure 31 Conditions locales en coupe d'un orgue (a=grand orgue, b=positif, c=console). Position défavorable d'un orgue enfermé dans un volume étroit (à gauche) et favorable pour le rayonnement (au centre et à droite) [84]

Une galerie permet de moduler localement l'acoustique de façon optimale. Il est important de faire en sorte que les surfaces qui entourent l'instrument n'absorbent pas trop l'énergie acoustique émise par l'orgue, mais qu'elles mélangent les timbres et renvoient le son vers l'assemblée (cf. Figure 31). Si l'orgue accompagne d'autres musiciens (chœur ou orchestre), il est souhaitable de laisser suffisamment d'espace devant le buffet pour que ceux-ci puissent y prendre place et entendre correctement les jeux d'accompagnement⁶⁴. Le chœur ne doit cependant pas se situer directement devant les ouvertures des tuyaux. L'orgue, dans cette fonction d'accompagnement, doit soutenir la musique sans la « couvrir ». Le public ne doit pas entendre l'orgue trop fort. Si les musiciens sont situés à égale distance ou plus loin de l'assemblée que le buffet, les sons qu'ils produisent risquent d'être partiellement masqués par ceux de l'orgue.

Au sujet du buffet, Charlin [74] mentionne, en ingénieur du son critique, que « les organiers n'ont jamais pour la plupart étudié le buffet d'orgue pour obtenir un effet acoustique correct. Le premier rôle que j'attribuerais à un buffet d'orgue, c'est précisément d'empêcher les sons des tuyaux d'atteindre directement la voûte au-dessus de ces tuyaux; j'aimerais beaucoup mieux avoir une sorte de plafond incliné d'une manière bien étudiée, en staff ou en matière rigide, de façon à ce que le son ne puisse atteindre la voûte qu'assez loin en avant de l'orgue. Dans ces conditions la voûte générerait beaucoup moins ». Le buffet, comme les conditions locales

milieu d'un chœur et à une certaine distance d'un fond d'église, ou d'autres tout à fait en bordure d'une tribune qui est décollée du mur de façon assez considérable; cela n'est pas bon du point de vue du timbre de l'instrument. Selon Charlin [74], «On devrait avoir, quand on installe un orgue, tous les tuyaux de pédale contre le mur du fond, à toucher, et les autres tuyaux s'étageant par devant; or, dans les 3/4 des cas, on fait l'inverse, on met toujours les gros tuyaux de montre sur le buffet, tout à fait détachés en avant, simplement parce que ça fait joli en architecture. Les yeux ont trop souvent le pas sur les oreilles ! Il y a beaucoup d'organiers d'ailleurs qui commencent à réagir et mettent les orgues tout à fait à plat contre les murs du fond. Ainsi j'ai enregistré à Augsburg un orgue qui est entièrement disposé à plat sur un énorme mur; il n'a pratiquement pas d'épaisseur, il n'a pas de buffet, tous les tuyaux sont à découvert, c'est assez joli, et le son est clair comme du cristal. Je crois que les orgues ainsi disposées donneront toujours des résultats meilleurs, une netteté beaucoup plus grande dans les traits rapides et surtout une homogénéité dans la gamme, qui sera beaucoup plus parfaite que celle des orgues qui flottent dans l'espace à une certaine distance d'un mur et à une certaine distance de la voûte». Notons que cette conception est également issue de considérations esthétiques du milieu du XX^e siècle.

⁶⁴ Lorsque l'organiste est également maître de chapelle des chanteurs qu'il dirige depuis l'orgue devraient pouvoir prendre place entre la console et le buffet.

d'implantation, doit s'adapter par ailleurs à la réverbération de l'église. Selon Oberlinger [85], il est ainsi préférable d'avoir dans une église sèche (temps de réverbération inférieure à 2 secondes), un buffet unique et compact, alors qu'une réverbération élevée permet de disposer de plusieurs corps sonores avec des buffets plus ajourés.

L'organiste devrait pouvoir entendre de façon satisfaisante les autres intervenants (chœur, orchestre ou assemblée) ainsi que son propre instrument. Le placement de la console très près du buffet entraîne que l'organiste entend essentiellement le son direct issu des jeux les plus proches de lui. Il ne peut profiter du mélange des timbres obtenu par les multiples réflexions dans le champ diffus, ni juger précisément du volume et de l'équilibre sonore obtenu dans le public. Une console située à une certaine distance du buffet peut apparaître de ce point de vue comme préférable. La position de l'organiste devrait lui permettre ainsi d'entendre suffisamment les divers jeux d'orgue⁶⁵ sans être assourdi par eux.

6.8.1.5 Appréciation subjective de la position de l'orgue

D'après les résultats de notre enquête, il n'y a pas de différence significative entre l'appréciation des diverses positions qui sont jugées favorablement. Cela vient probablement du fait que les répondants sont habitués à la position de leur orgue. Ils n'ont peut-être pas beaucoup de point de comparaison. Ce résultat rend difficile l'appréciation des priorités par rapport aux critères de choix de la position de l'orgue [86].

Nous constatons par contre qu'une position arrière permet une meilleure homogénéité de l'appréciation générale (faible écart type entre les places) tandis qu'une position latérale engendre une forte perception de l'orientation de la source (due à l'importante différence de perception entre les deux oreilles) pour les personnes situées dans et proches de l'axe de l'orgue.

*Tableau 17 Appréciation subjective de la position de l'orgue
(dans les églises avec un seul orgue); (0) = « mauvaise », (1) = « bonne »*

Position des orgues	Appréciation de la position*	Ecart-type des moyennes (variation entre églises)	Moyenne des écarts-types (variation dans chaque église)
Latérale	0.86	0.15	0.22
Derrière	0.88	0.19	0.14
Devant	0.86	0.24	0.17
Total	0.88	0.20	0.14

* 0=mauvaise, 1=bonne

⁶⁵ J.-C. Verrey mentionne, dans sa plaquette sur le temple St.-Laurent de Lausanne, au sujet de l'orgue réalisé par la Maison Goll en 1890, que « L'organiste s'y trouvait comme enfermé dans une sorte de chambre qui l'empêchait de bien entendre le résultat de ses efforts, particulièrement lorsqu'il accompagnait un instrumentiste ou également lorsque, jouant doucement, un moteur pétaradait dans la rue Haldimand ».

6.8.1.6 Synthèse sur le choix de la position

Le choix de la position d'un orgue dans une église est loin d'être anodin. Il entraîne en effet d'importantes conséquences au niveau liturgique, ecclésiologique, musical, architectural et acoustique. Aucune position ne saurait cependant satisfaire pleinement à ce faisceau d'intérêts souvent divergents. Il faut donc se résoudre à établir un compromis en tenant compte des avantages et inconvénients des diverses positions et en établissant des priorités dans les divers critères de choix. Le survol historique du positionnement de l'orgue (ou des orgues) dans les églises nous montre ainsi que de nombreuses solutions furent adoptées au cours de l'histoire selon les besoins et les conditions particuliers (cf. §5.2). L'encombrement de l'instrument est le facteur souvent le plus décisif dans le choix de l'implantation d'un orgue.

On pourra cependant retenir qu'un emplacement dans ou à proximité du lieu de célébration (en général le chœur) est favorable du point de vue liturgique et ecclésiologique. La proximité avec les autres intervenants (chœur, instrumentistes, chantres ou assemblée) est nécessaire à une bonne cohésion musicale. Pour l'accompagnement du chant de l'assemblée, le milieu de la nef est ainsi la position la plus favorable. Une position frontale (dans le chœur) assez éloignée, défavorable pour l'accompagnement du chant communautaire et souvent problématique du point de vue architectural, est la meilleure pour les concerts. Pour favoriser les aspects acoustiques, on adoptera de préférence une position en hauteur dans l'axe de l'église, en veillant particulièrement aux conditions d'implantation locales. Une tribune au fond de la nef (à l'opposé du chœur), disposition la plus fréquente en Suisse, est la solution la plus pratique du point de vue architectural pour les orgues de grandes dimensions.

6.8.2 Conditions acoustiques souhaitables pour l'orgue

Après avoir analysé la position souhaitable de l'orgue, nous pouvons étudier les exigences acoustiques de l'écrin que constitue l'église. L'orgue fait l'objet de nombreux commentaires et recommandations quant à sa facture, son emplacement ou son adaptation à un lieu donné. Nous présenterons synthétiquement ces avis et conseils, qui sont généralement fondés sur la tradition, l'expérience ou l'analyse de principes scientifiques. Cependant, ces résultats, à l'instar de la majorité des publications dans le domaine, est le fruit de l'expérience personnelle de son auteur et repose uniquement sur quelques exemples choisis. Pour ne pas rester dans le domaine de l'hypothèse ou du simple avis, aussi pertinent soit-il, il faut compléter cette approche en la confrontant à la « réalité », dont une image peut être donnée par les résultats de notre analyse statistique. La confrontation entre appréciations subjectives issues de notre enquête et données objectives issues de nos mesurages devrait permettre de préciser les conditions souhaitables pour l'orgue.

6.8.2.1 Caractéristiques géométriques des églises de concerts

Tableau 18 *Caractéristiques physiques des églises en fonction du nombre annuel de concerts d'orgue*

Concerts annuels	Eglises	Caractéristiques physiques					Temps de réverbération (église vide) en fonction de la fréquence					
		%	Volume (m ³)	Surf. (m ²)	Haut. (m)	Places	Vol. spec. (m ³ /pers)	125	250	500	1000	2000
0	35	1684	216	6.4	215	8.4	2.0	2.2	2.4	2.3	2.1	1.8
1 à 3	32	4435	430	7.8	415	9.9	2.9	3.2	3.6	3.4	3.0	2.2
4 à 10	24	7080	568	10.4	510	11.8	3.5	3.6	3.8	3.7	3.2	2.5
>10	9	11110	1057	13.2	618	17.5	3.9	3.9	4.0	3.8	3.1	2.2

Les églises peuvent ainsi être divisées en quatre catégories égales suivant le nombre de concerts d'orgue qui s'y déroulent : les églises sans concerts d'orgue, les églises en proposant rarement (de 1 à 3 par an), assez souvent (de 4 à 10 par an) et très souvent (plus de 10 concerts par an). Le Tableau 18 ci-après montre que, d'après notre analyse statistique, le nombre annuel de concerts d'orgue est proportionnel aux caractéristiques physiques de l'église (en particulier le volume, la surface, la hauteur moyenne, le nombre de places, le volume spécifique et temps de réverbération).

L'augmentation de taille est un des facteurs qui expliquent l'accroissement du temps de réverbération de l'église (surtout aux basses fréquences) avec le nombre annuel de concerts d'orgue.

6.8.2.2 Temps de réverbération

6.8.2.2.1 Selon les musiciens

Baculard [74] expose très clairement l'importance du temps de réverbération pour une église et en particulier pour la musique d'orgue : « La principale caractéristique de l'acoustique d'une église est son temps de réverbération, qui a pour effet de brouiller tous les sons et rend très difficile l'intelligibilité de la parole. Elle oblige le prêtre à parler très lentement, avec des temps, et, si l'orgue a été adopté pour ces locaux, c'est que cet instrument compose au mieux avec la difficulté en question (...) Le temps de réverbération (élevé d'une cathédrale), on y est habitué, il fait un peu partie de la musique, c'est la "pédale" de l'instrument, la pédale du piano si vous le voulez ». Les organistes sont cependant divisés quant à la réverbération souhaitable pour la musique d'orgue. La majorité d'entre eux souhaitent ainsi une résonance flatteuse⁶⁶ mais certains privilégient plutôt la précision qui ne peut être atteinte que dans une acoustique relativement sèche⁶⁷.

⁶⁶ Beranek [29] cite le grand organiste E. Power Biggs qui affirmait « qu'un organiste prendra toute la réverbération qui lui est donnée, et il en demandera encore un peu, car l'ample réverbération fait elle-même partie de la musique d'orgue ».

⁶⁷ Baculard affirme [74] ainsi que « certains d'entre eux n'aiment pas entendre leur instrument dans une église, ils trouvent qu'une église est un très mauvais endroit pour écouter un orgue. D'aucuns,

Un temps de réverbération trop court va « étouffer » le son et transformer d'une certaine façon le timbre des jeux⁶⁸. L'impression de solennité d'une musique peut être par contre favorisée par la réverbération relativement élevée dans les églises [30]. Le manque d'absorption aux hautes fréquences (donc un temps de réverbération élevé à ces fréquences) conduit cependant à une accentuation des harmoniques donnant des timbres assez « durs » [26].

