

Validation d'un modèle objectif de la perception de la
qualité acoustique dans un ensemble de salles de concerts et
d'opéras

Eckhard KAHLE

email: kahle@ircam.fr

Thèse de doctorat

Directeur de thèse : Michel BRUNEAU
Laboratoire d'accueil : IRCAM, Paris

Laboratoire d'Acoustique de l'Université du Maine, Le Mans

Thèse présentée le 27. juin 1995 à Trondheim, Norvège,
devant le jury composé de :

Michael BARRON
Jens BLAUERT
Michel BRUNEAU
Claude DEPOLLIER
David GRIESINGER
Jean-Pascal JULLIEN
A. Harold MARSHALL
Jean-Dominique POLACK

Sommaire

Remerciements	5
1 Introduction	7
2 Etude bibliographique : évolution de la notion des facteurs perceptifs et de la notion de multidimensionalité en acoustique des salles	11
2.1 Introduction	11
2.2 L’acoustique des salles avant Sabine	12
2.3 Wallace Clement Sabine (1868 - 1919)	13
2.4 De Sabine à Beranek	14
2.5 <i>Music, Acoustics & Architecture</i> de Leo L. Beranek	15
2.5.1 Discussion	17
2.5.2 Beranek: Concert hall acoustics—1992	18
2.6 Göttingen, Berlin et Dresde: les recherches après Beranek	19
2.7 Les travaux du groupe de Göttingen / AT&T Bell Labs (1965 - 1976)	21
2.8 Les travaux du groupe de Berlin (1968 - 1976)	22
2.9 Les travaux du groupe de Dresde (1966 - 1980)	24
2.10 Les thèses de Lehmann et de Wettschurek	26
2.10.1 Lehmann (1975), sous la supervision de Reichardt	26
2.10.2 Wettschurek (1976)	27
2.11 Barron et Marshall: importance des réflexions latérales	31
2.12 Impression d’espace	32
2.13 Griesinger	32
2.13.1 Modèle de localisation de l’oreille humaine	33
2.13.2 Fluctuations de la localisation et impression d’espace	33
2.13.3 Discussion	34
2.13.4 Proposition d’amélioration du critère IACC	35
2.14 Etudes utilisant des questionnaires	35
2.14.1 Hawkes & Douglas (1971)	35
2.14.2 Barron (1988)	36
2.15 Eléments psycho-acoustiques	38
2.15.1 Intégration de l’énergie des réflexions précoces au son direct	38
2.15.2 Effets du niveau sonore	40
2.15.3 Masquage postérieur	40
3 Travaux antérieurs de l’équipe acoustique des salles de l’Ircam	43
3.1 Discussion à partir de l’étude bibliographique	43
3.2 Facteurs perceptifs et le programme Indscal	44
3.3 La thèse de Catherine Lavandier	46
3.4 Nouvelle interprétation des tests en laboratoire par Jean-Pascal Jullien	48
3.4.1 Effets du niveau précoce: DirE	48
3.4.2 Effet de salle: Rev	49

