

ACOUSTIQUE DES SALLES

Jean-Dominique Polack

O/ Introduction

On rappelle les notions de *modes propres* et de *transitoires*, illustrées par un exemple musical (instrument à cordes pincées joué avec un archet). Mais noter les différences avec les instruments de musique :

- 1 il y a beaucoup de modes propres dans les salles, si bien qu'une approche statistique est nécessaire ;
- 2 les transitoires sont lents (de l'ordre de la seconde), et leur fréquence est imposée par la source sonore.

En d'autres termes, il faut utiliser une autre approche que l'approche modale, et plutôt considérer la succession des réflexions.

1/ La notion de réponse

Les réflexions se succèdent de plus en plus rapidement (considérer le nombre de sources images dans une calotte sphérique de rayon $R=ct$ centrée sur le récepteur ; ce nombre est proportionnel à t^2/V), mais leur énergie décroît encore plus vite.

Donc, après un temps d'établissement - de l'ordre de 150 à 300 ms dans une grande salle - on observe une distribution statistique de réflexions très rapprochées : la réverbération. Quant à la période d'établissement, elle correspond au son précoce, c'est-à-dire l'ensemble formé par le son direct et les premières réflexions.

Dans la pratique, on caractérise donc une salle par sa réponse - plus précisément, pour des positions données de la source et du récepteur, et en tenant compte de leur directivité (exemple sonore du trombone et de la voix humaine).

2/ La réverbération

Elle est donc statistique par essence. On peut donc la décrire avec peu de paramètres : le temps de réverbération (TR) par octave. Par contre, *le niveau de réverbération*, paramètre essentiel d'une réverbération artificielle en post-production, n'est pas utilisé en Acoustique des Salles (difficulté à décider *quand* commence la réverbération).

Enfin, la réverbération est aussi *spatialement statistique* : elle a les mêmes caractéristiques dans toute la salle, indépendamment de la directivité des sources et récepteurs.

3/ Le son précoce

Ecouter la même musique avant et après diffusion dans une salle par un orchestre de haut-parleurs. On entend deux effets :

- un effet de position dans l'espace ;
- un effet de coloration.

L'importance relative de ces effets dépend en outre du *type* de musique.

En effet, si l'on superpose au son direct un son retardé de 1 ms à 150 ms, la source apparente, initialement située entre les deux haut-parleurs, migre vers le haut-parleur non retardé où elle se stabilise -en direction, pas en position : elle semble en fait reculer et prendre plus de volume - jusqu'à ce qu'une deuxième source retardée apparaisse sur le deuxième haut-parleur pour des retards variant de 40 ms pour la parole à 80 ms pour la musique. Mais cette deuxième source ne devient gênante que pour des retards bien plus importants (respectivement 80, et 150 ms). Simultanément apparaît une coloration du son, surtout pour la parole et le bruit, auxquels sont associés des sensations diffuses de hauteur.

On fait alors écouter une bande où le canal droit est retardé d'environ 40 ms par rapport au canal gauche, mais avec une répartition variable de l'énergie entre les deux canaux à énergie totale constante. Au début, toute l'énergie vient du canal gauche, puis se transfère petit à petit vers le canal droit, pour parvenir uniquement de ce dernier sur l'accord final. On observe que le son vient

uniquement de gauche et reste concentré au début ; puis la source sonore semble s'élargir et devenir moins précise en reculant légèrement, comme en prenant un *halo* à la fois spatial et temporel ; enfin, la source recule rapidement au fond de la salle, d'où elle revient par un mouvement circulaire sur le haut-parleur droit. De plus, cet effet dépend du niveau sonore : il est d'autant plus marqué que le niveau d'écoute est élevé.

La nomenclature des effets : effet de sommation, ou stéréophonie ; effet d'antériorité qui permet une localisation dans les salles malgré les nombreuses réflexions ; et effet d'espace qui fait prendre d'autant plus de volume à la source que le *niveau sonore* est important - il vient "animer" les crescendos. Rôle de ce dernier effet dans l'évolution de la musique savante européenne au 16^e siècle (Gabrielli) - la seule musique savante qui soit expressive.