6.8.2.2 D'après la littérature scientifique

Nous avons vu que le temps de réverbération dépend essentiellement de paramètres fixes comme le volume et l'absorption moyenne des matériaux, mais aussi de paramètres variables comme l'utilisation de l'église (liturgie, concert, etc.). Rares sont cependant encore les auteurs qui précisent l'état d'occupation considéré⁶⁹. Comme nous l'avons vu précédemment pour les églises en général (cf. §6.5.1.2), le temps de réverbération souhaitable est généralement donné sous forme d'une valeur cible, mais parfois aussi par une plage [4; 6; 87], une valeur minimale [52; 88] ou maximale [60; 89]. Le temps de réverbération souhaitable est généralement donné selon une fonction logarithmique, mais parfois aussi en puissance du volume [9; 90]. Plusieurs auteurs [6; 8; 52; 87; 88] donnent des valeurs souhaitables du temps de réverbération pour la musique d'orgue sous forme de constante et donc indépendamment du volume. En ce qui concerne l'orgue, le temps de réverbération souhaitable dépend également du type de musique et de la qualité de l'interprète⁷⁰ et du type d'audition (en direct ou pour un enregistrement [58]). Il faut donc également déterminer les priorités et le meilleur compromis entre les différentes exigences.

comme Gaston Litaize, vous diront qu'ils aiment beaucoup mieux entendre leur orgue chez eux que dans une église. Or, le public n'est pas du tout de cet avis. Simplement parce qu'il est habitué à entendre de l'orgue dans une église et quand, par hasard, on lui fait entendre un orgue dans un studio de radio ou dans une petite pièce, il est souvent dérouté et déçu. Il lui manque cet effet de pédale. L'organiste, lui, entend très peu en général la réverbération de l'église. Il est " fourré " dans son orgue littéralement, entre le buffet du positif dans son dos, séparé de lui par une planche plus ou moins épaisse et plus ou moins bien jointe, et les jeux du grand orgue, de façon telle, qu'il n'entend les jeux du récit qu'à travers cette forêt de tuyaux. Ces conditions acoustiques n'ont rien à voir avec celles de l'auditeur qui est en bas dans l'église. Mais le temps de réverbération de son église ne le gêne pas du tout, il entend son orgue avec la même sécheresse que quand il travaille chez lui, sur son instrument, dans son salon. Il y est habitué, et quand on lui fait entendre son orgue dans l'église même, comme tout le monde l'entend, il ne trouve que mélange, cafouillis et confusion. Les notes brèves sont moins fortes que les sons longs car le temps de réverbération joue aussi bien à l'établissement de la note qu'à son extinction, mais en sens inverse. L'organiste est habitué à entendre de l'orgue dans des atmosphères sèches alors que l'auditeur est habitué à l'entendre dans la réverbération de l'église avec les inconvénients précités que l'organiste n'admet pas. Là encore il y a des questions d'esthétique qui jouent et il est difficile de dire s'il vaut mieux écouter l'orgue dans une église ou s'il vaut mieux l'écouter dans un studio. L'organiste vous dira qu'il préfère le studio; le public l'église. Personnellement, je préfère l'orgue dans l'acoustique réverbérante d'une église, lorsque l'œuvre a été écrite pour cela; mais, par contre, les sonates en trio de Bach ou celles de Mozart pour orgues mécaniques sont indubitablement abîmées par une forte réverbération».

⁶⁸ Suite au traitement acoustique excessif du temple de Grandvaux, le facteur l'orgue Mingot ne reconnaissait plus le timbre de ses jeux.

⁶⁹ Tennhardt et Stendel préconisent [54], pour l'orgue de l'église de St-Mariendom à Erfurt, une réverbération de 1.8 à 2.7 secondes dans l'église occupée et 3.5 à 4.0 dans l'église vide.

⁷⁰ Une réverbération élevée masquera les défauts d'un mauvais interprète alors qu'une réverbération relativement faible permettra de mieux mettre en valeur la précision d'une exécution.

Les valeurs préconisées par les divers auteurs pour le temps de réverbération souhaitable pour l'orgue sont relativement cohérentes entre elles (cf. Figure 32). A l'exception de Eggenschwiler [60] qui prend en compte des églises vides et donne donc des valeurs nettement plus élevées, **le temps de réverbération préconisé pour l'orgue est de 1.5 à 3.0 s** ce qui est relativement faible par rapport aux souhaits de beaucoup d'organistes. Seuls Lehmann et Grinn [9; 90], qui donnent une valeur souhaitable en fonction de la puissance du volume, préconisent des temps de réverbération plus élevés (entre 3 et 4.3 s) pour les grandes églises ($10'000 < V < 100'000 \text{ m}^3$).

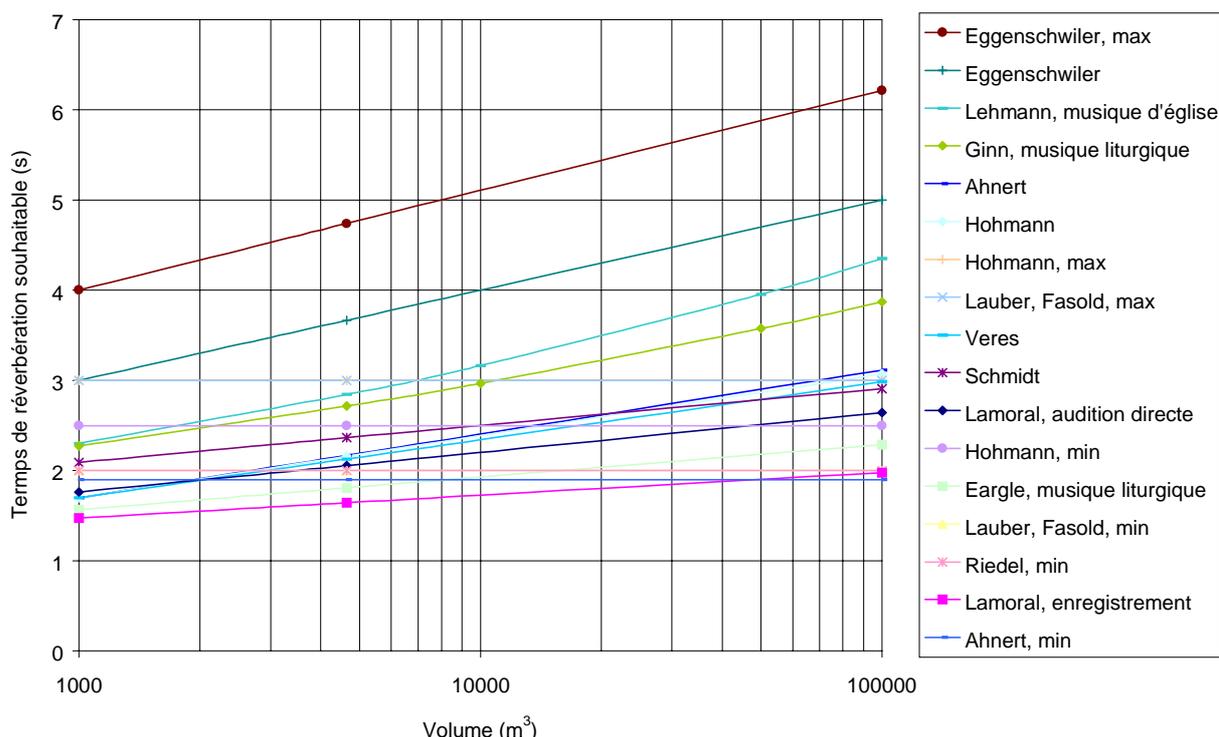


Figure 32 Temps de réverbération souhaitable pour l'orgue selon la littérature

Si l'on considère les formulations logarithmiques du temps de réverbération avec le volume, la pente des courbes, assez similaire entre les auteurs (pente moyenne $a = 0.70 \pm 0.31$), est nettement supérieure à la valeur obtenue en moyenne dans les églises étudiées ($a = 0.25 \pm 0.14$). La constante à l'origine est également plus importante pour la musique d'orgue ($y = -0.26 \pm 0.47 \text{ s}$) que pour les églises en général ($y = -0.31 \pm 0.79 \text{ s}$). La valeur moyenne, pour un volume fixe de 4645 m^3 , est de $2.69 \pm 0.92 \text{ s}$, soit nettement plus que la moyenne des temps de réverbération souhaitables pour une église de cette taille ($1.90 \pm 0.69 \text{ s}$), et à la limite supérieure de la fourchette souhaitable pour une église favorisant la liturgie.

Généralement inversement proportionnelle à la réverbération, la **clarté musicale** (C80 exprimé en dB) est une grandeur acoustique moins utilisée mais appropriée pour déterminer la qualité d'une salle pour la musique. Selon Pyshin [48], la musique instrumentale et le chant choral liturgique nécessitent une clarté supérieure à -6 dB .

Fasold et Veres [5] préconisent pour la musique, une clarté comprise entre -1 et $+3$ dB. Selon Marshall [91], la clarté (C80) souhaitable pour la musique d'orgue est de -8 à -3 dB (moyenne pour les octaves centrées à 500, 1000 et 2000 Hz). Enfin, Wroblewska [50], qui tient compte d'un compromis entre musique et parole, propose une valeur souhaitable de la clarté comprise entre -3 et $+6$ dB dans les églises où la liturgie et la musique sont très importantes et entre $+3$ et $+8$ dB si la priorité est donnée à la parole.

6.8.2.2.3 Selon notre enquête

Il est difficile de tirer des conclusions sur le temps de réverbération souhaitable pour la musique d'orgue à partir des appréciations subjectives, car les églises jugées satisfaisantes ne peuvent être isolées clairement de celles jugées insatisfaisantes (cf. Figure 33 et Figure 34).

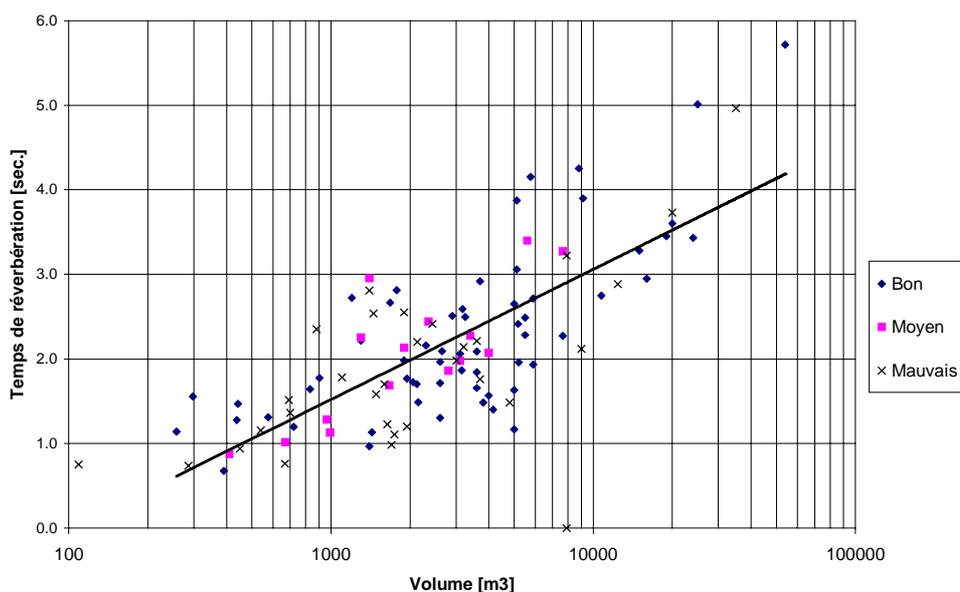


Figure 33 *Appréciation subjective de la qualité de l'acoustique de l'église pour la musique d'orgue en fonction du temps de réverbération (église vide) et du volume (1=Bon, 0.9 à 1=Moyen, 0 à 0.9=Mauvais sur l'échelle d'appréciation de 0 à 1)*

