

Quelques aspects de l'ingénierie des espaces d'écoute

Mario Rossi

*Laboratoire d'Electromagnétisme et d'Acoustique, Ecole Polytechnique Fédérale-Lausanne
CH-1015 Lausanne, Switzerland, Email: mario.rossi@epfl.ch*

Introduction

Les missions de notre école sont en premier lieu de dispenser un enseignement de haut niveau, de poursuivre des recherches, puis d'entreprendre des activités de R&D à la demande de partenaires extérieurs, publics ou privés. Pour conjuguer ces trois missions, l'auteur s'est efforcé de créer la meilleure synergie possible, avec pour objectifs de faire bénéficier l'enseignement des résultats et des expériences en R&D – on n'enseigne bien que le vécu –, de dégager dans les R&D des thèmes de recherche, et enfin, d'appliquer une méthodologie scientifique à toute activité de R&D.

Depuis une quinzaine d'années, les mandats pour tiers ont essentiellement concerné l'acoustique des espaces. A travers maintes réalisations concrètes et au-delà des réponses attendues des mandants en termes de dispositions adéquates, l'auteur a toujours cherché à contribuer à l'état de l'art de l'ingénierie acoustique.

Il faut souligner que les problèmes posés sortaient de l'ordinaire et qu'ils constituaient autant de défis : la volonté des maîtres d'œuvre et des utilisateurs était de disposer d'espaces susceptibles d'accueillir des événements aussi différents que des conférences, des congrès, des concerts de musique classique, de l'opéra, du théâtre, des variétés, les musiques actuelles, voire des expositions, des célébrations religieuses, etc. Il s'est agi d'en garantir l'accueil optimal et non leur coexistence plus ou moins heureuse (polyvalence) : ce devait être des espaces multifonctionnels.

Pour l'auteur, cela implique la définition et la réalisation de dispositions spécifiques. Le plus fréquemment, l'espace d'écoute préexiste, avec ses qualités et ses défauts, et il faut l'adapter à de nouvelles fonctionnalités. Parfois encore, les contraintes architecturales ou environnementales sont telles que l'espace ne satisfait pas les critères acoustiques essentiels de volume et de forme. Seule une approche épistémologique, sous-tendant une pensée scientifique critique et une méthode expérimentale rigoureuse, est à la hauteur de ces défis. Cette présentation montre qu'en acoustique, peut être davantage encore que dans d'autres domaines, il ne doit pas exister de frontière entre science et technique.

L'Auditorium Stravinski

Contexte et besoins

A la fin des années quatre-vingt, la Commune de Montreux avait pris la décision d'agrandir son Centre de Congrès et d'Exposition, notamment pour accueillir de grandes expositions commerciales. Or à cette époque, le Festival de Musique Vevey-Montreux, de réputation mondiale, se trouvait à l'étroit dans une salle à l'acoustique médiocre. Un mouvement populaire réussit à convaincre les autorités de Montreux et Vevey de réaliser un espace se prêtant tout aussi

bien à la musique symphonique, aux congrès et aux expositions : l'Auditorium Stravinski (figure 1). Le projet fut approuvé en votation populaire et les architectes et ingénieurs se mirent à la tâche.



Figure 1. L'Auditorium Stravinski à Montreux, en utilisation pour la musique symphonique. Vue depuis le balcon. Noter les grands réflecteurs suspendus. Pour les expositions, la salle et la scène sont mises à plat et les sièges enlevés.

La problématique de l'acoustique

Fin 1989, surgit un conflit à propos du volume de la salle et l'auteur fut mandaté comme conseiller, en plus d'un bureau d'acoustique privé. Les difficultés trouvaient leur origine dans les exigences contradictoires pour la parole et la musique. En fait, le volume prévu ne convenait ni à l'une ni à l'autre : le concept de polyvalence était en échec. Or une acoustique variable par des dispositions passives était exclue, de même qu'une réverbération assistée par électroacoustique. La logique imposa le choix d'un volume approprié à la musique symphonique et le recours à une sonorisation de la parole très performante. Ceci n'alla pas sans quelques remous politiques, mais le conseil fut suivi. Le volume spécifique proposé de 10 m³ (au lieu de 6) par personne (soit 18'000 m³ pour 1'800 places) fut atteint en augmentant la hauteur de la salle, le plan ne pouvant être modifié. Cette proposition s'appuyait sur la comparaison de différentes salles, comme l'illustre la figure 2.