3.4.3	Réverbérance subjective	50
3.4.4	Perception des réflexions dans la plage temporelle [40 ms,80 ms]	52
3.4.5	Critères liés à l'impression d'espace	53
3.4.6	Critères liés aux effets fréquentiels	54
3.4.7	Le jeu final des facteurs perceptifs et des critères objectifs correspondants	55
3.5	Sensibilités perceptives	55
3.6	Discussion	57
3.7	Le questionnaire structuré	57
4	La campagne européenne de mesures et de tests d'écoute	59
4.1	Les salles	60
4.2	Le protocole de mesures employé	61
4.2.1	Caractérisation d'une salle par sa réponse impulsionnelle	61
4.2.2	Choix d'emplacement des sources et récepteurs	62
4.2.3	Directions d'émission de la source	64
4.2.4	Directivités du microphone	64
4.3	Analyse des mesures, calcul des critères acoustiques	64
4.4	Le questionnaire structuré	65
4.5	Les tests d'écoute structurés	67
4.6	Les œuvres écoutées et leurs forces sonores	69
5	Les différentes influences sur les réponses aux questionnaires	71
5.1	Conditions pour un test "idéal"	71
5.2	Considérations théoriques	73
5.3	Approximations	74
5.4	Elimination du terme $\mathcal{H}(s_j)$	76
5.4.1	Imputation de $\mathcal{H}(s_j)$ dans le terme $q_i(k)$	77
5.4.2	Discussion sur le processus d'itération	78
5.5	Séparation des différents paramètres	79
5.5.1	Calcul des $\mathcal{H}(s_j)$	80
5.5.2	Vérification de l'efficacité du processus d'élimination du terme $\mathcal{H}(s_j)$; estimation du terme \mathcal{R}	81
5.5.3	Influence de l'œuvre, $\mathcal{G}(o_m)$	83
5.5.4	Influence de l'acoustique, $\mathcal{F}(p_k)$	84
5.5.5	Comparaison des influences de l'acoustique et de l'œuvre dans le cas des tests d'écoute à La Villette	85
5.5.6	Influence de l'interaction acoustique/œuvre, $\mathcal{I}(i_{m,k})$	86
5.6	Comparaison quantitative des différentes influences	86
5.6.1	Calcul des intervalles de confiance	87
5.6.2	Calcul des bornes théoriques des corrélations objectif/perceptif	88
5.7	Etude sémantique	88
6	Analyse des questionnaires seuls	93
6.1	L'exemple d'une salle: le Concertgebouw Amsterdam	93
6.1.1	Influence des sujets et de l'œuvre	97
6.2	Un autre exemple: la Musikvereinssaal à Vienne - biais global dû à l'œuvre	97
6.3	Influence de l'œuvre: la Philharmonie de Berlin	100
6.4	Conclusions préliminaires sur l'influence de l'œuvre	103
6.5	Etude qualitative de l'influence de l'œuvre	103
6.5.1	Différences significatives d'ensemble	103
6.5.2	Différences significatives pour des places identiques	105
6.6	Analyse de l'interaction entre acoustique et œuvre	108
6.6.1	Etude des différences par question, en fonction de la place	108
6.6.2	Eléments théoriques	109

6.6.3	Analyse quantitative de la variance du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$	110
6.6.4	Analyse de l'interaction acoustique/œuvre à partir d'ACPs	110
7	Modèle de réduction du nombre des questions du questionnaire	121
8	Analyse des mesures seules	129
8.1	Rappel et discussion du protocole de mesures	129
8.2	Calcul des critères acoustiques	130
8.3	Caractérisation de la source de mesures	131
8.4	Reconstitution d'une enceinte omnidirectionnelle	132
8.5	Limites dues au protocole de mesure	133
8.6	Analyse des mesures à partir d'ACPs	134
8.6.1	Critères de la thèse de Catherine Lavandier	135
8.6.2	La base de critères proposée par J.-P. Jullien	136
8.6.3	Toutes salles confondues	137
8.6.4	Comparaison des bases	140
9	Analyse de la correspondance objectif/perceptif	143
9.0.5	Structure des sous-chapitres par question	144
9.1	Puissance sonore	145
9.1.1	Seuils théoriques	145
9.1.2	Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la "puissance sonore"	145
9.1.3	Résumé: puissance sonore	152
9.2	Réverbérance	153
9.2.1	Seuils théoriques	154
9.2.2	Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la "réverbérance"	154
9.2.3	Résumé: réverbérance	157
9.3	Contraste	160
9.3.1	Seuils théoriques	160
9.3.2	Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur le "contraste"	160
9.3.3	Résumé: contraste	164
9.4	Balance générale	165
9.4.1	Seuils théoriques	165
9.4.2	Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la "balance générale"	166
9.5	Puissance des aiguës	167
9.5.1	Seuils théoriques	167
9.5.2	Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la "puissance des aiguës"	168
9.5.3	Résumé: puissance des aiguës	170
9.6	Puissance des graves	171
9.6.1	Seuils théoriques	172
9.6.2	Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la "puissance des graves"	172
9.6.3	Résumé: puissance des aiguës	174
9.7	Puissance des aiguës moins celle des graves (paig - pgrav)	174
9.8	Pâteux	175
9.8.1	Seuils théoriques	175
9.8.2	Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur "pâteux"	176
9.8.3	Résumé: pâteux	178