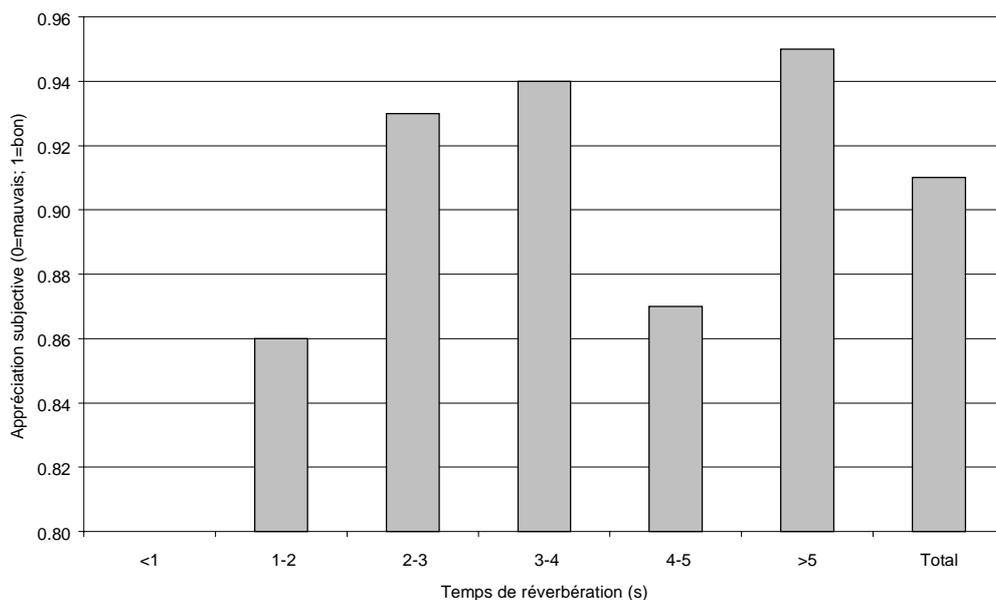


Figure 34 *Appréciation subjective moyenne de l'acoustique pour l'orgue en fonction du temps de réverbération mesuré (église vide)*

Notons que cette remarque, qui est également valable pour le chant et les concerts instrumentaux, traduit la difficulté des paroissiens, sans connaissances particulières dans le domaine musical et acoustique, à juger de l'adéquation de la réverbération de leur église aux divers types de musiques⁷¹. En fait, une analyse détaillée des résultats de l'enquête a montré [92] que l'appréciation subjective de la résonance d'une église est essentiellement influencée par le jugement de l'adéquation du lieu pour la parole, qui est par ailleurs une notion plus accessible aux répondants. On peut cependant relever sur la Figure 33 que les églises jugées moyennes ou mauvaises pour la musique d'orgue se retrouvent plutôt dans la zone des faibles temps de réverbération (<3 secondes) et des faibles volumes (<4000 m³).

Si l'on étudie l'évolution fréquentielle du temps de réverbération avec la fréquence pour les églises de concert (plus de 10 concerts d'orgue annuels), on constate que **le temps de réverbération moyen dans les églises vides est constant à 4 secondes aux basses et moyennes fréquences (<1000 Hz) et qu'il diminue progressivement aux hautes fréquences (2.2 s à 4000 Hz)**, en particulier à cause de l'absorption de l'air qui devient significative à ces fréquences dans de grands volumes. L'écart entre les églises diminue également avec la fréquence (de 2 s à 125 Hz à 0.5 s en hautes fréquences). L'occupation de l'église a cependant une influence non négligeable sur le temps de réverbération. On constate ainsi (cf. Figure 35) que lorsque l'église se remplit, le temps de réverbération diminue alors plus

⁷¹ L'appréciation des églises pour la musique est en général très positive quelles que soient les conditions de l'église (l'appréciation moyenne sur l'ensemble des églises de l'adéquation de l'acoustique à la musique d'orgue est de 0.91 sur une échelle de 0 (mauvais) à 1 (bon). Cette constatation est à l'origine du découpage asymétrique des classes (bon, moyen, mauvais) dans la figure 1.

régulièrement avec la fréquence (de 3 s à 125 Hz à 1.5 s à 4000 Hz pour une pleine occupation). On retrouve alors les valeurs données par la littérature.

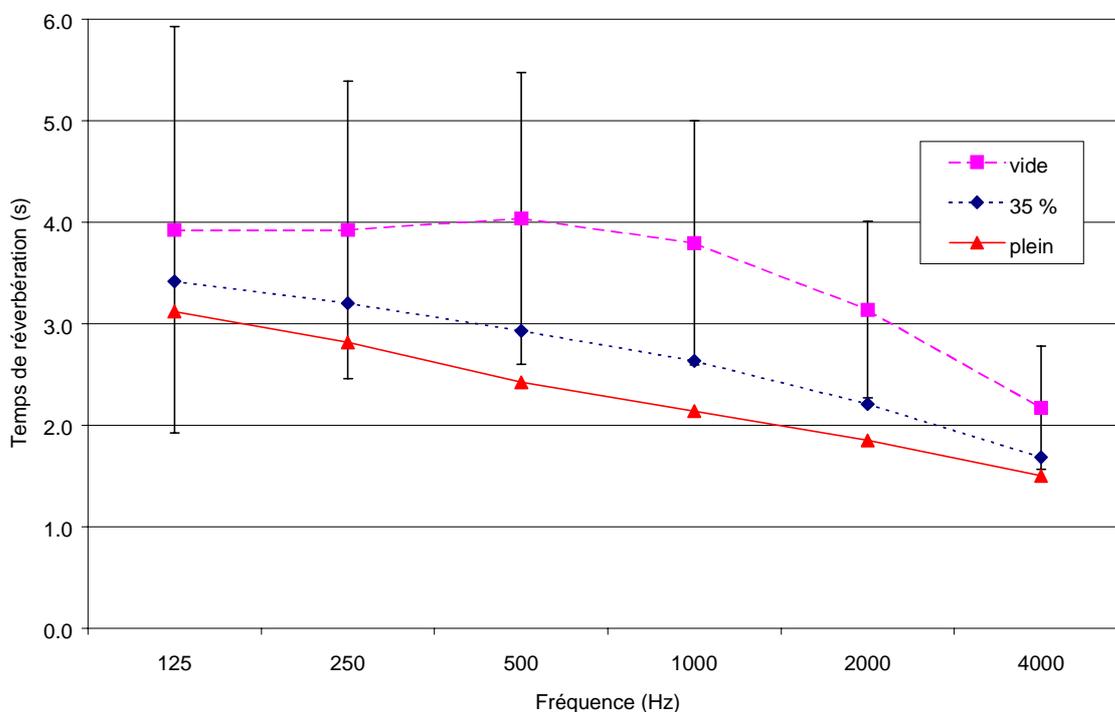


Figure 35 Temps de réverbération moyen des églises avec plus de 10 concerts annuels d'orgue en fonction de la fréquence et de l'occupation

6.8.2.3 Diffusion spatiale et temporelle

La diffusion spatiale et temporelle d'une église est aussi une des qualités importantes pour une propagation harmonieuse et homogène de la musique d'orgue. Les conditions souhaitables pour la forme des églises s'appliquent donc en particulier dans le cas d'églises où la musique d'orgue possède une grande importance. La présence d'éléments permettant de diffuser le son, comme par exemple des gros piliers ronds, sont ainsi souhaitable dans ce type d'église. La forme et les matériaux utilisés pour le plafond sont également d'une grande importance. Ainsi que le remarque Baculard [74] : « Il est bien évident que les voûtes romanes ont une réverbération supplémentaire en ce sens que la voûte en plein cintre "focalise" le son, le rabat sur le public, presque en direct; par conséquent l'acoustique de la voûte romane sera beaucoup plus mauvaise encore parce qu'elle déphasera beaucoup plus le son. La voix d'un orateur ou le son d'un orgue partent d'une part directement vers le public, en outre ce son part vers la voûte et n'atteint le public qu'ensuite. Le son qui arrivera de la voûte sera souvent beaucoup plus intense que le son direct; mais par son retard il brouille littéralement le son direct. Or le son direct est le seul qui soit vraiment bien articulé, bien clair, qui permette la perception intelligible de la parole ou d'un trait rapide de l'orgue. Dans une voûte gothique, la focalisation ne se produit pas de la même façon. Le son est rabattu par l'un des côtés de la voûte vers l'autre côté et sur les murs d'en face et vice versa pour les

deux arcs de cercle de sorte qu'il y a plusieurs réflexions avant que le son ne redescende de la voûte vers le public. Il y a une diffraction plus intense, le son qui redescend sur le public se trouve en quelque sorte un peu atténué. Finalement, on peut constater que l'église gothique a une meilleure acoustique que l'église romane. Par contre, dans l'axe de la voûte d'une église gothique, on retrouve à peu près le même défaut que dans l'axe de la voûte romane. Dès qu'on sort un peu de l'axe qui est généralement occupé par une allée, les choses s'arrangent tout de suite. Il y a donc intérêt à se trouver hors de l'axe de manière à ne pas subir les réflexions directes de la voûte».

Comme nous l'avons vu, le positionnement de l'orgue dans l'église mais également des jeux dans le buffet sont également importants pour obtenir une bonne qualité de diffusion. L'orgue dispose en effet d'une certaine directivité qui varie suivant la hauteur des sons, la position et le type de tuyaux (les chamades possèdent la directivité assez marquée des trompettes). Le positif, en général en saillie sur la balustrade de la tribune, assure un autre plan sonore, du fait de sa plus grande proximité des auditeurs.

6.8.2.4 Niveaux sonores

C'est une des fonctions de l'organiste que de choisir une registration dont non seulement le timbre mais également l'intensité est adaptée aux circonstances, de l'accompagnement d'un soliste, d'un ensemble vocal, du chant de l'assemblée ou de ses interventions en soliste.

Le bruit de fond acceptable dans une église durant un concert est 5 dB plus bas que celui autorisé durant une célébration (cf. §6.6.1). **Le bruit de fond ne devrait idéalement pas dépasser 30 dB(A) durant un concert.**

D'après notre enquête, l'appréciation subjective du volume sonore de l'orgue met en évidence des niveaux sonores trop élevés dans les églises. Les différences de niveau sonore peuvent expliquer par ailleurs les faibles variations d'homogénéité dans l'appréciation subjective de la position. En effet, nous constatons qu'un orgue latéral permet non seulement un niveau sonore adapté mais également la meilleure homogénéité de niveaux (plus faible écart entre les places). Cela implique que les orgues latéraux sont d'une part relativement petits et d'autre part que les tuyaux sont placés suffisamment haut pour que les sons émis n'assourdissent pas les personnes proches et ne soient pas trop absorbés pour les personnes éloignées. L'orgue situé devant (dans une moindre mesure derrière), dont le niveau perçu varie beaucoup d'une église à l'autre, est ressenti comme trop fort. Cette constatation est d'autant plus marquée quand des orgues de concert sont utilisées pour la liturgie. Rappelons ici que les répondants sont des paroissiens fidèles et pas forcément des amateurs de concerts d'orgues ! Les reproches formulés concernent alors surtout le choix des registrations utilisées (jugées trop brillantes et trop puissantes) pour l'accompagnement des chants.

Le fait qu'un orgue situé à l'arrière entraîne une assez mauvaise répartition des niveaux sonores peut s'expliquer en partie par la présence de la tribune sur laquelle il est généralement disposé. Celle-ci induit souvent un effet d'écran (surtout lorsqu'elle s'avance trop dans la nef), qui est sélectif en fréquence qui engendre de mauvaises places (en dessous de la tribune). Lorsqu'on s'éloigne de la zone

occupée par la tribune, sa hauteur devient alors plutôt favorable pour l'homogénéité des niveaux sonores et des timbres.