Apparut alors un second problème : du fait de sa situation même et des exigences pour les expositions (salle mise à plat, grande largeur), la place disponible imposait une forme défavorable. Un fort déficit de réflexions précoces était à prévoir au centre du parterre, ainsi qu'en galerie. C'est pourquoi la mise en place de réflecteurs suspendus dans la salle fut proposée, ainsi que celle de « vagues » de bois de profils adéquats contre les parois latérales en avant de la scène. Ces concepts firent l'objet d'un débat public et les autorités confirmèrent la vocation de l'Auditorium : accueillir prioritairement des concerts de musique

symphonique, des congrès et conférences, ainsi que des expositions.

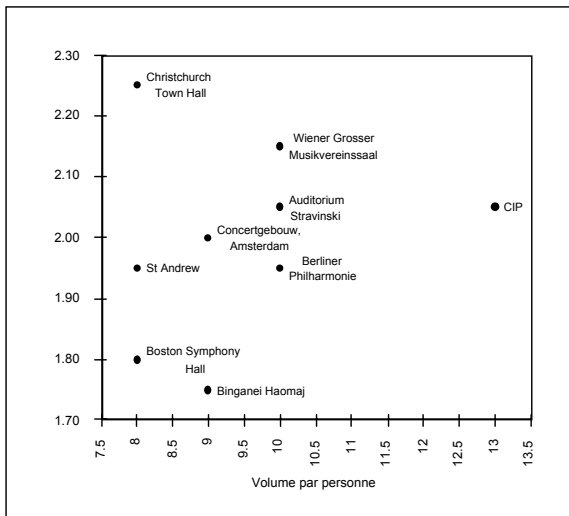


Figure 2. Volume spécifique de quelques salles.

La maîtrise de la réverbération impliqua la réalisation de dispositifs absorbants « sur mesure ». Le bois devant être le matériau de base, des panneaux absorbants convexes, dits « vagues », en différentes dimensions, masses surfaciques et avec différentes laines minérales au dos, furent réalisés et caractérisés en salle réverbérante (figure 3), jusqu'à obtenir des facteurs d'absorption conformes au cahier des charges.



Figure 3. A gauche panneau pour absorption des graves ; à droite panneau réflecteur destiné à la partie des parois en avant de la scène. Cliché en salle réverbérante du LEMA.

Une « surface d'ajustement » destinée à contrôler la réverbération dans le domaine de 160 à 400 Hz fut prévue sous la forme de panneaux de bois « en sandwichs » retournables.

L'étude sur une maquette au vingtième permit d'optimiser les formes des vagues en tant que réflecteurs aux fréquences moyennes et élevées (bonnes réflexions précoces, bonne diffusion), tout en respectant les contraintes imposées par l'outillage (bois préformé). La maquette permit aussi l'optimisation des réflecteurs au-dessus du parterre, ainsi que celle d'un réflecteur au-dessus de la scène, nécessité par la très grande hauteur.

Les sièges constituaient un défi en soi. Comme pour tout espace consacré à la musique, ils devaient présenter des caractéristiques acoustiques appropriées. C'est un fait que l'absorption des sièges et du public est déterminante pour une grande salle. En vue des expositions, il était exigé que les sièges du parterre puissent s'évacuer en un minimum de temps et de main d'œuvre, et rangés dans un espace restreint. On procéda comme suit : sur la base de spécifications préliminaires, un constructeur avait été choisi ; à l'achèvement de l'Auditorium et après caractérisation de son acoustique, un cahier des charges final lui fut transmis et l'on procéda à la mesure de l'absorption de sièges prototypes en salle réverbérante. A chaque fois, on testait un lot de 20 sièges, sans et avec public, jusqu'à l'obtention du siège le plus proche des exigences. Construits à partir d'éléments standards, les sièges ont un placet en résonateur de Helmholtz.