9.9	Heurté/fluidité	179
9.9.1	Seuils théoriques	179
9.9.2	Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur “heurté/fluidité”	179
9.9.3	fluidité	179
9.9.4	heurté	180
9.10	Intégration de l’effet de l’interaction	181
9.11	Choix d’une base de critères objectifs	184
9.11.1	Pertinence perceptive des critères objectifs	184
9.11.2	Réverbération, rapports énergétiques énergie précoce/énergie tardive	187
9.11.3	Choix d’une base	190
9.12	Les “autres” questions	190
10	Modèle mixte de l’influence de l’acoustique et de l’œuvre	197
10.1	Introduction	197
10.2	La puissance des instruments d’orchestre	197
10.2.1	Musique de chambre	198
10.2.2	Chanteurs et chœurs	198
10.3	Les œuvres écoutées et leurs forces sonores	199
10.4	Correspondance entre la force sonore et la question concernant la “puissance sonore”	200
10.4.1	Toutes salles confondues	200
10.4.2	Les salles de concerts	201
10.4.3	Les opéras	204
10.4.4	Les auditoriums	206
10.4.5	Conclusion sur les forces sonores	206
10.5	Quantification de la relation objectif / subjectif	206
10.6	Cohérence entre sujets	209
11	Conclusion	211
	Annexes	219
A	Définition des critères objectifs	219
A.1	Précritères (découpage de la réponse impulsionnelle effectué par le logiciel de mesure AMS)	219
A.2	Critères issus de la littérature	220
A.3	Critères du laboratoire d’acoustique des salles à l’Ircam	223
A.3.1	Critères de la thèse de Catherine Lavandier	223
A.3.2	Critères définis par Jean-Pascal Jullien	223
A.3.3	Critères utilisés et/ou définis dans le chapitre 9 de ce document	225
B	Modèle de réduction du nombre de questions, résultats détaillés par question	227
B.1	Coefficients et performances par question	228
	Bibliographie	248

Remerciements

J'adresse mes sincères remerciements à M. Michel Bruneau, Directeur du laboratoire d'acoustique de l'Université du Maine, qui a accepté d'être mon directeur de thèse et dont je garderai toujours en mémoire nos chaleureuses rencontres.

Je remercie vivement George Dodd et Jean-Dominique Polack, qui ont bien voulu accepter la tâche de rapporteur de thèse, ainsi que tous les membres du jury. C'est un grand honneur pour moi de pouvoir soutenir cette thèse à Trondheim, à l'occasion du 15^{ème} Congrès International d'Acoustique (ICA '95), devant les meilleurs spécialistes du domaine. J'en profite pour remercier également M. Pleurdeau, Président de l'Université du Maine, qui a bien voulu autoriser cette soutenance à l'étranger.

Je tiens à remercier l'Ircam et ses directeurs successifs, Pierre Boulez et Laurent Bayle, pour m'avoir accueilli dans leurs murs et m'avoir permis d'y poursuivre les travaux de cette thèse.

Je remercie l'équipe du laboratoire d'acoustique des salles de l'Ircam, à laquelle j'ai appartenu ces cinq dernières années. Je n'aurais pu imaginer meilleur endroit pour recevoir une formation scientifique: qualité et soin du travail, approche structurée et fondée, abondance et échanges d'idées.

Mes vifs remerciements vont à Olivier Warusfel, qui a repris la direction du laboratoire de Jean-Pascal Jullien en 1991 et qui a réussi à en maintenir la qualité excellente, mais dont je ne regrette que la modestie qui l'a amené à refuser de figurer dans mon jury de thèse.

Mes remerciements spécifiques vont à Georges Bloch pour nos discussions fructueuses qui ont largement influencées le contenu du chapitre 10.