Tableau 19 *Appréciation subjective du volume sonore de l'orgue (uniquement églises avec un seul orgue ; -1=trop faible, 0=adapté, 1= trop fort)*

Position de l' orgue	Appréciation du volume sonore	Ecart type des moyennes (variation entre églises)	Moyenne des écarts types (variation dans chaque église)
Orgue latéral	-0.04	0.13	0.13
Orgue derrière	0.14	0.21	0.25
Orgue devant	0.24	0.34	0.20
Total	0.11	0.22	0.23

6.8.2.5 Synthèse sur les résultats de l'enquête

L'analyse de plus de 700 questionnaires ne permet pas de dégager une différence significative au niveau de l'appréciation subjective de la position de l'orgue. On constate cependant qu'un orgue situé latéralement par rapport à l'assemblée permet non seulement un niveau sonore adapté mais également la meilleure homogénéité de niveaux, alors qu'une position en avant ou en arrière de l'assemblée engendre un niveau sonore moins homogène et jugé plutôt trop fort par les paroissiens. Nous avons par ailleurs relevé que le nombre annuel de concerts d'orgue est proportionnel aux caractéristiques physiques de l'église (en particulier le volume, la surface, la hauteur, le nombre de places, le volume spécifique et temps de réverbération). L'appréciation de l'acoustique de l'église pour la musique d'orgue est en général très positive quelles que soient les conditions de l'église. Cette absence de sens critique de la part des paroissiens rend difficile la confrontation entre appréciations subjectives et données objectives, ce qui limite la détermination des conditions souhaitables pour les paramètres étudiés. On constate cependant que les églises jugées moyennes ou mauvaises pour la musique d'orgue présentent des temps de réverbération relativement courts (<3 s) et des faibles volumes (<4000 m³). Le temps de réverbération moyen dans les églises de concert (vides) est en général constant aux basses et moyennes fréquences (4 s en dessous de 1000 Hz) et il diminue progressivement aux hautes fréquences (2.2 s à 4000 Hz). Lorsque l'église est pleine, le temps de réverbération diminue alors plus régulièrement avec la fréquence (de 3 s à 125 Hz à 1.5 s à 4000 Hz).

6.9 Conclusion

6.9.1 Conditions souhaitables

Sur la base d'une analyse bibliographique et d'une enquête auprès des paroissiens des églises ayant fait l'objet de mesurages objectifs, nous avons pu dégager certaines conditions souhaitables dans les églises.

En ce qui concerne les caractéristiques architecturales, le volume des églises, souvent considéré comme trop important, doit être **inférieur à 2000 m³** pour permettre de favoriser les conditions d'intelligibilité. Le volume spécifique d'une église dans les conditions ordinaires d'occupation doit être de **6 à 12 m³/personne pour les activités liturgiques** et 10 à 20 m³/personne pour les concerts. La taille d'une église est optimale quand son **taux d'occupation moyen avoisine 70%**.

La forme des églises doit **favoriser la propagation du son et éviter les phénomènes de focalisation**. Il est ainsi recommandé d'éviter les formes concaves ou les grandes surfaces parallèles. Le **plafond**, qui doit présenter des bonnes caractéristiques de diffusion acoustique et qui ne doit pas être trop haut (<10 m), se révèle particulièrement important dans l'appréciation des conditions acoustiques dans les églises.

Le choix et la position des matériaux utilisés doivent être faits suivant leurs caractéristiques acoustiques. Les **éléments diffusants** (en relief ou de forme convexe) sont toujours favorables, **les matériaux réfléchissants** doivent être utilisés près des sources sonores naturelles de façon à renvoyer le son vers l'assemblée. Enfin, **les matériaux absorbants** doivent être utilisés dans les zones parasites du point de vue acoustique en particulier pour diminuer une réverbération trop élevée. Parmi ce type de mesure, les coussins sur les bancs favorisent l'intelligibilité de la parole en cas de faible occupation au détriment du chant communautaire.

Notre étude nous a également conduit à définir les valeurs souhaitables des grandeurs acoustiques. Le **temps de réverbération souhaitable** dépend principalement du type de liturgie et du volume de l'église (cf. § 6.5.1.3.1 et 6.5.2.3). Dans une église de taille moyenne (environ 4000 m³), un temps de réverbération (église occupée) de **0.8 à 1.7 s** favorisera plutôt la **parole**, alors qu'une valeur de **1.8 à 2.8 s** est plus adaptée pour une cérémonie plus liturgique privilégiant la **musique**. Le **bruit de fond** dans les églises ne devrait pas dépasser **35 dB(A)**, en particulier en l'absence de système de sonorisation.

L'**intelligibilité** de la parole dépend principalement du bruit de fond (émergence souhaitable de la parole de plus de 15 dB(A) sur le bruit de fond) et de la réverbération ($T_r < 2$ s). Une valeur de **STI > 0.45** devrait être atteinte à la majorité des places. Pour ce faire, l'utilisation d'une installation de sonorisation est souvent nécessaire dans les moyennes et grandes églises. De telles installations doivent cependant être correctement dimensionnées (ce qui est rarement le cas en Suisse) et elles introduisent des limitations non négligeables au niveau liturgique.

Au niveau de l'organisation de l'espace, les résultats de notre analyse conduisent à préconiser une **disposition centrée de l'assemblée pour favoriser l'intelligibilité** de la parole et le contact communautaire. Dans le cas de liturgie plus cléricale et axée sur la beauté de la musique plus que sur l'intelligibilité de la parole, une disposition en long se révèle plus adaptée.

La **position souhaitable de l'orgue** doit éviter les retards entre les sources sonores, ainsi que les phénomènes d'interférences. Elle doit permettre de conserver l'accordage de l'instrument et surtout favoriser une bonne répartition et un mélange satisfaisant des timbres au sein de l'assemblée. La position **sur une tribune au fond** (à l'opposé du chœur) et dans l'axe de l'église offre un bon compromis avec les exigences architecturales et acoustiques. Cet emplacement est le plus utilisé en Suisse pour les grandes orgues. Un petit orgue d'accompagnement pour la liturgie prendra plutôt place à proximité du lieu de célébration, près de la chorale et des autres instrumentistes. L'orgue doit être préférablement positionné à une certaine hauteur avec des conditions locales permettant une bonne propagation du son sur l'ensemble de l'assemblée.

6.9.2 Une nécessaire collaboration

L'aspect fondamentalement pluridisciplinaire de l'étude acoustique des églises, qui a été mis en évidence tout au long de cette étude, se retrouve naturellement dans la détermination des conditions acoustiques souhaitables dans ce type d'édifice. Pour conclure cette étude, nous préconisons donc la mise en place d'une commission de construction élargie et interdisciplinaire permettant de répondre de façon optimale aux exigences complexes et parfois contradictoires qui peuvent surgir dans le cadre d'un projet de transformation ou de construction d'une église.

Le **Maître d'Ouvrage** fixera les contraintes générales du projet, dont notamment :

- l'enveloppe budgétaire allouée au projet,
- les délais de réalisation.

Les **utilisateurs** (ministre, conseiller de paroisse, organiste, etc.) doivent fixer clairement :

- le type de liturgie utilisée (en particulier son orientation sur la parole ou la musique) et l'organisation souhaitée (disposition de l'assemblée). Selon les besoins, la participation d'un spécialiste de la liturgie, permettra de préciser et d'argumenter les choix effectués en la matière,
- les activités annexes (concerts, expositions, conférences, etc.),
- l'occupation prévisible pour le dimensionnement du nombre de places,
- le type et la position des instruments de musique, notamment de l'orgue. La participation de l'organiste et éventuellement d'un facteur d'orgue peut se révéler indispensable dans ce domaine.

L'**architecte**, qui coordonne généralement l'ensemble du projet, se déterminera sur :

- la situation géographique (environnement) du bâtiment,
- le concept architectural,
- dans le cas d'église existante, les contraintes en terme de protection des monuments historiques, tant pour le bâtiment que pour le mobilier qu'il contient.

Dans ce cas, la participation de l'autorité compétente (conservateur) et d'un restaurateur d'art peut se révéler nécessaire.

Les **mandataires techniques**, participants ponctuels, se prononceront notamment sur :

- le concept des installations techniques (type d'installations pour le chauffage, la ventilation, l'éclairage, les installations sanitaires, etc.) en précisant les niveaux de bruit occasionnés,
- les contraintes techniques (notamment le besoin et la compatibilité des mesures d'isolation thermique).

Et enfin, l'**acousticien**, mandaté si possible directement par le Maître de l'Ouvrage, donnera son avis, sur la base d'une étude circonstanciée, sur :

- Les conditions actuelles de l'église (mesurages in situ),
 - l'exposition au bruit extérieur et les besoins d'isolation du bâtiment,
 - les conditions acoustiques souhaitables en fonction de l'utilisation envisagée,
 - les mesures permettant de satisfaire ces conditions, notamment en ce qui concerne le choix et la position des matériaux,
 - les dispositifs complémentaires à utiliser (chaire, installation de sonorisation, etc.).
- Si nécessaire, il peut s'adresser à un spécialiste dans le domaine de l'électroacoustique.

Seules la réunion de toutes les personnes concernées par un projet de transformation ou de construction d'une église et la prise en compte des intérêts de ces divers intervenants peuvent alors conduire à une véritable réussite dans ce domaine.

6.10 Bibliographie du chapitre 6

- [1] **Desarnaulds, V., Eggenschwiler, K. et Bossoney, S.** (1998). *Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen*. DAGA, Zürich, pp. 710-711.
- [2] **Buluschek, P. et Desarnaulds, V.** (1999). *Appréciation subjective de l'acoustique des églises en Suisse*. Projet d'ingénieur physicien in EPFL, Lausanne.
- [3] **Jouhaneau, J.** (1997). *Acoustique des salles et sonorisation*. Lavoisier, Paris.
- [4] **Fasold, W., Sonntag, E. et Winkler, H.** (1987). *Bau- und Raumakustik*. W. Müller.
- [5] **Fasold, W. et Veres, E.** (1998). *Schallschutz und Raumakustik in der Praxis*. Verlag für Bauwesen, Berlin.
- [6] **Lauber, A.** (1981). *Raumakustik*. EPFZ, Zürich.
- [7] **Zorkoczy, L.** (1976). *Hörsamkeit in Kirchen*. Merseburger, Berlin.
- [8] **Fasold, W., Kraak, W. et Schirmer, W.** (1984). *Taschenbuch der Akustik. Band 2*. VEB, Berlin.
- [9] **Lehmann, R.** (1961). *L'acoustique des bâtiments*. PUF (collection Que sais-je), Paris.
- [10] **Eggenschwiler, K., Desarnaulds, V., Imhof, T., et al.** (2002). *Installations de sonorisation pour la parole. Recommandations pour les architectes et les Maîtres d'ouvrage*. Société Suisse d'Acoustique, Lucerne.
- [11] **Eggenschwiler, K.** (1993). *Akustische Probleme in Kirchen* EMPA, Dübendorf.
- [12] **Schwebel, H.** (1993). *A propos de la transformation et de l'utilisation des églises dans les villes*. Cahiers de l'institut romand de pastorale, Vol. 16, pp. 13-24.
- [13] **Otonello, T., Dassori, E. et Trucco, A.** (1998). *Estimation and analysis of acoustic parameters of ancient churches for concert performances*. Joint meeting of 16th ICA and 135th meeting of the Acoustical Society of America, Seattle, USA, pp. 2145-2146.
- [14] **Carvalho, A. P. O.** (1994). *Influence of Architectural Features and Styles on Various Acoustical Measures in Churches*. Thesis in Philosophy, University of Florida, USA.
- [15] **Martellotta, F.** (2001). *Caratteristiche acustiche delle chiese romaniche in Puglia*. Thesis in Dipartimento di Fisica Tecnica, Università Ancona.
- [16] **Carvalho, A. P. O.** (1994). *Relationships between objective acoustical measures and architectural features in churches*. Wallace Clement Sabine centennial symposium, Cambridge, USA, pp. 311-314.
- [17] **Carvalho, A. P. O.** (1994). *Effect of Architectural Styles on Objective Acoustical Measures in Portuguese Catholic Churches*. 5th Western Pacific Regional Acoustics Conference-WESTPRAC V, Seoul, Korea, pp. 613-618.
- [18] **Carvalho, A. P. O.** (1995). *Prediction of Acoustical Measures in Churches*. Sound & Video Contractor, Vol. 13(1), pp. 62-68.
- [19] **Carvalho, A. P. O. et Morgado, A. E.** (1996). *Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 100(4), pp. 2707.
- [20] **Carvalho, A. P. O., Morgado, A. E. et Henrique, L.** (1997). *Relationships between subjective and objective acoustical measures in churches*. Building Acoustics, Vol. 4(1), pp. 1-20.