Pour minimiser au mieux les écarts d'absorption entre salle réverbérante et Auditorium, dus à leur diffusion très différente, on effectua une mesure comparative. Un millier de sièges furent mis à disposition par le Centre des Congrès. Leur absorption fut mesurée dans l'Auditorium, qui servit à cette occasion de salle réverbérante, puis quelques séries de 20 sièges, caractérisées en salle réverbérante. En quelque sorte, ces essais permirent la calibration de la salle réverbérante relativement à l'Auditorium. Le résultat de ces dispositions est conforme aux exigences.

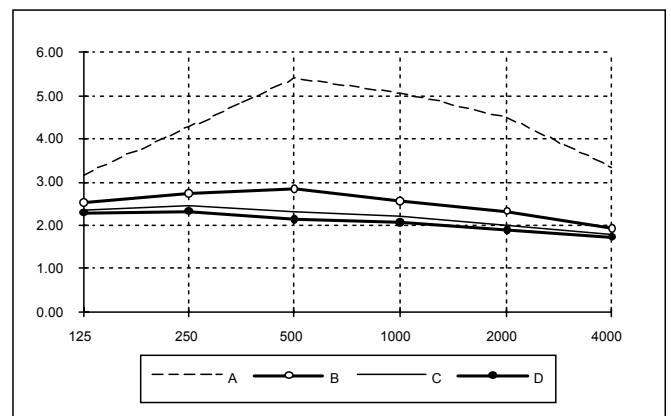


Figure 4. Temps de réverbération de l'Auditorium.

- A. 520 sièges fixes en galerie, aucune au parterre.
- B. 1'800 sièges
- C. idem avec 1'200 personnes
- D. idem avec 1'800 personnes.

L'Auditorium présente la durée de réverbération requise pour la musique symphonique, et cette durée est peu dépendante de l'affluence lorsque celle-ci s'échelonne entre 60 et 100 % ; les répétitions sont possibles sans public et sans dispositions complémentaires (figure 4).

Grâce aux réflecteurs, la clarté C80 est élevée, comme le montre la figure 5.

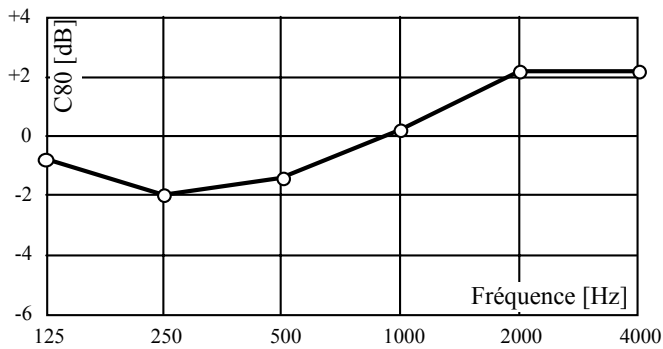


Figure 5. Clarté C80 moyenne de l'Auditorium, mesurée sans public.

Une installation de sonorisation fut spécialement conçue à partir d'un cahier des charges élaboré par l'auteur, et dont toutes les spécifications firent l'objet de mesures en réception (intelligibilité, marge de gain avant accrochage, gain acoustique, courbe de réponse, distorsions, etc.). La qualité de restitution de la parole est celle d'un très bon amphithéâtre universitaire (indice Rasti de 0,55 à 0,65 en l'absence de public). Les assemblées générales de grandes sociétés multinationales se tiennent sans problème dans l'Auditorium.

Accueillir le Festival de Jazz

Alors que les travaux touchaient à leur terme, le Festival de Jazz de Montreux (FJM) manifesta son intérêt pour l'Auditorium. Au printemps 1993, l'auteur fut chargé de définir les dispositions complémentaires en vue d'accueillir le FJM de juillet ! Une durée de réverbération de l'ordre d'une seconde à une seconde et demi était exigée, cela surtout en raison de la mise en œuvre de systèmes de sonorisation (effet « boomy » dans le grave, c'est-à-dire réverbérance trop élevée relativement aux registres médium et aigu). En soi, la solution est simple – baffles absorbants accrochés au plafond, complétés par des rideaux lourds en parois – mais coûteuse en exploitation (pose et dépose à chaque FJM ou autre événement de variétés). La durée de réverbération mesurée sans public passe de 1,4 s dans le grave à 0,9 s dans l'aigu.