4/ Le rôle de la forme

La forme d'une salle joue de manière différente sur les deux parties de la réponse. Comme la réverbération est statistique, elle ne dépend de paramètres globaux de la salle comme son volume et son absorption, mais pas de sa configuration géométrique. Par contre, le son précoce dépend essentiellement de la géométrie. En particulier, la présence de réflecteurs amplifie l'effet d'espace. Il faut donc étudier les salles cas par cas.

5/ Quelques exemples

Voici un catalogue *non exhaustif* de salles, illustré par des diapositives.

a) le théâtre antique

A proprement parler, ce n'est pas une salle, car il n'y a pas de plafond ni de murs latéraux. Il n'y a donc ni réverbération ni effet d'espace, mais il ne faut pas oublier que la musique antique était très différente de notre musique savante occidentale (cf. la musique Nô). Le son y est amplifié naturellement par les réflexions - frontales - sur l'orchestre et le mur du fond. Et comme la pente des gradins est très inclinée - env. 30° - la visibilité est excellente et les sons graves ne sont pas atténués par les rangées de spectateurs, une leçon que les concepteurs modernes ont souvent oubliée. Néanmoins, cela donne un son coloré, auquel l'oreille s'habitue étonnamment vite.

b) la salle de concert classique

C'est une salle rectangulaire, étroite et longue, haute de plafond, avec une ou deux rangées de balcons étroits sur les côtés, et un peu plus profond au fond. La scène est élevée - 1,5 à 2 m au dessus du plancher de la salle. Cette forme apparaît dans le théâtre à la française au 17^e siècle - Théâtre du Marais, 1644 - et se retrouve considérablement agrandie dans les salles "classiques" (l'ancienne salle de Leipzig 1745, Boston 1890, Vienne, et Amsterdam) sans qu'il soit possible d'établir de filiation directe (via la Salle des Machines des Tuileries, la seule salle de concert en Europe au 18^e siècle ?).

c) les opéras

La forme circulaire de l'opéra classique, ou théâtre à l'italienne (opéra Garnier, 1400 places) vient des usages sociaux : être vu à l'opéra est plus important qu'entendre. S'y ajoute des analogies mal comprises - l'ellipse focalise les sons ! Leur qualité acoustique vient du fouillis "rococo" de la décoration qui donne l'impression que le son vient de partout, pour les spectateurs du parterre. Par contre, au fond des loges des balcons, le son est appauvri pour peu qu'un décor de velours vienne les "enrichir". Dans les opéras prestigieux, un volume important surmonte le dernier balcon, et augmente la réverbération.

Les opéras plus modernes (Bastille 2700 places, Los Angeles 2900 places) cherchent à améliorer la vision de la scène, ainsi qu'à réfléchir le son sur les côtés. Ces derniers sont donc pratiquement plans et parallèles, avec quelques reliefs pour diffuser un peu. Et les balcons deviennent frontaux et profonds. Le fond des balcons est alors "coupé" de la salle, et la hauteur sous plafond doit rester grande pour assurer un minimum de réverbération.

Quelque soit le type d'opéra, le cadre de scène joue un rôle primordial - d'ailleurs aussi au point de vue visuel - pour projeter le son dans la salle tout en assurant son homogénéisation - c'est-à-dire un mélange suffisant des instruments de l'orchestre pour ne pas entendre les trompettes venant de la gauche et les timbales de la droite ! C'est pourquoi il doit comporter des reliefs et/ou des ouvertures ; d'où l'importance acoustique des loges d'avant scène.

d) les salles américaines fin XIX^e

Ce type de salle est représenté par Carnegie Hall (3000 places) et Massey Hall (Toronto, 3700 places, la salle "préférée" de Herbert v.K. !). Elles sont larges, avec des balcons sur trois côtés, et une scène moins large. Le problème du fond des balcons s'y retrouve. Elles sont vraisemblablement acceptées plus par tradition que pour leur acoustique (sous toute réserve, car je n'y ai pas entendu de concert !).