- [21] **Carvalho, A. P. O., Morgado, A. E. et Henrique, L.** (1996). *Subjective acoustic measures and speech intelligibility in churches*. National conference on Noise Control Engineering, Bellevue, USA, pp. 633-638.
- [22] **Tennhardt, H.-P.** (1997). *Geometrische Raumakustik im Kirchenbau*. Jahrestagung Akustik, Kiel.
- [23] **Ayr, U., Cirillo, E. et Martellotta, F.** (2001). *Predicting Room Acoustical Behaviour of Coupled Rooms with Computer Simulation Techniques: a Case Study*. 17 ICA, Rome.
- [24] **Carvalho, A. P. O.** (1995). *The Sabine Equations and Coupled Spaces in Churches*. INTER-NOISE '95, Newport Beach, CA, (USA), pp. 339-342.
- [25] **Jullien, J. P.** (1989). *Mesures acoustiques dans l'abbaye du Mont St. Michel*. Etude in Centre National d'Etude des Télécommunications.
- [26] **Glover, C. W.** (1933). *Practical acoustics for the constructors*. Chapman & Hall, London.
- [27] **Shankland, R. S.** (1968). *Quality of Reverberation*. Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 43(3), pp. 426-430.
- [28] **Lane, R. N.** (1957). *Room shapes and materials determine church acoustics*. Architectural Record, pp. 191 ss.
- [29] **Beranek, L.** (1996). *Concert and Opera Halls. How they sound*. Acoustical Society of America, Woodbury.
- [30] **Joyner, J. E.** (1993). *The impact of architecture on acoustical settings for sacred music in the Episcopal parish churches of Georgia*. Thesis in Architecture, Georgia Institute of Technology, USA.
- [31] **Lachèz, T.** (1879). *Acoustique et optique des salles de réunions. Principes, observations et documents à considérer pour la disposition des salles de théâtres, amphithéâtres, concerts, temples et oratoires*. Chez L'auteur, Paris.
- [32] **Mathiez, A. et Santon, F.** (1976). *Etude acoustique d'une salle voûtée*. Revue d'acoustique, Vol. 36, pp. 51-56.
- [33] **Crunelle, M.** (2000). *Etonnante acoustique des bâtiments anciens*. Université libre de Bruxelles, Bruxelles.
- [34] **Tan, P. L.** (2000). *Requirements for worship technologies*. Technologies for worship magazine online, Vol. sept/oct.
- [35] **De Buglio, J.** (1998). *Why are church sound systems & acoustics so confusing?* JdB Sound, Canada.
- [36] **Eggenschwiler, K., Desarnaulds, V., Imhof, T., et al.** (2001). *Beschallungsanlagen für Sprache. Empfehlungen für Architekten und Bauherrschaften*. Société Suisse d'Acoustique, Luzern.
- [37] **Léwy, S.** (2001). *Acoustique industrielle et aéroacoustique*. Hermes science, Paris.
- [38] **Recknagel et Sprenger** (1988). *Heizung + Klimatechnik*. Oldenbourg Verlag, München.
- [39] **Villard** (1962). *Traité pratique de l'acoustique appliquée à la construction des bâtiments*. Sciences et Techniques, Lausanne.
- [40] **Lubman, D. et Wetherill, E. A.** (1985). *Acoustics of worship spaces*. Acoustical Society of America, New York.
- [41] **Carvalho, A. P. O., Lencastre, M. M. F. et Desarnaulds, V.** (2002). *Sound absorption of 18th-century baroque woodcarving in churches*. Internoise 2002, Dearborn (USA).

- [42] **Eggenschwiler, K.** (1999). *Aktuelle Aspekte der Kirchenakustik*. Schweizer Ingenieur und Architekt, Vol. 25.
- [43] **Bradley, J. S.** (1992). *Predicting the absorption of pew cushions*. 124th ASA meeting, New Orleans.
- [44] **Westermeyer, P.** (1991). *Acoustics for liturgy. A collection of articles of the Hymn Society in the U.S. and Canada*. Liturgy Training Publications, Chicago.
- [45] **Ballou, G.** (1998). *Handbook for sound engineers*. Focal Press, Boston.
- [46] **Mitchell, R.** (1978). *Ministry and Music*. Westminster Press, Philadelphia.
- [47] **Everest, A.** (1994). *The Master handbook of Acoustics*. 3rd ed TAB books.
- [48] **Pyshin, A., Solovejtchik, L., Tikhomirov, Y., et al.** (2001). *Acoustics of the Smolny Cathedral in St. Petersburg*. Building Acoustics, Vol. 8(1), pp. 75-82.
- [49] **Knudsen, V. et Harris, C.** (1951). *Acoustical designing in architecture*. John Wiley & Sons, New York.
- [50] **Wroblewska, D.** (2000). *Akustyka w architekturze wspolczesnych kosciolow rzymskokatolickich*. Thesis in Architecture, Polytechnika Gdanska, Gdanska.
- [51] **Doelle, L. L.** (1972). *Environmental acoustics*. McGraw-Hill, New York.
- [52] **Riedel, S. R.** (1986). *Acoustics in the worship space*. Concordia Publishing House, Saint Louis.
- [53] **Fürrer, W. et Lauber, A.** (1972). *Raum- und Bauakustik Lärmabwehr*. Birkhäuser, Basel.
- [54] **Tennhardt, H.-P. et Stendel, F.-W.** (1995). *Raumakustische Untersuchungen zum Einbau einer Hauptorgel im St. Mariendom Erfurt*. DAGA, pp. 311-314.
- [55] **Hartmann, G.** (1982). *Über den optimalen Nachhall in kleinen bis mittelgrossen Kirchen*. Applied acoustics, Vol. 15, pp. 41-48.
- [56] **Cremer et Müller** (1978). *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik*. H. Verlag.
- [57] **Zeller, W.** (1960). *Zur raumakustischen Gestaltung von Kirchen*. Lärmbekämpfung, Vol. 4(4), pp. 80-84.
- [58] **Lamoral** (1975). *Acoustique et architecture*. Masson, Paris.
- [59] **Schmidt, H.** (1996). *Schalltechnisches Taschenbuch*. VDI Verlag, Düsseldorf.
- [60] **Eggenschwiler, K.** (1991). *Optimale Nachhallzeit von Kirchen* EMPA, Dübendorf.
- [61] **Boespflug, F.-D.** (1987). *Liturgie et espace liturgique*. in *Telle église, telle parole. Remarques sur l'emplacement de la chaire à prêcher dans les lieux de culte*, pp. 19-31, Didier-Erudition, Paris.
- [62] **Lorenz, A.** (2000). *Klangalltag - Alltagsklang*, Zürich.
- [63] **Reymond, B.** (1996). *L'architecture religieuse des protestants*. Labor et Fides, Genève.
- [64] **Commissione Episcopale per la Liturgia** (1993). *La progettazione di nuove chiese*. Elle di ci, Torino.
- [65] **Viollier, L.** (1891). *Saint-Pierre ancienne cathédrale de Genève*. Association pour la restauration de Saint-Pierre, Genève.
- [66] **Lawrence, A.** (1970). *Architectural acoustics*. Elsevier, Amsterdam.
- [67] **Crocker, M. J.** (1982). *Noise and noise control*. CRC Press, Boca Raton.
- [68] **Fry, A.** (1988). *Noise control in building services*. Pergamon Press, Oxford.
- [69] **ASHAE Handbook** (1995). *Heating, ventilating and air-conditioning applications*. ASHRAE, Atlanta.
- [70] **Houtgast, M. et Steeneken, H.** (1985). *The modulation transfer function in room acoustics*. Brüel & Kjaer Technical Review, Vol. 3, pp. 3-12.

- [71] **Onaga, H.** (2001). *On the disagreement between speech transmission index (STI) and speech intelligibility*. 17 ICA, Rome.
- [72] **Bouyer, L.** (1967). *Liturgie et architecture*. Cerf, Paris.
- [73] **Chopard, P.** (1998). *Dombresson, l'orgue n'a toujours pas sa place*. L'Express, janv, pp. 9.
- [74] **Baculard, P., Guérard, J. et Poulin, L.** (1969). *Acoustique, orgue et cathédrale. Un entretien avec André Charlin*. Bulletin de l'Association des Amis de Léonce de Saint-Martin, Vol. 11.
- [75] **Thurian, M.** (1946). *Joie du ciel sur la terre - Introduction à la vie liturgique*. Delachaux et Niestlé, Neuchâtel.
- [76] **Hameline.** La Maison Dieu, Vol. 187, pp. 45.
- [77] **Laugier, M. A.** (1765). *Observation sur l'architecture*. Mardaga 1979.
- [78] **Klotz, H.** (1994). *Das Buch von der Orgel*. Bärenreiter, Kassel.
- [79] **Winckel** (1965). *Influence de l'acoustique des salles sur l'évolution du style musical*. Bulletin GAM, Vol. 11, pp. 2-11.
- [80] **Sonnaillon, B.** (1984). *L'orgue - Instrument et musiciens*. Office du livre. Ed. Vilo, Paris.
- [81] **Cavanaugh, W. J. et Wilkes, J. A.** (1998). *Architectural Acoustics*. Wiley, New York.
- [82] **Crist, E. V.** (1993). *Acoustics in the worship space: goals and strategies*. Thesis in Musical Arts, University of Cincinnati, Cincinnati.
- [83] **Audsley, G. A.** (1905). *The art of organ-building*. Dover Publications, New York.
- [84] **Beyron, G.** (1995). *L'orgue dans l'église*. Chroniques d'art sacré, Vol. 41, pp. 6-19.
- [85] **Oberlinger, W.** (1980). *Acoustics in churches : its influence on organ design*. ISO information, Vol. 21.
- [86] **Desarnaulds, V.** (2000). *De la position des orgues dans les églises. Partie 2 : Critères de choix, analyse acoustique*. La Tribune de l'Orgue, Vol. 52(2), pp. 4-13.
- [87] **Hohmann, R. et Setzer, M.** (1995). *Bauphysikalische Formeln und Tabellen*. Werner-Verlag, Düsseldorf.
- [88] **Ahnert, W. et Steffen, F.** (1993). *Beschallungstechnik. Grundlagen und Praxis*. Hirzel Verlag, Stuttgart.
- [89] **Eggenschwiler, K.** (1993). *Problèmes acoustiques dans les églises*. La Tribune de l'orgue, Vol. 45(3), pp. 3-9.
- [90] **Grinn, K. B.** (1978). *Architectural acoustics*. Bruel & Kjaer, Naerum.
- [91] **Marshall, L. G.** (1996). *An analysis procedure for room acoustics and sound amplification systems based on the Early-to-late sound energy ratio*. J. Audio Eng. Soc., Vol. 44(5), pp. 373-381.
- [92] **Desarnaulds, V. et Bulushek, M. P.** (2000). *Détermination des temps de réverbération souhaitables dans les églises par corrélation entre appréciations subjectives et mesures objectives*. Congrès Français d'Acoustique CFA2000, Lausanne, pp. 481-484.

Remerciements

Ce travail n'aurait jamais vu le jour sans les encouragements et le soutien de nombreuses personnes. Je tiens en particulier à remercier ici:

Le professeur Claude Morel pour son accompagnement enthousiaste comme directeur de thèse

Le professeur Antonio Carvalho pour sa fructueuse et intense collaboration qui a permis la mise en valeur de mes recherches.

Les personnes qui m'ont conseillé et accompagné dans les divers domaines, et en particulier:

- Pour la musicologie, et en particulier l'organologie, André Luy, Pierre-Alain Clerc, Pascal Pilloud, Serge Desarnaulds.
- Pour la théologie, Prof. B. Reymond, Jean-Michel Sordet et l'abbé Philippe Baud.
- Pour l'histoire de l'art, Prof. G. Cassina et Paul Bissegger.
- Pour l'acoustique, K. Eggenschwiler, ainsi que mes collègues du bureau d'ingénieurs Monay, Louis Kaeppli, Gilbert Monay et Christophe Curchod.

Les étudiants qui ont collaboré activement à la récolte et l'analyse des données de base lors de travaux académiques à l'EPFL:

- Simon Bossoney (projet d'ingénieur, 1997, mesurages objectifs),
- Philipp Buluschek (projet d'ingénieur, 1998, évaluations subjectives),
- Yves Loerincik (travail de diplôme, 1999-2000, vases acoustiques),
- Pauline Chauvin (stage 2000, chaires et abat-voix),
- Christine Taillefert (hors projet, 2001, analyse des liturgies).

Les relecteurs attentifs, Anne Desarnaulds (+saisie des images), Marlène Curchod, Magali Bossy, Daniel Nusslé ainsi que Marlène Sommer, secrétaire du Prof. Morel, Tomas Mikulas pour la conception graphique.

Les personnes et organisations qui m'ont apporté un soutien financier ou logistique:

- L'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, et en particulier le Prof. Jean-Claude Badoux, Président honoraire,
- Le bureau d'ingénieur Gilbert Monay,
- La fondation Ernest Dubois (Prix Conservation du Patrimoine 2001),
- La Société Suisse d'Acoustique (SSA)
- L'Université de Porto, Portugal
- l'Etat de Vaud (Service des bâtiments et Section des monuments historiques)
- La fondation des constructions paroissiales protestantes de l'EERV
- Le monastère de Gêronde (Sierre)

Et enfin, mais non des moindres, à Dieu qui pourvoit.