Les « Jumping Evenings »

Au début des années 2000, l'évolution des musiques actuelles fit que le FJM imposa un nouveau type d'événement : le « jumping evening ». Le public, debout, est incité à sauter au rythme de la musique. Le plancher de l'Auditorium se trouve donc soumis à une excitation périodique par quelque 4'000 personnes – typiquement, les sauts sont à la croche pour un tempo de 60 b.p.m. à la noire,

soit une fréquence fondamentale de 2 Hz. Or une telle circonstance n'avait jamais été envisagée, pas plus d'ailleurs que la venue du FJM, si bien qu'au point de vue dynamique, la première fréquence propre des différents champs de la dalle avait été placée à environ 4,5 Hz, valeur certes adéquate pour une salle de concert symphonique – public assis et « sage » –, mais ne convenant pas du tout aux « jumping evenings ». Effectivement, fin 2002 des craintes se manifestèrent.

L'auteur fut chargé de trouver une solution, en étroite collaboration avec un bureau d'ingénieurs. En été 2003, des « colonnes d'appui » furent posées pour la durée du FJM. Leur principe est d'augmenter la raideur équivalente des champs de dalle, donc d'en remonter la première fréquence propre au-delà des harmoniques importants de l'excitation. Relativement efficace, cette solution présente l'inconvénient de poses et déposes coûteuses – l'espace en dessous de l'Auditorium est dédié à des expositions, et des colonnes d'appui permanentes y sont particulièrement malvenues. Aussi la mise en place d'amortisseurs dynamiques fait-elle l'objet d'une étude théorique et expérimentale. Il s'agit simplement d'un résonateur mécanique – accroché sous la dalle –, dont la masse suspendue, la raideur des suspensions et la résistance mécanique des amortisseurs, sont déterminées en vue de réduire l'amplitude vibratoire de la dalle.

L'étude de colonnes d'appui et d'amortisseurs dynamiques se base sur le modèle classique de résonateur mécanique – masse suspendue avec pertes – pour représenter le comportement dynamique d'une dalle. On pouvait considérer avoir affaire à des dalles couplées de dimensions 12 x 12 m, d'une masse de 120 tonnes environ. La difficulté a été de caractériser ce modèle par des paramètres obtenus expérimentalement. Or si la mesure d'une fréquence de résonance et d'un facteur d'amortissement est encore relativement simple, il n'en va pas de même pour la masse dynamique. On ne dispose pour celle-ci que d'une approximation, d'autant moins précise que les conditions au pourtour d'une dalle sont mal définies. La mise en place de colonnes d'appui de raideur connue a conforté la validité du modèle.

Il était cependant indispensable de connaître les forces exercées par le public lors d'un « jumping evening » (à raison de 4 personnes/m²), afin de vérifier que les déformations restaient assez en dessous des valeurs limites fixées par les ingénieurs, quel que soit le système retenu, colonnes ou amortisseurs dynamiques. Une expérimentation systématique fut réalisée de la manière suivante : 49 sujets – représentatifs du public du FJM –, répartis dans un carré de 3,5 x 3,5 m ont sauté à des tempo prescrits (57, 60, 63 b.p.m., portés dans une seconde expérimentation à 67 et 68) pendant une quinzaine de secondes ; le carré d'essai était déplacé du centre d'une dalle à sa périphérie, puis à cheval sur deux dalles et enfin sur une dalle voisine ; chaque essai était effectué deux fois (un bon synchronisme des sauts l'exigeait) ; enfin, les sauteurs portaient d'abord des chaussures de ville, puis des baskets (ce qui est effectivement le cas au FJM en juillet). La mesure de l'accélération au centre de la dalle permet, via le modèle en

résonateur mécanique, de déterminer le spectre des forces appliquées ramenées en ce centre, puis de calculer une estimation pour l'occupation maximale de 4 personnes/m² sur toute la dalle. Le tableau de la figure 6 résume les valeurs obtenues en décembre 2003.