Je remercie également mes collègues au sein de cette équipe: Gérard Bertrand, Federico Cruz-Barney, Richard Denayrou, Jean-Marc Jot, Christian Malcurt, Mireille Mein, Rozenn Nicol et Suzanne Winsberg.

Mes remerciements chaleureux vont à Andreas Weigend de l'Université de Boulder, pour nos discussions passionnantes qui m'ont permis de regarder mon travail sous d'autres éclairages.

Je voudrais accorder ici une place particulière à Leonard Bernstein, qui fut un ami très cher et qui a été déterminant dans ma décision de me destiner à l'acoustique des salles.

Je remercie tout spécialement Lucile Bertrand, ma future femme, pour son énorme soutien moral et pratique et son amour.

Je remercie tout particulièrement Jean-Pascal Jullien qui m'a accueilli au sein de son équipe à l'Ircam et qui m'a confié ce sujet de thèse. Je lui exprime toute ma gratitude pour sa générosité dans nos échanges et pour m'avoir incité à toujours pousser plus loin mes recherches. Je dois dire combien son esprit et ses idées transparaissent tout au long de cet exposé. Il m'est devenu un modèle scientifique et un ami très cher.

Chapitre 1

Introduction

La qualité acoustique des salles de concert a toujours été un sujet fascinant pour les musiciens comme pour le public, mais aussi pour les architectes comme pour des générations de chercheurs. La diversité des personnes intéressées et exposées au problème et la complexité du sujet ont fait que la science de l’acoustique, bien plus que la plupart des autres sciences, a toujours conservé une aura d’énigme, d’inexplicable et qu’un grand nombre de préjugés persistent : le nombre d’or, représentatif de l’harmonie universelle, assurerait l’infaillibilité d’une salle ; ou, la présence de bouteilles cassées dans l’espace vide situé sous la scène donnerait une meilleure sonorité aux instruments ; ou encore, l’utilisation du bois comme matériau de construction permettrait qu’une salle résonne comme un *bel instrument de musique*. Chaque fois que s’ouvre une nouvelle salle et que sa qualité est jugée insuffisante, la polémique reprend avec des arguments tels que les anciennes salles ont une meilleure qualité acoustique, qu’une salle doit vieillir pour avoir une bonne acoustique ou, même, que la qualité acoustique finale d’une salle serait déterminée par la musique qui y aura été jouée (cf. par exemple [Loo12], cité dans [Lav89]).

Malgré ce pêle-mêle de commentaires et d’opinions, il faut pourtant mener et poursuivre une recherche scientifique, essayant de faire la part des choses, de discerner les effets des différentes caractéristiques d’une salle, et aussi, de préciser la notion de “qualité acoustique” d’une salle.

Reprenre l’idée qu’une salle doit “sonner comme un bel instrument de musique” nous permet d’évoquer un sujet qui peut sembler *a priori* très éloigné de cette thèse : la qualité d’un violon. Par ce parallèle nous essaierons d’introduire quelques questions essentielles qui seront soulevées tout le long de cet exposé.

Combien d’articles peut-on recenser sur “le secret” des violons de Stradivarius ? Et combien de gens ont été persuadés d’avoir trouvé ledit secret ?

La quête du secret de Stradivarius, qui date de plusieurs siècles, met en évidence une idée reçue, plus ancienne encore : à une qualité observée correspondrait une cause — et *une seule*. On a pu remarquer combien la vision *unidimensionnelle* est répandue.