Cependant, le rôle de ces balcons larges, au plafond bas à l'ouverture sur la salle mais remontant vers le fond, ne doit pas être sous-estimé : ils *homogénéisent* le son (cf. le cadre de scène des opéras, ci-dessus), en évitant donc une localisation trop précise des diverses sources sonores. En ce sens, ces balcons contribuent à diffuser le son, et peuvent même palier les déficiences de certaines salles.

e) les salles modernes

Elles sont souvent rondes et hautes (Roy Thompson Hall, Toronto, 1970, 2400 places). Elles sont caractérisées par l'absence de surface pouvant renvoyer le son vers le public - sauf des réflecteurs lenticulaires en plexiglas au dessus de la scène, dont le rôle principal est d'améliorer la communication entre les musiciens ! Mais ils sont trop petits pour réfléchir les sons graves, qui sont donc absorbés par la rangée de public sans possibilité de compensation. Inutile d'amener les violoncelles de votre orchestre quand vous y faites une tournée, ce qui peut être source d'économie ! Par contre, l'espace y est suffisant pour la réverbération.

f) les salles à réflexions dirigées

Ces grandes salles (Christchurch et Wellington en Nouvelle-Zélande, Hong-Kong, environ 2700 places) sont l'oeuvre de Harold Marshall. Elles sont caractérisées par de grands réflecteurs qui renvoient le son vers les auditeurs - d'où leur nom. Pour éviter d'entendre l'orchestre dans les réflecteurs, ces derniers ont été rendus irréguliers dans les plus récentes de ces salles. L'effet corollaire est de séparer la salle en deux (salles couplées) : une salle inférieure, intime où sont assis les spectateurs ; et une salle supérieure où se crée la réverbération.

Le même principe a été appliqué par Harold Marshall à un opéra (OCPAC, 3000 places), où de grands réflecteurs latéraux inclinés dominent l'aspect visuel de la salle - derrière eux, les murs et le plafond sont plans. Les règles de bonne vision ont par contre imposé une salle frontale et large, au détriment de l'acoustique ; les concepteurs s'en sont tirés en inventant une salle en "échelle de perroquet", avec des demi-balcons. De plus, ceux-ci se referment vers l'arrière avec des parois elles aussi inclinées, ce qui augmente l'intensité subjective de la musique au fond des balcons. En conséquence, le fond du 3^e niveau, et même le fond du 4^e niveau, sont d'excellentes places, à près de 40 m de la scène !

g) quelques autres salles

A Dublin, l'ancien Amphithéâtre d'Honneur de l'université a été transformé en salle de concert. Le plan est classique - rectangulaire, étroit et haut - mais le plafond léger du siècle dernier absorbe exagérément les sons graves : la réverbération en est déséquilibrée, et l'acoustique de la salle aussi. L'Acropolis de Nice est l'exemple d'une salle moderne multi-usage, large, et basse de plafond pour réduire les coûts de construction. Au fond du balcon supérieur, le son est donc *très* faible. De plus, le cadre de scène est lisse et incurvé vers le bas en son centre, avec pour résultat que les auditeurs du parterre y entendent les solistes "sauter" d'un côté à l'autre de la scène quand ils passent par le centre.

6/ L'évaluation d'une salle

Avec de l'entraînement, on peut évaluer l'acoustique d'une salle en remplissant au cours d'un concert une fiche questionnaire du type joint (figure 6). Les points qui se sont révélés importants à l'usage sont ceux cités précédemment, et les qualificatifs ne sont là que pour guider les réponses. Citons pour mémoire :

- le confort sonore : faut-il tendre l'oreille ou pas pour écouter la musique ,
- l'ambiance : écoute-t-on à travers une fenêtre, ou est-on dans la même salle que l'orchestre ?
- la précision : y a-t-il suffisamment de "flou" artistique, mais pas trop ?
- la réverbérance : entend-on suffisamment la salle pendant la musique ?
- l'intimité : l'orchestre paraît-il proche ou distant ?
- l'équilibre tonal : le son est-il coloré, et comment ?