Composante	Fondamentale	Harmonique 2	Harmonique 3
Valeur max.	120 kN	46 kN	7,5 kN

Figure 6. Amplitudes maximales des forces d'excitation ramenées au centre d'une dalle pour 4pers. /m².

Ces valeurs et les critères de déformations maximales admissibles nous ont permis le calcul d'un amortisseur dynamique, dont un prototype est actuellement en évaluation.

De l'acoustique d'une Cathédrale

Le problème de l'intelligibilité de la parole

Une cathédrale gothique présente une réverbération idéale pour l'orgue et l'art choral, mais tout à fait inappropriée pour la parole. Une sonorisation doit donc être prévue, mais des difficultés surgissent invariablement à propos de l'intégration architecturale des haut-parleurs, ne serait-ce qu'à propos de leurs emplacements. L'auteur fut chargé de la conception d'une nouvelle sonorisation conjuguant parfaite intégration et une excellente intelligibilité. Ce fut l'occasion d'évaluer l'indice RASTI comme indicateur d'intelligibilité. L'étalonnage par des tests avec des auditeurs (logatomes, listes de noms propres, phrases phonétiquement équilibrées, extraits de Baudelaire et Mallarmé), avec un locuteur entraîné et un second beaucoup moins, confirma l'utilité certaine du RASTI, ne serait-ce qu'au stade de la conception d'une sonorisation et des essais en réception.

Des valeurs RASTI comprises entre 0,55 et 0,65 ont été relevées, alors que les scores de tests avec des sujets étaient de 0,80 à 0,95, selon le corpus utilisé et le locuteur.

De l'équilibre entre réverbérance et clarté

La Cathédrale accueille bien évidemment des concerts de musique chorale. En conséquence de nouvelles normes de sécurité, il fut décidé de placer les chœurs à la croisée du transept (ce qui correspond à l'orientation de l'édifice). Des oppositions se manifestèrent : une forte dégradation, aussi bien des conditions d'exécution que celles d'écoute dans la nef, était crainte.

Une étude acoustique (réverbération, échogrammes, clarté C80) et une enquête auprès du public démontrèrent que les conditions d'écoute étaient quasi les mêmes dans l'ancienne et la nouvelle disposition, et que le problème consistait en une nette perte de clarté et de perspective, au-delà du premier tiers du public.

Dans une certaine mesure, les craintes quant aux conditions d'exécution furent confirmées. Une nouvelle estrade modulable, avec de hautes et larges parois latérales et de fond, fut conçue, testée et est en cours d'achèvement. Pour le public, il s'agissait de créer de fortes réflexions précoces.

L'auteur proposa une assistance électroacoustique dont les haut-parleurs se substitueraient à des réflecteurs, acceptables dans une salle de concert comme Stravinski, mais évidemment exclus dans un édifice gothique.

L'assistance comprend un arrangement de microphones au-dessus de l'estrade des chœurs et pour les solistes, une antenne directive au-dessus du podium. Une électronique numérique assure les pondérations fréquentielles, les gains et les délais nécessaires à la formation des différentes voies. Les haut-parleurs sont ceux de la sonorisation de parole déjà en place (figure 7). Des essais très concluants furent menés lors de concerts, et l'assistance est en phase finale de réalisation.

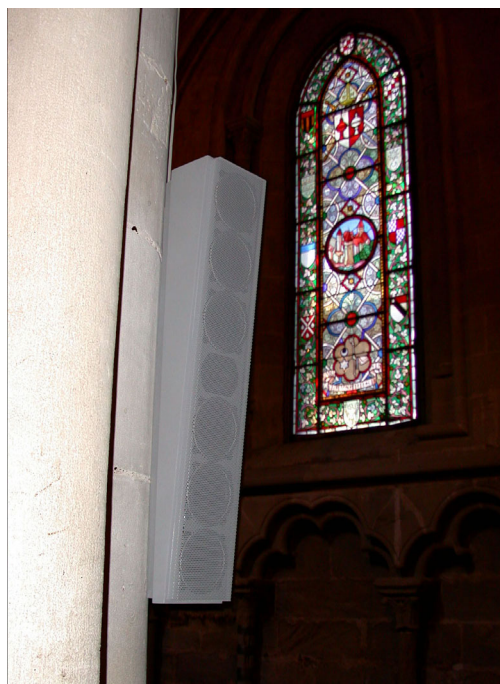


Figure 7. Une des colonnes sonores spécialement réalisées pour la Cathédrale de Lausanne : Elles sont utilisées pour la sonorisation de parole et pour créer de pseudo réflexions précoces pour la musique chorale.