Annexe A

Listes des publications, conférences et interviews de l'auteur dans le domaine de l'acoustique des églises

Liste de publications

- [1] **Desarnaulds, V.** (1998). *Acoustique et liturgie. Essai d'analyse des rapports entre les contraintes acoustiques et la théologie du culte*. Rapport du Séminaire de Culture Théologique, Lausanne.
- [2] **Desarnaulds, V.** (1999). *Les sièges, empreintes de l'Eglise, révélateurs de la liturgie*. Bulletin du Séminaire de Culture Théologique Vol 11(1), pp. 15-22.
- [3] **Desarnaulds, V.** (2000). *De la position des orgues dans les églises. Partie 1 : Survol historique*. La Tribune de l'Orgue Vol 52(1), pp. 18-26.
- [4] **Desarnaulds, V.** (2000). *De la position des orgues dans les églises. Partie 2 : Critères de choix, analyse acoustique*. La Tribune de l'Orgue Vol 52(2), pp. 4-13.
- [5] **Desarnaulds, V.** (2000). *Enquête sur les orgues dans les églises en Suisse*. La Tribune de l'Orgue Vol 52(4), pp. 20-26
- [6] **Desarnaulds, V. and Y. Loerincik** (2001). *Vases acoustiques dans les églises du Moyen Age*. Moyen Age. Zeitschrift des Schweizerischen Burgenvereins. Vol 6(3), pp. 65-72.
- [7] **Desarnaulds, V. et Carvalho, A. P. O.** (2001). *Plafonds d'église, survol historique et remarques acoustiques*. Revue TRACES, No 23, pp. 12-17.
- [8] **Desarnaulds, V., Carvalho, A. P. O. et Monay, G.** (2002). *Church acoustics and the influence of occupancy*. Building Acoustics, Vol. 9(1), pp. 29-47.
- [9] **Eggenschwiler, K., V. Desarnaulds, et al.** (2002). *Installations de sonorisation pour la parole. Recommandations pour les architectes et les Maîtres d'ouvrage*. Société Suisse d'Acoustique, Luzern, 94 p.
- [10] **Desarnaulds, V.** (2002). *Paroles et musiques : Analyse de la durée objective des interventions durant les célébrations dominicales*. Cahiers de l'Institut Romand de Pastorale, Vol. 43, pp. 3-15.
- [11] **Desarnaulds, V.** (2002). *Acoustique des temples: la sonorisation n'est pas toujours une panacée*. Le Protestant, Vol. 6(juin-juillet), pp. 5.

Liste des conférences
(avec publication dans les actes des congrès)

- [1] **Desarnaulds, V.**, Eggenschwiler, K; et al., *Studie zur Raumakustik von Schweizer Kirchen*. DAGA98, Zürich, 24 mars 1998.
- [2] **Desarnaulds, V.** *Etude de l'acoustique des temples vaudois*. Assemblée générale de la fondation des constructions paroissiales protestantes. Lausanne, 13 mai 1998.
- [3] **Desarnaulds, V.** *Acoustique du temple St. Paul de Villeneuve*. Journées de Printemps de la Société Suisse d'Acoustique. Lausanne, 12 juin 1998.
- [4] **Desarnaulds, V.** *Détermination des temps de réverbération souhaitables dans les églises par corrélation entre appréciations subjectives et mesures objectives*. 5^{ème} Congrès Français d'Acoustique CFA2000. Lausanne, 5 septembre 2000.
- [5] **Desarnaulds, V.** *Etude de la position des orgues dans les églises*. Journées de Printemps de la Société Suisse d'Acoustique. Lugano, 26 mai 2000.
- [6] **Desarnaulds, V.** *Vases acoustiques dans les églises en Suisse*. Colloque des historiens de l'art monumental régional. UNIL, Lausanne, 26 janvier 2001.
- [7] **Desarnaulds, V.**, Carvalho A. *Analysis of the reverberation time values for churches according to country and architectural style*. ICSV 8th, Hongkong. 2-6 juillet 2001.
- [8] **Desarnaulds, V.**, Carvalho A. *The effect of occupancy in the speech intelligibility in churches*. Internoise 2001, La Haie, 26-29 août 2001.
- [9] **Desarnaulds, V.**, Chauvin P, Carvalho A. *Acoustic effectiveness of pulpit reflector in churches*. ICA 2001 Rome, 2-7 septembre 2001.
- [10] **Desarnaulds, V.**, Loerincik Y. et Carvalho A. *Effectiveness of acoustic pottery in churches*. Noise Con. 29-31 octobre 2001.
- [11] Chauvin P.; **Desarnaulds, V.** *Chaires et abat-voix : Mythe ou réalité acoustique ?* Journées d'Automne de la Société Suisse d'Acoustique. Lucerne, 30 novembre 2001.
- [12] Carvalho, A. P. O., **Desarnaulds, V.** et Loerincik, Y. (2002). *Acoustic behaviour of ceramic pots used in middle age worship spaces - A laboratory analysis*. 9th International Congress on Sound and Vibration (ICSV), Orlando (USA).
- [13] **Desarnaulds, V.** et Carvalho, A. P. O. (2002). *The liturgical conditions of Catholic and Reformed celebrations and their relationship with the architectural and acoustic characteristics of the churches*. Forum Acusticum, Seville.
- [14] Carvalho, A. P. O., Lencastre, M. M. F. et **Desarnaulds, V.** (2002). *Sound absorption of 18th-century baroque woodcarving in churches*. Internoise 2002, Dearborn (USA).

Liste des interviews (vulgarisation)

- [1] **Jungo, C.** (2001). *Cacophonie dans les églises suisses*. Echo magazine. 8 février 2001. pp. 13-15
- [2] **Jungo, C.** (2001). *Cacophonie dans les églises suisses*. La liberté, 13 février 2001 pp. 35.
- [3] **Jungo, C.** (2001). *Mieux entendre dans les églises*. Echo romand. 16 mars 2001.
- [4] **Beacher, A.** (2001). *Cacophonie dans les églises suisses. Interview de Victor Desarnaulds, Acousticien*. Radio Suisse Romande la 1ère. Emission Hautes fréquences. 1 avril 2001.
- [5] **Müller, W.** (2001). *Gut für das Orgelspiel, aber schlecht für die Predigt*. Katholische International Pressagentur (KIPA) Vol 121, pp. 3-5.
- [6] **Cesalli, F.** (2001). *Acoustique des églises. Interview de Victor Desarnaulds, Acousticien*. Télévision Suisse Romande. Emission Verso. 16 mai 2001.
- [7] **Müller, W.** (2001). *Die Konfession macht den Ton*. Sonntag. 28.6.2001.

ANNEXE B

VASES ACOUSTIQUES DANS LES EGLISES EN SUISSE

On dénombre plus de vingt églises en Suisse comportant des poteries acoustiques [1]. Les édifices concernés, qui datent du XI^e (Emmerich et Burgenfelden) au XVII^e siècle (Lucerne), sont principalement situés dans le nord et l'ouest de la Suisse. Nous présentons brièvement ci-après, par ordre alphabétique, les églises suisses comportant des vases acoustiques.



Figure 1 : Carte de la Suisse avec les emplacements des églises possédant des vases acoustiques.

Baden (AG) : église des Trois Rois

C'est en 1895 que J. R. Rahn [2] mentionne des niches dans l'église des Trois-Rois, situées au-dessus des fenêtres et contenant des récipients dont le fond est ouvert [3] (fig. 2).

Bâle (BS): église des Franciscains

C'est également J. R. Rahn qui décrit pour la première fois en 1880 [4] l'existence de vases acoustiques dans cette église de la fin du XII^e siècle. Des cruches ventrues, présentant une ouverture de 7.5 cm, sont situées, par groupe de trois, entre les arcs de la voûte, au niveau du pendentif. Leur fonction acoustique est cependant controversée [5]. Lors d'une restauration effectuée à la fin du XIX^e siècle, Holzach a trouvé deux vases

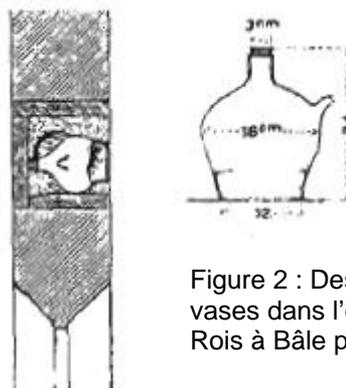


Figure 2 : Description des vases dans l'église des Trois Rois à Bâle par Rahn [4]

acoustiques [6]. Ces vases, décrits par Pfeifer [3], ont une hauteur et une largeur de 14 cm et une ouverture d'environ 5 cm. Leur forme particulière, semblable à une poire, ne se retrouve pas dans la vaisselle utilitaire

Bienne (BE) : église paroissiale

On trouve dans la nef du XV^{ème} siècle de cette église 8 pots acoustiques situés dans les murs au-dessus des fenêtres ainsi que 5 ouvertures (contenant peut-être également des vases) réparties dans les voûtes.

Bischofzell (TG) : chapelle de la Tous-les-Saints.

Dans le mur nord figurent trois vases. Plusieurs interprétations ont été formulées à propos de la fonction de ces vases, en particulier par Knöpfli [7]. Selon lui, ces pots furent mis en place pour améliorer la ventilation ou l'évacuation de l'humidité, plutôt que pour des raisons acoustiques. Les trois pots ont été cassés lors d'une restauration en 1968.

Diessenhofen (TG) : église paroissiale St. Denis.

En 1968/69, des vases situés à environ six mètres du sol dans le chœur, ont été dégagés (et cassés). Six sont présents dans le mur nord et trois dans le mur sud. Ils étaient emmurés avec l'embouchure contre l'intérieure de l'église et placés à des intervalles variant entre 1.80 et 2.45 m.

Gelterkinden (BL) : église paroissiale

Ewald a décrit et relevé [8; 9] les nombreux pots acoustiques dans les murs (aux angles et sur les fenêtres de cette église construite entre 1480 et 1490. Les peintures murales intègrent remarquablement les ouvertures visibles de ces pots [10] (fig. 3).



Figure 3 : Position et intégration dans les peintures des vases acoustiques dans l'églises de Gelterkinden [9-10]

Grandson (VD) : église Saint-Jean

On dénombre 27 vases en terre cuite rouge, non vernissés, répartis dans les voûtes de l'église (fig. 4). Dans le chœur du XIV^e siècle, les vases semblent être d'origine, alors qu'ils ont été insérés après coup dans la maçonnerie plus ancienne de la nef (XI^e-XII^e siècle). Il s'agit de pots utilitaires de céramique à fond plat d'une hauteur intérieure de 7 à 18 cm avec une ouverture de 7 à 8.3 cm [11], [12]. Epars [13] justifie la mise en place de ces vases par le fait que les voûtes sont faites de tuf, pierre poreuse, acoustiquement très absorbante.

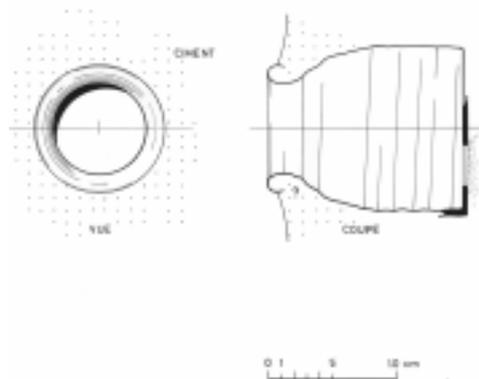


Figure 4 : Relevé d'un des pots de l'église de Grandson [11]

Granges-près-Marnand (VD) : église Ste Marie

Lors des recherches archéologiques de 1971-1972, Stöckli [14] a relevé 7 vases dans la maçonnerie d'origine du chœur gothique du XIII^e-XIV^e siècle, encastrés dans des murs verticaux (fig. 5). Un huitième trou n'est qu'un trou d'échafaudage. Il est possible, vu la forme allongée particulière des vases

(diamètre de 7 à 11 cm pour une hauteur d'environ 21 cm), qu'ils aient été fabriqués spécifiquement dans le but d'améliorer l'acoustique de l'église [11]. Certains vases sont particulièrement fins (1 mm d'épaisseur par endroits). Mis à part deux d'entre eux, les pots sont placés à une faible hauteur (env. 3 m).