L'expérience prouve que la réponse à la dernière question est indépendante de la position dans la salle. ; elle s'adresse donc à la réverbération. Par contre, toutes les autres réponses varient avec la position, et s'adressent donc de son précoce.

7/ Le projet

Au stade du projet, il n'est pas possible d'écouter de concert. La fiche questionnaire est inutilisable. On s'en remet à un certain nombre de paramètres physiques, plus ou moins bien étalonnés, que l'on peut calculer avec des codes de simulation (cf. CATT-Acoustics), ou mesurer sur des modèles réduits. De plus en plus, on cherche à "écouter le modèle" en reproduisant un champ sonore spatial à partir du calcul ou de la mesure : c'est l'*auralisation*.

Les deux techniques de reproduction sonore à la base de l'auralisation sont : soit l'utilisation d'un grand nombre de haut-parleurs dans une salle pour simuler les différentes direction par stéréophonie généralisée (comme le fait le système Ambisonics) ; soit la reconstitution du son entendu par les deux oreilles et écoute au casque ou sur haut-parleurs par procédé transaural - procédé qui annule sur chaque oreille le son provenant du haut-parleur contralatéral.

8/ Conclusion

La notion centrale en acoustique des salles est celle de réponse d'une salle. A ses deux composantes correspondent des modes de perception très différents : la réverbération est toujours perçue comme coloration ; alors que le son précoce induit un halo spatial et temporel qui varie avec le type de signal et son niveau sonore, et qui est perçu selon plusieurs dimensions subjectives. *La qualité acoustique d'une salle est donc essentiellement définie par son son précoce.*

La forme d'une salle, à volume et absorption constante, n'influe pratiquement pas sur la réverbération,, alors qu'elle modèle le son précoce. Elle exerce donc, par le biais du son précoce, une influence prépondérante sur la qualité acoustique. C'est pourquoi une typologie des éléments architecturaux d'une salle, associée à leur influence acoustique, serait indispensable. A titre provisoire, mentionnons : la hauteur sous plafond ; la largeur, avec présence ou non de réflecteurs ; l'élargissement ou le rétrécissement progressif de la salle vers l'arrière ; l'ouverture de la scène et son cadre ; les balcons, leur front, leur profondeur, et leur ouverture latérale et verticale ; sans oublier le décor de scène, qui doit être réfléchissant dans les très grands opéras (type La Bastille).

Bibliographie

L.Beranek "Concert and opera halls: How they sound?" (Acoustical Society of America, 1996)
La référence sur les grandes salles de réputation internationale.

V.L.Jordan "Acoustical design of concert hall and theatres" (Applied Science, London, 1980)
Les salles Jordan : Metropolitan Opera, Sydney, etc.

M.Barron "Auditorium acoustics and architectural design" (E&FN Spon, London, 1993)

L'un des meilleurs spécialistes actuels.

M.Forsyth "Architecture et musique" (Pierre Madarga, Liège, 1987)
Historique des salles, des origines à nos jours.

R.H.Talaske Ed. "Halls for music performances" (American Inst. of Phys., New York, 1982)
Présentation rapide des 20 dernières années de conception acoustique

R.H.Talaske Ed. "Theaters for drama performances" (American Inst. of Phys., New York, 1982)
Présentation rapide des 20 dernières années de conception acoustique

A.C.Gade, Acoustical survey of eleven European concert halls, The Acoustics Laboratory, Techn.
Univ. of Denmark, rapport no 44 11 salles réputées