Acoustique et politique

Les circonstances sont parfois telles qu'une salle ne puisse pas respecter le bon ordre de grandeur du volume. Récemment, le Grand Conseil vaudois, organe législatif cantonal, décida de s'installer dans le grand Aula du Palais de Rumine, salle d'un volume de plus de 3'800 m³. La figure 9 en donne une vue générale après les travaux.

Avec 180 députés pour 312 fauteuils prévus, le volume par personne est bien au-delà des 5 m³/p. conseillés pour la parole. Or l'Aula, réalisée en 1904, est un monument classé ; ses parois et son plafond en voûte, en particulier, sont ornés des décors peints. L'Aula présentait dès l'origine une acoustique jugée médiocre, même avec plus de 400 fauteuils rembourrés et la pose, dans les années trente, de rideaux lourds devant les boiseries inférieures.

L'auteur préconisa d'incorporer au mobilier des résonateurs acoustiques à fente et de faire réaliser des fauteuils acoustiques selon un cahier des charges. Plusieurs modèles de fauteuils furent caractérisés en salle réverbérante (sans

puis avec mobilier, occupés puis inoccupés) jusqu'à obtenir le respect des exigences. La coupe de la figure 8 illustre la solution retenue, alors que la 9 montre le placet perforé, formant ainsi une absorption sélective.

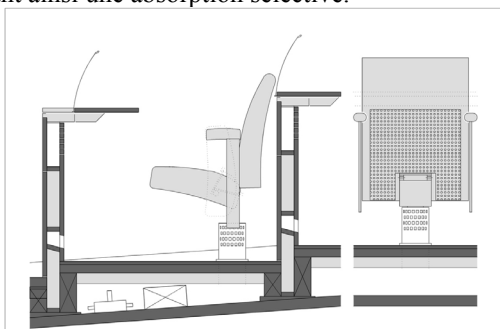


Figure 8. Coupe du mobilier montrant les résonateurs. Cliché Bureau I. Kolecek.

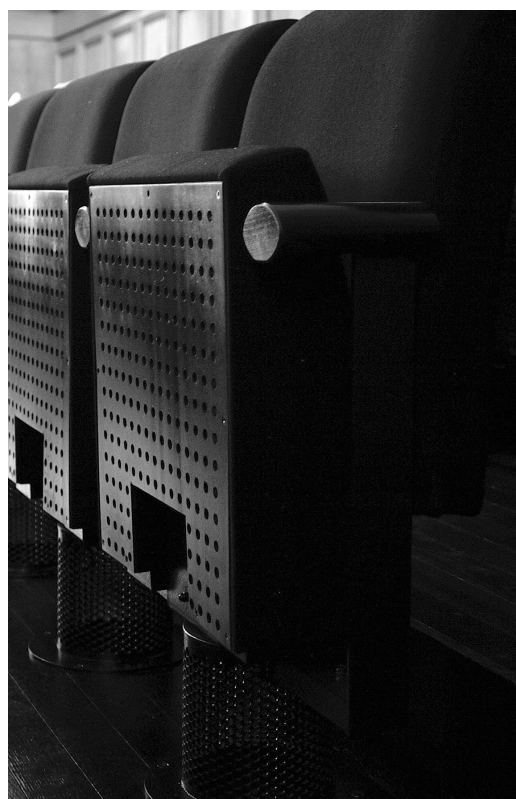


Figure 9. Vue des fauteuils de l'Aula, placés relevés. Cliché Jean-Philippe Daulte.

Cette exécution permit de maîtriser la réverbération dans les registres grave et médium.