En analysant un peu plus en détail ce qui fait la qualité d’un violon, on s’apercevra rapidement que cette vision unidimensionnelle amène à une double erreur :

- d’une part, la description de la qualité acoustique d’un violon est le résultat d’un jugement complexe sur plusieurs aspects. Tous les violons de Stradivarius ne sont pas de même qualité — il n’en existe pas uniquement de “meilleurs” et de “moins bons”, mais surtout, qui sonnent “différemment” — tous excellents, mais différents. Les musiciens professionnels sont conscients de ces différences, et ils parlent d’un violon “parfait pour la musique de chambre”, ou d’un autre, “bien adapté pour un soliste”, ayant un timbre un peu moins chaleureux ou équilibré mais une puissance permettant de “passer” à travers un orchestre symphonique. En fonction de leur goût personnel et de l’utilisation envisagée, les musiciens accordent plus ou moins d’importance aux différents aspects, comme la “rondeur” et la “puissance” des graves ou la “brillance” des aigus ;
- d’autre part, la qualité d’un violon n’est certainement pas déterminée par un seul des

paramètres de la facture instrumentale. La personne qui a déjà écouté les changements introduits par un réglage (déplacement de l'âme à l'intérieur de l'instrument), ou par un changement de chevalet, de la barre ou parfois même d'une corde, comprendra tout de suite que la qualité d'un instrument dépend d'une multitude de facteurs de lutherie et de leur interaction.

D'autres points sont à souligner :

- un dérèglement (mauvais réglage de l'âme, mauvais chevalet) fait perdre beaucoup de ses qualités, même à un très bon instrument. S'il en conserve certaines, le résultat global sera généralement moins bon qu'avec un instrument de moindre qualité ayant un réglage parfaitement adapté. Ainsi un facteur défaillant n'est pas récupéré par l'excellence de tous les autres facteurs réunis. La qualité d'un violon est d'abord déterminée par l'absence de défauts, et ensuite, seulement, l'excellence de facteurs isolés peut apporter ce qui fera la différence entre un "bon" et un "excellent" violon ;
- en ce qui concerne l'âge, si le vieillissement du bois a des influences sur ses caractéristiques d'élasticité (au sens physique), son influence sur la qualité de l'instrument n'a, jusqu'à présent, pas pu être prouvée. La cote des instruments de Stradivarius, déjà de son vivant, indique bien que l'âge ne suffit pas à faire leur qualité ;
- indépendamment du génie de Stradivarius, les violons anciens, sont-ils vraiment les meilleurs, et si oui, pourquoi? A l'époque de Stradivarius, existait à Crémone, dans un rayon de quelques centaines de mètres, une densité importante de luthiers, aujourd'hui tous de grand renom. Cette concentration d'artisans a permis de construire d'emblée des instruments "sans défauts" et de se concentrer sur les facteurs d'excellence. Depuis, une telle densité de qualité artisanale ne s'est plus trouvée et, si encore quelques grands artisans construisent de très bons violons, le savoir faire s'est en partie perdu. La transmission du savoir, qui se faisait auparavant oralement et artisanalement, de génération à génération et dès l'adolescence, se fait aujourd'hui particulièrement par l'écriture et la lecture d'articles scientifiques, chaque chercheur apportant sa part à une connaissance de plus en plus approfondie du sujet ;
- le premier pas pour une approche scientifique consiste à donner une *caractérisation objective* du violon. On connaît deux approches différentes, ou plutôt complémentaires, pour cette caractérisation: la première, qu'on appellera "approche de construction", consiste à répertorier, mesurer et comprendre les éléments constitutifs du violon, le bois utilisé, les formes géométriques employées, l'épaisseur et les courbures du bois, le chevalet et l'âme etc. (cf. [Cre81], également [KW94]). Dans la seconde, appelée "approche signal", il s'agit de mesurer et décrire le son d'un violon, la qualité et la longueur de l'attaque, le spectre et la force d'un son entretenu, etc.

Si l'auditeur est immédiatement intéressé par la qualité sonore d'un violon, le luthier passe nécessairement par l'approche de construction pour atteindre une certaine qualité du son, définie elle-même plus tard par l'approche signal. D'ailleurs, il se pourrait que *plusieurs* jeux de paramètres de construction aboutissent à une qualité identique.

Comment mesurer le son d'un violon, lorsqu'on sait qu'un violoniste ne peut jamais répéter deux sons à l'identique? Si son jeu n'est pas reproductible, par contre, le violoniste adaptera son jeu à l'instrument. Cela nous amène au principe de *rétroaction*, où le violoniste est influencé dans son jeu par la qualité du violon, et où la qualité finale du son du violon est déterminée par la qualité du violoniste — et par sa capacité d'adaptation au violon.