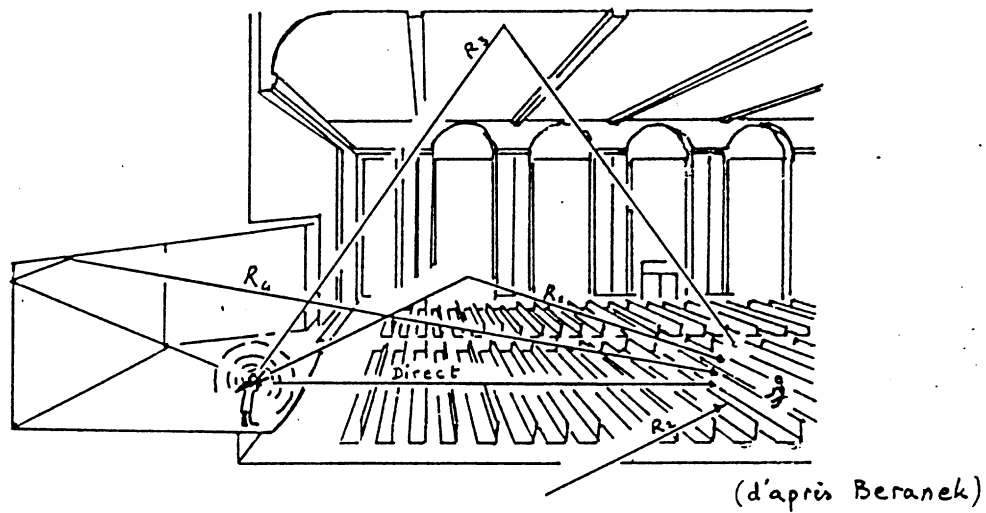
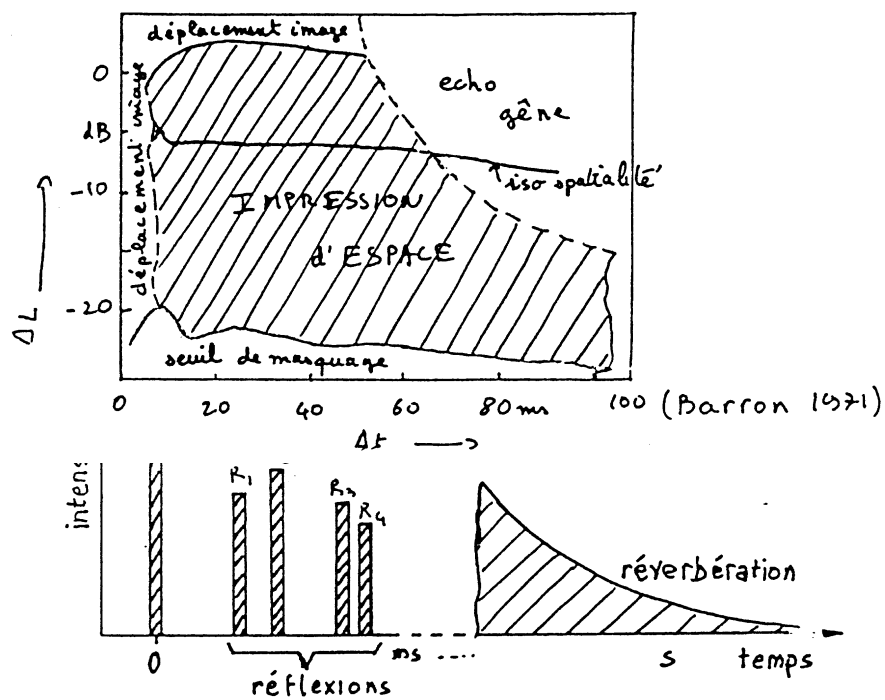


Figure 1 : Trajet direct et réflexions

Figure 2 : Réflectogramme

Figure 3 : Effet d'espace pour une seule réflexion latérale ($V=40^\circ$)