Il subsistait néanmoins un déficit d'absorption dans le registre aigu, très préjudiciable à l'intelligibilité. Les grandes fenêtres devant conserver leurs cadres et vitrages d'origine, la situation était encore péjorée par le bruit d'origine extérieure. Une installation de sonorisation était prévue, mais comme le type et la position des haut-parleurs étaient imposés et que les prévisions d'intelligibilité furent mal conduites, les performances se révélèrent décevantes. Ce fut une tâche ardue que de convaincre les intervenants et les autorités de poser des panneaux absorbants complémentaires.

Par ailleurs, les prévisions d'intelligibilité se trouvèrent améliorées par le calage du modèle (à l'aide de mesures et de tests d'intelligibilité avec des auditeurs), et l'installation de sonorisation redimensionnée, sans pour autant déplacer les hauts-parleurs. Finalement, les résultats sont ceux attendus : réverbération et intelligibilité sont satisfaisantes. La figure 10 montre une vue générale de l'Aula.



Figure 10. L'aula du Palais de Rumine, siège du parlement vaudois. Cliché Jean-Philippe Daulte.

Musique et charge sonore

Du bon volume d'une salle de répétition

On sait qu'à réverbération donnée, un espace présente un champ réverbéré d'autant plus élevé que son volume est faible. Or les salles de répétition n'accueillent en général que peu de public, si ce n'est aucun, si bien que leur volume est de facto trop faible. Tel a malheureusement été le cas pour la salle de répétition de l'Orchestre de la Suisse Romande. Consulté après la réalisation du gros œuvre, l'auteur n'a pu que contribuer à établir le meilleur équilibre entre réverbération et niveau sonore.

Idéale pour le répertoire avec cordes et bois, la salle est extrêmement pénible pour des percussions et des cuivres, cela d'autant plus que les musiciens ont obstinément refusé une réorganisation des pupitres, visant à augmenter les distances entre les registres, ce qui n'était malheureusement guère possible.

Charges sonores dans une fosse d'orchestre

En automne 2002, l'Opéra de Lausanne eut à faire face à une fronde des musiciens à propos des charges sonores dans

la fosse. De fortes craintes s'exprimèrent quant à l'exécution de la Bohème de Puccini, programmée en juin 2003. L'auteur fut chargé d'évaluer les risques auditifs et de trouver une solution. Dans un premier temps, les charges sonores furent mesurées dans les fosses de l'Opéra et de la grande salle de Beaulieu. Le principe d'une lecture d'extraits pertinents de la Bohème, choisis par les musiciens, s'est imposé comme la meilleure approche. La comparaison des charges sonores mesurées dans les deux lieux pour chaque extrait fournit en effet les éléments de décision. Le Maestro Corrado Rovadis de la Scala ayant accepté de diriger les lectures, elles eurent lieu le même jour dans les deux lieux. On a procédé à l'enregistrement des extraits à l'aide de dix microphones, portés par les musiciens (figure 11) ou placés à proximité immédiate.

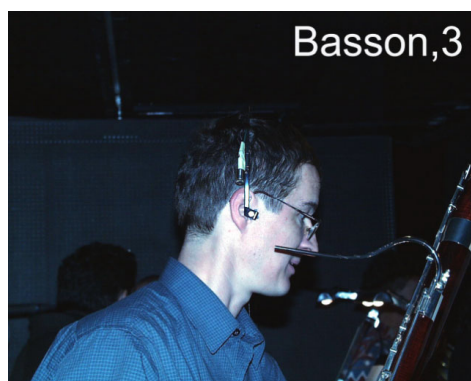


Figure 11. Musicien muni d'un microphone.

On a ensuite mesuré en laboratoire, conformément à la législation, les niveaux L_{Cmax} en dB(C) et L_{A125} en dB(A) – à partir desquels on calculait le niveau énergétique moyen L_{em} sur la durée de chaque extrait.

La figure 12 donne un exemple des évolutions de ces niveaux pour un même extrait dans la fosse de l'opéra puis de la salle de Beaulieu ; il s'agit du bassoniste de la figure 11.