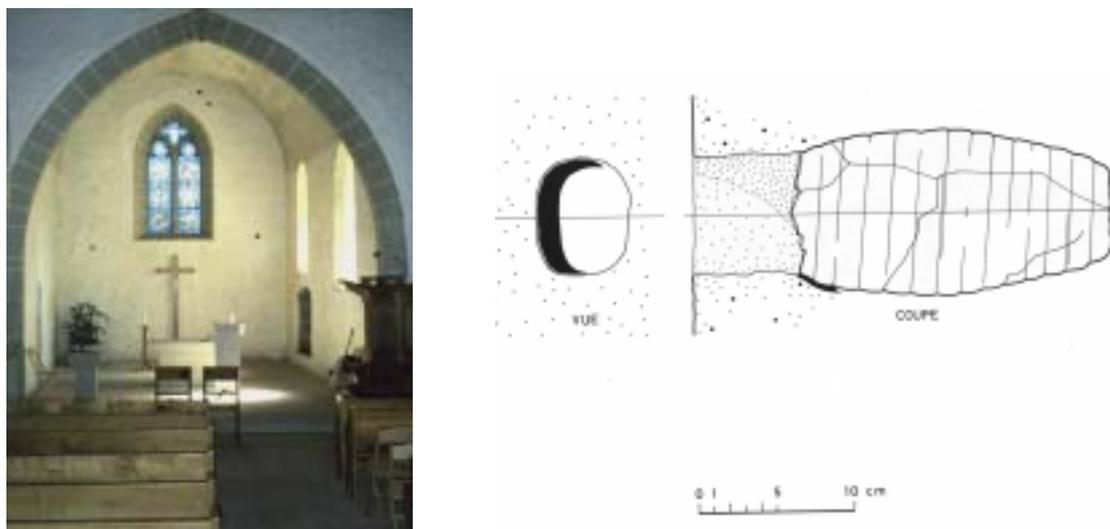


Figure 5 : Eglise de Granges-Marnand avec le relevé d'un vase [11]

Jussy (GE) : église paroissiale

Une cruche de 28 cm de hauteur et diamètre, en céramique vernissée vert, avec deux anses a été mise à jour lors d'une restauration en 1973. Ce pot est placé dans le chœur datant du XV^e siècle [15].

Lucerne(LU) : église Sainte-Anne « im Bruch »

Dans le chœur du début du XVII^e siècle, on dénombre 17 pots emmurés. Cinq sont situés dans l'abside, les douze autres au-dessus et sur les côtés des fenêtres [16; 17].

Lutry (LU) : église paroissiale

En 1587, on monta des ponts dans le temple de Lutry afin que le maçon Jacques Bodmer puisse « fayre des pertuis ès vottes du templ, afin que la parole de Dieu qui y est annoncée soit tant plus facilement entendue ». On décide toutefois en 1791 de fermer les "trous ovales de la voûte du temple" [18].

Oberkirch près de Frauenfeld (canton de TG): église paroissiale

Dans le chœur du XIII^e s., on trouve 4 vases sur la façade antérieure, deux sur le mur sud et 9 à mi-hauteur sur le mur nord. Ces vases sont déjà décrits en 1829 par Vögelin [19]. En 1931/32 on a découvert six nouveaux vases sur le côté ouest,



Figure 6 : Vases acoustiques dans les églises de Oberwinterthur (1 et 2) et Oberkirch près de Frauenfeld (3 et 4) [6]

arrangés de manière symétrique autour d'une fenêtre. Trois vases au nord (au dessus de la porte de la sacristie) et trois au sud furent encore mis à jour [20]. Les vases ont une forme renflée avec un important goulot (fig. 6).

Oberwinterthur (ZH) : église Saint-Arbogast

Le musée régional de Winterthur possède trois vases, deux petits et un plus grand, retrouvés lors de la restauration de l'église en 1932. Tous les vases, déjà découverts en 1877, étaient situés dans les voûtes et le mur du chœur [21; 22]. Pas moins de 83 vases, de divers types, ont été relevés par Schnyder [23] (cf. figure 7), qui a également étudié précisément leur positionnement, qui suit des règles symboliques, sur le mur du fond du chœur.



Figure 7 : Vase acoustique à 3 pieds de l'église d'Oberwinterthur [23]

Porrentruy (JU) : chapelle St-Michel

Dans cette chapelle de la première moitié du XV^e siècle, on trouve six vases intégrés dans les peintures murales [24; 25].

Rein près de Brugg (AG): église Saint-Leodegar

Lors de la démolition de l'ancienne église romane en 1863 on a découvert, près de la fenêtre du chœur (fin XV^e siècle), sous la brique et le plâtre, plusieurs vases acoustiques, décrits par Haller [26].

Rheinfelden (AG): église Saint-Jean

Dès 1881, J. R. Rahn mentionne les vases acoustiques murés dans le chœur de cette église, sous le plafond. Ils ont été répertoriés lors de la restauration de 1950 et sont encore visibles sur place [27-29].

Riehen (BL): église paroissiale

Lors des fouilles effectuées en 1942, une niche de 0.95 sur 0.85 m a été mise à jour sous l'ancien sol de l'église. Une vingtaine de vases y avaient été déposés lorsque le mortier était encore frais [30-32].

Stetten (SH) : église du monastère de Gnadental

En 1898, des vases acoustiques murés dans les voûtes de l'église ont été mis à jour [3]. Les cavités de ces vases, presque remplies de sciure, ont été obturées avec du crépi.

Syens (VD) : église paroissiale Saint-Martin

L'église de Syens possède une nef de 1787 et un chœur datant du XIII^e siècle, voûté en tuf, dans lequel on a découvert, lors de la restauration de 1897, cinq vases en terre cuite, soit, au nord, 3 pots de céramique utilitaire (hauteur de 14.2 à 17.6 cm, orifice de 8.6 à 10.2 cm) et au sud, une cruche. Un des pots a été alors dégagé de la maçonnerie, mais a été perdu. A une époque inconnue, ces pots ont été fermés avec des fragments de brique. Trois vases sont en bon état, le dernier n'a pas de fond [11; 33-35].

Villette (VD): église paroissiale Saint-Saturnin

L'église de Villette possède un chœur datant des XIII^e-XIV^e siècles. Les vases acoustiques, qui étaient au nombre de cinq, ont été découverts par Albert Naef lors de la restauration de 1927. Tous les pots en céramique étaient utilitaires. L'un

d'eux, extrait à cette époque pour servir de modèle à l'ameublement du château de Chillon, est conservé au Musée cantonal d'histoire et d'archéologie (cf. figure 8). Parmi les quatre vases encore en place, qui ont chacun une forme différente, trois sont en bon état, le quatrième est fêlé [11; 34-36]. Dans le berceau nord, on trouve, à 3.8 m de hauteur, deux pots en terre cuite rouge, avec un vernis brun-jaune à l'intérieur. Au sud, les deux autres vases, de même matériau et situés également à une hauteur de 3.8 m, se trouvent dans la maçonnerie d'origine et sont intégrés dans la peinture murale du XV^e siècle.



Figure 8 : Vase l'église de Villette conservé au Musée historique de Lausanne.

Zurich (ZH) : Eglise dominicaine Ötenbach

68 vases sont murés sous le plafond en bois. Les embouchures sont visibles et incorporées dans la décoration du XIV^e siècle (cf. figure 9). Les vases ont été disposés en zigzag sur deux rangs [37-41].

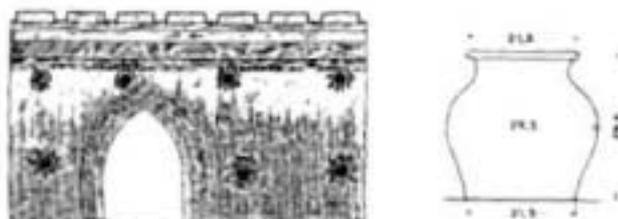


Figure 9 : Description des vases et de leur position dans l'église dominicaine de Zurich [39]

Références

ASGA : Anzeiger für schweizerische Geschichte und Altertumskunde, Zurich 1855-1867

ASA : Anzeiger für schweizerische Altertumskunde, Zurich 1868-1938

- [1] **Stöckli, W.** (1979). "*Keramik in der Kirche des ehemaligen Augustiner-Chorherren-Stiftes in Kleinlützel.*" Archäologie des Kantons Solothurn Vol (1), pp. 14-48.
- [2] **Rahn, J. R.** (1895). "*Schalltöpfe aus der ehemaligen Kapelle der hl. Drei Könige in Baden.*" ASA Vol 7, pp. 442-443.
- [3] **Pfeifer, H.** (1904). "*Schallgefässe in mittelalterlichen Kirchen.*" Die Denkmalpflege Vol 6, pp. 88-90 et 128-130.
- [4] **Rahn, J. R.** (1880). ASA Vol 4, pp. 97.
- [5] **Stehlin, K.** (1895). ASA Vol 7, pp. 462.
- [6] **Holzach, F.** (1905-6). "*Zwei Schalltöpfe aus der Barfüsserkirche in Basel.*" ASA Vol 6, pp. 23.
- [7] **Knöpfli, A.** (1962). Die Kunstdenkmäler des Kantons Thurgau Vol 3, pp. 177.
- [8] **Ewald, J.** (1969). "*Ein Schalltopf aus der Gelterkinder Kirche.*" Baslerbieter Heimatblätter Vol 34(3), pp. 385-390.

- [9] **Ewald, J.** (1973). "Die Ausgrabungen in der Kirche zu Gelterkinder 1969." Baslerbieter Heimatbuch Vol 12, pp. 232-281.
- [10] **Gesellschaft für schweizerische Kunstgeschichte** (1998). *Kunstführer Kirche Gelterkinden - Wandmalereien* Internet http://www.baselland.ch/docs/kultur/kf_gelterkinden/wandmalereien.htm.
- [11] **Stöckli, W. and F. Wadsack** (1999). *Vases acoustiques dans le canton de Vaud.*, Atelier d'Architecture Médiévale SA, Moudon.
- [12] **Hahnloser, H. R.** (1952). "L'ancien prieuré Saint-Jean de Grandson." congrès archéologique Vol 90, pp. 283-293.
- [13] **Epars, R.** (1995). *Grandson église de Saint-Jean.* Paroisse de Grandson.
- [14] **Stöckli, W.** (1973). "Recherches archéologiques dans l'église de Granges-près-Marnand." *Helvetia Archaeologica* Vol 4, pp. 92-105.
- [15] **Bonnet, C.** (1977). "L'église de Jussy." *Geneva* Vol 25, pp. 43, fig. 40 et 41.
- [16] (1895). *ASA* Vol 7, pp. 442-443.
- [17] (1866). *ASGA* Vol 12, pp. 37.
- [18] **Grandjean, M.** (1990). *Lutry Arts et monuments - Du XIe au début du XXe siècle.* Commune de Lutry.
- [19] **Vögelin, S.** (1829). in *Das alte Zürich.* Vol, pp.322-323., Zürich.
- [20] **Knöpfli, A.** (1950). *Die Kunstenkmäler des Kantons Thurgau* Vol 1, pp. 76.
- [21] (1863). *ASGA* Vol 9, pp. 69-70.
- [22] **Dejung, E. and R. Zürcher** (1952). *Die Kunstdenkmäler des Kantons Zürich* Vol 6, pp. 292.
- [23] **Schnyder, R.** (1981). "Die Schalltöpfe von St. Arbogast in Oberwinterthur." *Revue suisse d'art et d'archéologie* Vol 38.
- [24] **Folletête, E.** (1939). in *La paroisse de Porrentruy et son église Saint-Pierre.* Vol.
- [25] **Sennhauser, H. R.** (1963). *Pruntrut. Pfarrkirche St-Pierre.*
- [26] **Haller, E.** (1869). "Schalltöpfe." *ASA* Vol 1, pp. 31.
- [27] **Rahn, J. R.** (1881). "Kunstgeschichtliches aus Rheinfelden." *Allgemeine Schweizer Zeitung.*
- [28] **Riggenbach, R.** (1950). *Die Johanniterkapelle in Rheinfelden.* in *Die Johanniterkapelle und ihre Wandbilder.* Vol, pp.18-31., Aarau.
- [29] **Senti, A.** (1954). "Stadt Rheinfelden." *Schweizerische Kunstführer* Vol, pp. 7-8.
- [30] **Laur, R. and H. Reinhardt** (1943). "Die Kirche von Riehen." *ZAK* Vol 5, pp. 129-148.
- [31] **Berger, L.** (1963). in *Die Ausgrabung am Petersberg in Basel.* Vol, pp.46-47., Basel.
- [32] **Lobbedey, U.** (1968). *Untersuchungen mittelalterlicher Keramik,* Berlin.
- [33] (1976). in *Kunstführer für die Schweiz.* Vol Band 2, pp.158., Bern.
- [34] **Decollogny, A.** (1971). in *Cent églises vaudoises.* Lausanne.
- [35] **Loerincik, Y.** (2000). *Etude sur les vases acoustiques.* Thèse in Département de Physique EPFL, Lausanne, 107 p.
- [36] (1976). in *Kunstführer für die Schweiz.* Vol Band 2, pp.127-128, Bern.
- [37] **Vögelin, S.** (1829). in *Das alte Zürich.* pp.321-322, Zürich.
- [38] (1863). "Über Schalltöpfe in mittelalterlichen Kirchen." *ASGA* Vol, pp. 69-70.
- [39] **Rahn, J. R.** (1869). "Von dem chor der Oetenbacher Kirche." *ASA* Vol 1, pp. 26-31.
- [40] **Rahn, J. R.** (1903). "Wandgemälde im chor der Oetenbacher Kirche in Zürich." *ASA* Vol 5, pp. 150-156.
- [41] **Rahn, J. R.** (1895). *ASA* Vol 7, pp. 442-443.