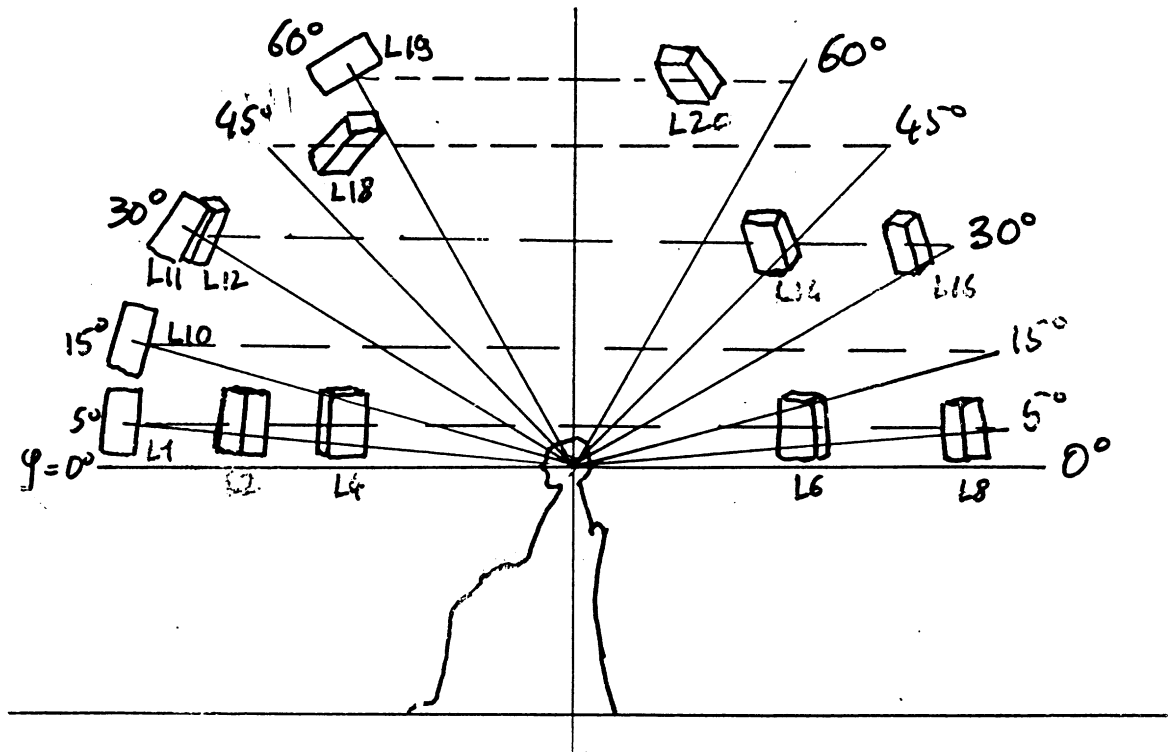


Figure 4: Simulation d'une salle par une sphère de haut-parleurs

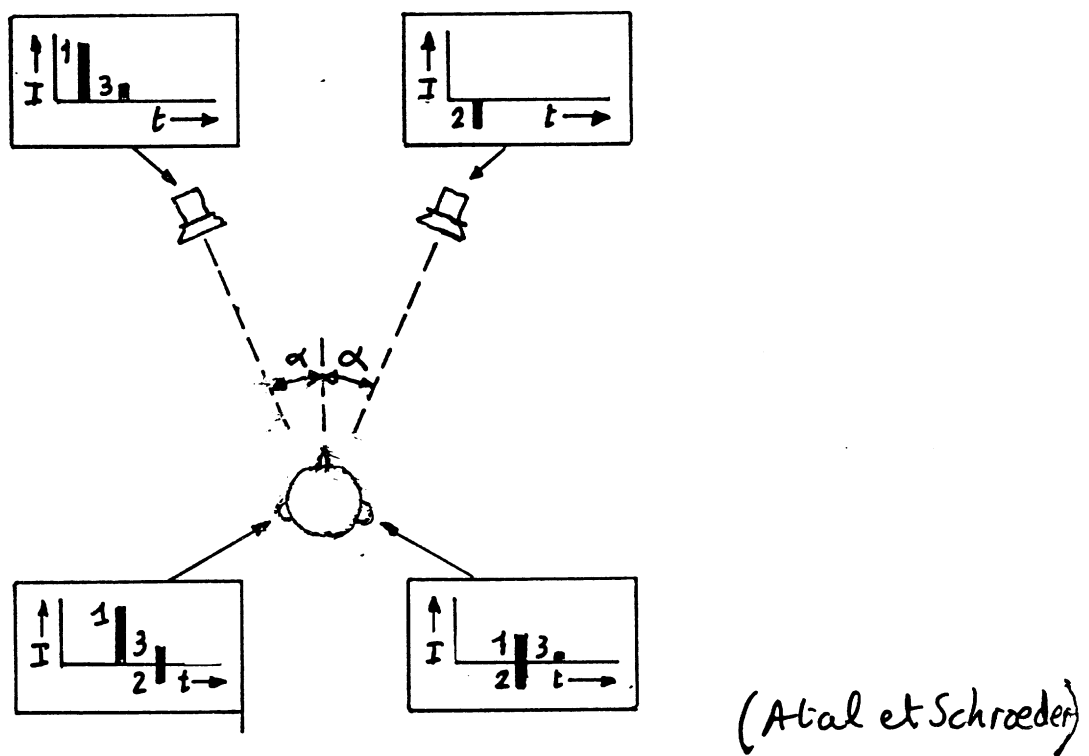


Figure 5: Principe de compensation transaurale

Acoustique des salles

Evaluation subjective

Explications

Ce questionnaire sert à caractériser la qualité des places de l'auditorium Olivier Messiaen lors de la diffusion de musique instrumentale ou orchestrale. Il reproduit un questionnaire largement utilisé de part le monde ayant déjà fait ses preuves.

La **Précision** se rapporte à la possibilité de percevoir les détails de la musique. La **Réverbérance** se rapporte au degré de réverbération perçue dans la salle; tandis que l'**Enveloppement** se rapporte à l'aspect spatial du son perçu, à la sensation d'être entouré par le son. L'**Intimité** se rapporte au degré d'identification avec l'exécution, si l'on se sent auditivement impliqué ou détaché. L'**Intensité Sonore** doit être évaluée par rapport à ce que l'on considère acceptable pour la taille des sources sonores. L'**Equilibre Tonal** décrit l'impression d'intensité relative des graves et des aigus par rapport au médium. Le **Bruit de Fond** tient compte de toutes les gênes sonores, y compris issu du public. L'**Impression Générale** se rapporte à l'appréciation globale de qualité acoustique de la salle.

Les six premières rubriques s'évaluent par un trait vertical sur l'échelle linéaire tracée sur le questionnaire. Les deux dernières s'évaluent en sélectionnant la case choisie.