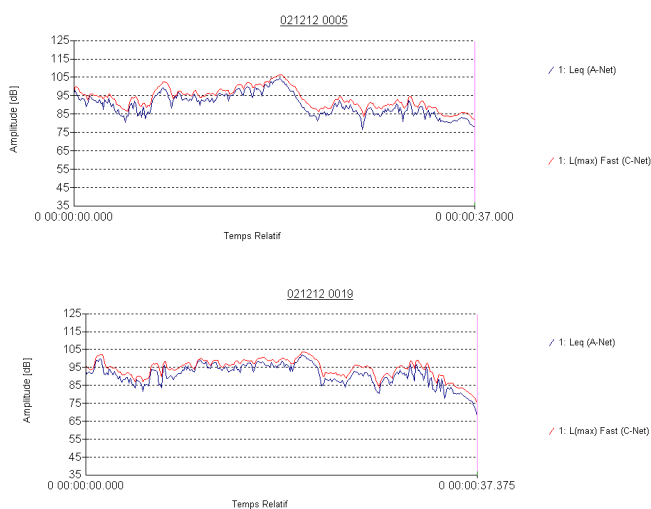


Figure 12. Evolution des niveaux L_{A125} (en bleu) et L_{Cmax} (en rouge) pour le bassoniste de la figure 10 ; en haut dans la fosse de l'Opéra ; en bas dans celle de la salle de Beaulieu.

Ces niveaux ont permis : les premiers, de savoir si les pointes sonores étaient en dessous de la valeur limite – ce qui a toujours été le cas –, les seconds, de déterminer les charges sonores pour chaque extrait dans les deux lieux. Les L_{em} ont été exprimés sous la forme de charges sonores en Pa^2s , ce qui a permis de sommer sans autre les charges des extraits pour déterminer la charge résultante totale. Il fut ainsi établi que si la charge sonore diffère entre les deux fosses, ce n'est pas toujours dans le même sens. Pour certains musiciens elle est moindre à Beaulieu, pour d'autre à l'Opéra. Ces écarts sont faibles (pire des cas, 1,7 dB). Et surtout, la charge sonore est raisonnable. Si l'on considère la charge sonore totale dans le cas le plus défavorable (1250 environ), cors à l'Opéra, violons II à Beaulieu, on constate qu'elle correspond à moins d'un quart de la limite quotidienne de $5'760 Pa^2s$.

On a ainsi confirmé que le lieu ne joue qu'un rôle secondaire : l'exposition sonore d'un musicien est avant tout déterminée par son propre instrument et celui de ses voisins immédiats (les dispositions des registres étaient différentes d'une fosse à l'autre, car de proportions très différentes). Dans un second temps, il s'est agi de prédire la charge sonore totale pour une interprétation complète de La Bohème, ce qui permettait une meilleure appréciation du risque auditif et répondait bien aux inquiétudes des musiciens. Cette prédiction repose sur une analyse très détaillée de la partition au point de vue des nuances, de l'harmonisation et de l'emploi des différents registres. L'analyse a été corroborée par la comparaison avec différents enregistrements, anciens ou récents, de l'œuvre. Ces comparaisons sont indispensables pour déterminer la durée des différents actes (puisque la charge résulte à la fois du niveau sonore et de la durée). Pour fixer ces durées on s'est aussi inspiré des recommandations de Ricci, qui avait travaillé avec Puccini.

Il est évident qu'une prévision présente une marge d'erreur plus importante qu'une mesure. On s'est attaché à obtenir des prédictions par excès. On a pu par la suite vérifier que c'était bien le cas : les mesures du dernier acte au cours d'une représentation donnèrent des valeurs inférieures aux prévisions. Le tableau de la figure 13 résume cette prévision pour les bassons et les cuivres.

Sans nier l'inconfort des conditions d'exécution dans une fosse pour les musiciens, ces résultats ont confirmé que la programmation de La Bohème à l'Opéra de Lausanne n'était absolument pas déraisonnable au point de vue du risque auditif.

Acte	Durée min.	Bassons	Cuivres
I	35	400	700
II	18	600	762
III	25	405	475
IV	29	517	598
Charge totale	107	1922	2525

Figure 13. Prévisions des charges sonores pour les bassons et les cuivres dans la fosse de l'Opéra de Lausanne pour la Bohème de Puccini.