ANNEXE C

LISTE DES SYMBOLES UTILISES

A (m^2)	Section extérieure (l'ouverture) du col
a	Pente d'une régression linéaire
A_a (m^2)	Section efficace d'absorption acoustique
A_{abs} (m^2)	Aire d'absorption acoustique correspondante
A_{pers} (m^2)	Aire d'absorption acoustique équivalente moyenne par personne
A_m (dB)	Niveau sonore maximum
A_a^{cloi} (m^2)	Section efficace d'absorption acoustique du vase cloisonné
A_s (m^2)	Section efficace de diffusion
B (m^2)	Section intérieure du col d'un vase
b (m)	Rayon du col d'un vase
c (m)	Vitesse du son
C_a ($m^4 kg^{-1}$)	Compliance acoustique
C_{50} (dB)	Clarté (rapport entre l'énergie précoce (50 premières millisecondes) et tardive (après 50 millisecondes))
D_{50}	Définition (Deutlichkeit)
d (m)	Hauteur du résonateur du fond jusqu'à l'ouverture
D_{as} (m)	Distance entre la source et le bord de l'abat-voix
E_{abs} (J)	Energie absorbée par un vase
E_{inc} (J)	Energie incidente
f (Hz)	Fréquence
f_r (Hz)	Fréquence de résonance
h ou H (m)	Hauteur
H_a (m)	Hauteur de l'abat-voix
H_r (m)	Hauteur du récepteur (tête auditeur)
H_s (m)	Hauteur de la source
j	Coefficient multiplicateur de courbe de tendance en puissance
I (W/m^2)	Intensité acoustique
k (m^{-1})	Vecteur d'onde
l (m)	Longueur du col
l_c (m)	Correction de bout pour le col d'un vase
l_e (m)	Longueur effective du col d'un vase
L_{eq} (dB)	Niveau sonore équivalent (moyenne énergétique)
L_{Aeq} (dB)	Niveau sonore équivalent pondéré A
l_v	Facteur de forme
l_{01}, l_{02} (m)	Contribution interne et externe de la correction de bout d'un vase
L (m)	Longueur
L_{col} (kgm^{-4})	Inductance acoustique
M (kg)	Masse
$m(f)$	Fonction de transfert de la modulation (MTF)
n	Puissance de courbe de tendance en puissance
NC (dB)	Noise Criteria
p (Pa)	Pression acoustique

P (Pa)	Amplitude de la pression
Q	Facteur de qualité
r	Coefficient de corrélation linéaire
R ²	Coefficient de détermination
R _a (kg/m ⁴ s)	Résistance acoustique
R _{max} (m)	Rayon maximal de la cavité
R _{visc} (kg/m ⁴ s)	Résistance acoustique due à la viscosité
R _{ray} (kg/m ⁴ s)	Résistance acoustique de rayonnement
RASTI	RApid Speech Transmission Index
S (m ²)	Surface du col
S ₁ (m ²)	Surface du col au point A
S ₂ (m ²)	Surface du col au point B
S _s (m ²)	Surface au sol
S _{tot} (m ²)	Surface totale de l'église (murs, sol, plafond)
S/N (dB)	Emergence sur le bruit de fond (rapport Signal sur Bruit)
S _{eff} (dB)	Emergence équivalente
STI	Speech Transmission Index
t (°C)	Température
Tr ou T (s)	Temps de réverbération (en général la moyenne des octaves centrées sur 500 et 1000 Hz)
Tr,n (s)	Temps de réverbération normalisé (à volume constant)
Tr _{opt} (s)	Temps de réverbération souhaitable (optimum)
Tr,p ou T _{occ} (s)	Temps de réverbération des églises pleines (occupées)
Tr,v (s) ou T _{inocc}	Temps de réverbération des églises vides (inoccupées)
U (m ³ /s)	Débit dans le col d'un vase
V (m ³)	Volume
V _c (m ³)	Volume du col d'un vase
V _{ref} (m ³)	Volume de référence
V ₀₁ (m ³)	Volume de l'élongation hypothétique du vase
x (cm)	Coordonnée axiale d'un vase
y	Ordonnée à l'origine d'une régression linéaire
X = Sx (cm)	Déplacement volumique dans le col
X _h	Solution de l'équation homogène.
X _p	Solution particulière de l'équation différentielle.
Z _a (Ω _a)	Impédance acoustique.

Lettres grecques

α	Coefficient d'absorption
Δl (m)	Différence de chemin (entre son direct et son réfléchi)
Δt (ms)	Retard de réflexion (entre son direct et son réfléchi)
ε	Coefficient numérique pour la correction de bout totale d'un vase
ε ₁	Coefficient numérique pour la correction de bout extérieure d'un vase
ε ₂	Coefficient numérique pour la correction de bout intérieure d'un vase
μ (Pa·s)	Coefficient de viscosité de l'air
γ (°)	Inclinaison de l'abat-voix
ρ (kg/m ³)	Masse volumique de l'air
σ	Ecart type
ω (Hz)	Fréquence de pulsation
ω _r (Hz)	Fréquence de pulsation à la résonance

Annexe D

Questionnaire sur l'appréciation subjective de l'acoustique des églises

Madame, Monsieur, merci de répondre aux questions ci-dessous sur l'acoustique de votre église en tenant compte de votre impression générale lors de plusieurs célébrations religieuses ou concerts et en essayant de ne pas être influencé par les locuteurs et/ou interprètes (cochez les cases correspondantes).

Nom de l'église:	Lieu.....			
1. Votre impression générale sur l'acoustique de cette église:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	mauvaise	moyenne	bonne	sans avis
2. La résonance (réverbération ou persistance du son) de l'église est:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	trop sèche	adaptée	trop résonante	sans avis
3. Comment est l'acoustique de l'église par rapport aux activités suivantes:	mauvaise	moyenne	bonne	sans avis
• Parole	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Chant de l'assemblée	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Musique d'orgue	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
• Concerts	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. La sonorisation (micro et haut-parleurs) est:	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	mauvaise	moyenne	bonne	sans avis
5. Le niveau sonore de la parole <u>avec</u> la sonorisation, varie, selon la place :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	beaucoup	peu	très peu	sans avis
6. Le niveau sonore de la parole <u>sans</u> la sonorisation, varie, selon la place :	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
	beaucoup	peu	très peu	sans avis

7. L'intelligibilité de la parole avec la sonorisation est:
- mauvaise moyenne bonne sans avis
8. L'intelligibilité de la parole sans la sonorisation est:
- mauvaise moyenne bonne sans avis
9. Y a-t-il des échos (répétition distincte du son) gênants:
- oui non sans avis
10. Les bruits de fonds extérieurs sont-ils gênants (p. ex. trafic, cloches, avions):
- oui non sans avis
11. Les bruits de fonds intérieurs sont-ils gênants (p. ex. humidificateur de l'orgue):
- oui non sans avis
12. Les bruits de fonds de l'assemblée sont-ils gênants (p. ex. bruit de bancs ou chaises):
- oui non sans avis
13. Comment jugez-vous la position de l'orgue (devant, derrière, latéralement):
- mauvaise moyenne bonne sans avis
14. Comment jugez-vous le niveau sonore de l'orgue pour l'accompagnement des chants:
- trop faible adapté trop fort sans avis
15. Comment jugez-vous la disposition des sièges (p. ex. en rang, en demi-cercle, en U):
- mauvaise moyenne bonne sans avis
16. La dimension de l'église est, par rapport à son occupation (moyenne):
- trop petite adaptée trop grande sans avis
17. Comment jugez-vous votre compétence pour remplir ce questionnaire:
- mauvaise moyenne bonne

Nous vous remercions d'avoir complété ce questionnaire. Vous pouvez nous laisser vos remarques éventuelles (en vous référant au N° de la question) ci-dessous :

Curriculum vitae

Statut personnel

Nom : **DESARNAULDS**

Prénom : **Victor**

Né : le 6 juillet 1968 à Genève

Etat civil : Marié

Nationalité : Suisse

Bureau ing. Monay

25, av. Vinet

CH-1004 Lausanne, Suisse

Tél : 021 6463577 Fax : 021 6475430

E-mail : desarnaulds@monay.ch

Etudes et diplômes

- 1980-1990 : Etude de flûte traversière au Conservatoire de Musique de Genève (avec D. Guignard puis F. Weick)
- 1986 : Baccalauréat français série « C » mathématique et sciences physiques (mention « Bien »)
- 1987 à 1992 : Etude de physique à l'Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne (EPFL) avec formation en acoustique à McGill University (Montréal, Canada) en 1989-90 (obtention en 1992 du diplôme d'ingénieur physicien de l'EPFL, avec le prix de la Commune de Chavannes)
- 1995 : Diplôme d'acousticien de la Société Suisse d'Acoustique (SSA) avec spécialisation en acoustique des salles
- 1996-1998 : Etude de théologie au Séminaire de Culture Théologique de Lausanne (obtention du diplôme en 1998)
- 1999-2002: Travail de doctorat au département d'architecture de l'EPFL (en parallèle avec son activité professionnelle)
- 2001 : Prix de la Fondation Ernest Dubois dans le domaine de la protection du patrimoine

Parcours professionnel

- 1990-1991 : Assistant-étudiant à l'EPFL en mathématique et physique.
- Dès 03.1992 : Ingénieur acousticien au bureau d'ingénieur Gilbert Monay (Lausanne)
- 1999-2002 : Assistant-doctorant au département d'architecture de l'EPFL

Formation continue

- Participation à tous les congrès de la Société Suisse d'Acoustique depuis 1993
- Participation à de nombreux congrès internationaux (Noise&Man'93, FASE94, Internoise 96, 97, 98, 01; DAGA98, CFA2000, ICA01)
- Cours "Lutte contre le bruit", Université de Fribourg, 1995
- Cours "Introduction au droit de la protection de l'environnement", Université de Fribourg, 1996

Formations données

- 1994-95 : Cours d'acoustique à l'Ecole d'Architecture Athenaeum de Lausanne (EAAL)
- Dès 1999 : Enseignement au département d'architecture de l'EPFL (Unité d'enseignement F)
- Nombreuses conférences d'introduction à l'acoustique (EPFL DP, Lignatur, Rotary, etc.)
- Nombreuses conférences nationales et internationales dans divers domaines de l'acoustique (acoustique des salles, environnement)

Membership

- Société de Ingénieurs et Architectes (SIA) (membre de la commission des normes acoustiques SIA181 depuis 1999, expert SIA)
- Registres Suisses des ingénieurs, architectes et techniciens (Reg A depuis 1998)
- Société Suisse d'Acoustique (SSA) : membre du comité depuis 1999, membre des groupes spécialisés « sonorisation pour la parole » et « acoustique des locaux scolaires »
- Autres sociétés nationales : ASA (American Society of Acoustics), DEGA (Deutsche Gesellschaft für Akustik), INCE (Institute of Noise Control Engineering)