Indiquez bien votre place sur le questionnaire et éventuellement vos commentaires au verso. A la fin du concert, n'oubliez pas l'évaluation du questionnaire (ci-dessous).

Merci de votre participation

Evaluation du questionnaire

Quel poids accordez-vous aux différentes rubriques pour juger de l'impression générale ?

	Fort	Moyen	Faible
1. Précision	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2. Réverbérance	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3. Enveloppement	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4. Intimité	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
5. Intensité Sonore	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
6. Equilibre Tonal	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
7. Bruit de Fond	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Salle: Auditorium Olivier-Messiaen, Radio France
Œuvre: _____
Date: _____
Heure: _____

Nom ou Pseudonyme: _____
Position: (No du Siège) _____

Remarques (utiliser le verso): _____

1. Précision

Confus
Précis

2. Réverbérance

Court
Long

3. Enveloppement

Large
Etriqué

4. Intimité

Distant
Proche

5. Intensité Sonore

Fort
Faible

6. Equilibre Tonal

Trop
Pas assez

aigu
médium
grave

7. Bruit de Fond

Inaudible
Acceptable
Génant
Intolérable

8. Impression Générale

Exécrable
Mauvais
Médiocre
Correct
Bon
Très bon
Excellent

Figure 6: Exemple de questionnaire d'évaluation d'une salle