Le champ de la science physique, dite "objective", est resté limité, puisqu'elle se heurte encore au problème de la *définition* de la qualité d'un violon. Heinrich Dünwald ([Dün88], [Dün90]), travaillant sur "la caractérisation de la qualité des violons en utilisant un modèle

objectif”, a dû recourir à la définition suivante: “un bon violon est celui qui comporte toutes les caractéristiques des violons de la grande époque de lutherie italienne (c.-à-d. celle de Stradivarius)”.

Est-ce vraiment la seule possibilité de définir la qualité d’un violon? Même s’il était possible, avec les connaissances actuelles, de donner une caractérisation *objective*, pour déterminer les valeurs de *préférence*, pour un violon comme pour une acoustique, il est nécessaire d’effectuer auparavant des évaluations *subjectives* par des sujets avertis.

On terminera avec le violon par une anecdote mettant en évidence les dangers d’une recherche des facteurs objectifs influençant la qualité subjective. Jim Woodhouse et Claire Barlow, [WB86], ont effectué des investigations sur des morceaux de violons cassés, conservés au British Museum. Par la microscopie électronique ils ont découvert une très fine couche de lave sous le vernis d’un violon de Stradivarius. Mais une vérification sur un violon de Guarnerius del Gesù (autre luthier de la même époque, ayant une production moins grande mais d’aussi bonne qualité) a démontré l’absence de cette couche. Il est parfois difficile de faire le tri entre une cause et une coïncidence accidentelle.

A partir de ce parallèle, nous dégagerons quelques grands principes sur la qualité acoustique d’une salle de concert ou, plus généralement, d’un lieu de spectacles :

facteurs miracles : comme pour un violon, il n’existe pas de facteur miracle qui assurerait la qualité infaillible d’une salle. Grâce aux méthodes scientifiques, les hypothèses comme celle des bouteilles cassées ont heureusement pu être rejetées. La qualité d’une salle, comme celle d’un violon, est d’abord déterminée par l’absence de défauts ; la présence d’un défaut ne peut que partiellement être compensée par l’excellence sur les autres facteurs ;

influence de l’âge : objectivement, on peut affirmer qu’une salle ne subit pas de changements du comportement avec le temps (les caractéristiques de réflexion des parois, qu’elles soient en bois ou en plâtre, ne changent pas avec le temps). Mais il existe certainement une influence subjective qui fait ou non sa renommée. Une salle remarquée attire les meilleurs musiciens, qui essaieront d’y donner le meilleur d’eux-même. Et la qualité de la performance musicale ainsi que les attentes des auditeurs, avec un *a priori* positif, influenceront leurs jugements. Il faut donc un certain temps pour que la réputation d’une salle s’instaure, sans que le moindre changement objectif n’ait eu lieu ;

salles anciennes : et, les salles anciennes, sont-elles vraiment les meilleures? Indéniablement, il existait aux XVIII^e et XIX^e une grande qualité artisanale de construction de salles, qui se référait aux salles existantes ayant fait leurs preuves. L’approche consistant à copier des salles existantes sera discutée dans le chapitre suivant. Par ailleurs, il ne faut pas oublier qu’à cette même époque les compositeurs écrivaient la musique *pour* les lieux, assurant ainsi l’adaptation de la musique aux lieux d’écoute ;

caractérisation objective : comme pour le violon, il existe deux approches différentes — ou complémentaires — pour une caractérisation objective. L’“approche physique” (approche géométrique) consiste à décrire les paramètres de construction, c.-à-d. le volume et la forme de la salle, les matériaux des parois, etc. L’approche signal, qu’on appellera dans le cas des salles “approche perceptive”, consiste à donner une description de la *transformation* effectuée par la salle entre une source et un récepteur. Cette transformation sera caractérisée à l’aide de critères objectifs et de facteurs perceptifs. Plusieurs géométries de salles peuvent aboutir à des résultats perceptivement identiques ;

caractérisation objective et rétroaction : contrairement au cas du violon, il existe, pour les salles de concert, des signaux d’excitation reproductibles qui permettent de caractériser totalement la transformation de la salle. Le signal-type utilisé est une impulsion, diffusée par un pistolet, par l’éclatement d’un ballon ou par un haut-parleur. On parle alors d’une *réponse impulsionnelle*, caractérisant la transformation effectuée par la salle. Le principe

de rétroaction, soulevé dans le cas du violon, se retrouve dans les salles de concert : une salle doit permettre aux musiciens de donner le meilleur d’eux-même et d’adapter leur jeu. Mais la mesure objective de l’acoustique est possible à un emplacement sur scène comme à un emplacement dans la salle. On peut alors établir des critères de la qualité acoustique sur scène comme dans la salle (qui ne sont pas forcément semblables).

Les musiciens disent souvent que leurs instruments “sonnent” (ou ne sonnent pas) dans une salle donnée — mais lorsqu’ils jugent le son de leur instrument, celui qui arrive à leurs oreilles n’est pas uniquement déterminé par l’instrument mais également par la transformation apportée par la salle. Très peu des paramètres d’une salle influencent réellement le comportement des instruments : il s’agit surtout du matériau du plancher de la scène, influençant le rayonnement des violoncelles et des contrebasses, qui sont en contact direct avec le sol ;

définition de la qualité acoustique : la qualité acoustique d’une salle ne peut pas uniquement être décrite par un jugement de type “mauvais — bon”. Comme pour un violon, il existe des salles qui sonnent très différemment, mais qui peuvent être aussi bonnes l’une que l’autre. Il faut donc rassembler le plus d’informations possible pour une définition plus précise. La qualité acoustique d’une salle, ou même de différents emplacements à l’intérieur d’une salle, sera définie grâce à la *totalité* des aspects perceptifs qui permettront de distinguer les différentes situations acoustiques. La qualité, dans le sens de préférence subjective, n’est donnée qu’après l’évaluation de tous ces aspects, tenant compte en outre du goût personnel de l’auditeur et de l’adaptation de la salle à un type de musique ou même à une œuvre musicale spécifique. La notion de qualité d’une salle (dans le sens de préférence) rejoint alors le principe qui associe l’utilisation d’un violon à un besoin spécifique : une salle est bonne quand ses capacités rejoignent une attente spécifique.

Chapitre 2

Etude bibliographique : évolution de la notion des facteurs perceptifs et de la notion de multidimensionalité en acoustique des salles

2.1 Introduction

Le but principal de cette étude bibliographique est de dresser un bilan de l'évolution de la vision de l'acoustique des salles. Nous nous intéresserons particulièrement à l'évolution des points suivants:

- la multidimensionalité de la qualité acoustique d'une salle;
- la notion et les définitions des critères objectifs, leur indépendance et leurs corrélations;
- la notion des facteurs perceptifs, aspects indépendants de notre perception de la qualité acoustique et leurs liaisons avec des critères objectifs.

Outre l'évolution générale des sciences, celle de l'acoustique des salles, dans ce dernier siècle, a été marquée par deux événements, sans rapport apparent, mais tous les deux déterminants. Il s'agit, d'une part, des travaux de Wallace Clement Sabine (1868 - 1919) [Sab22], et de la construction du Boston Symphony Hall (1900), sous le conseil acoustique de Sabine, salle renommée pour son acoustique excellente; d'autre part, il s'agit de l'échec total du Philharmonic Hall (au Lincoln Center for the Performing Arts) à New York (1962), et les multiples tentatives d'amélioration et de réfection de la salle. L'histoire de la salle de New York a ceci de particulier que le projet de construction a permis de dégager un budget de recherches en acoustique des salles et a donné lieu à la rédaction d'un ouvrage, publié au moment de l'ouverture de la salle. Cet ouvrage est l'œuvre de Leo Beranek [Ber62] et reste encore aujourd'hui une référence. Même si la construction de la salle n'a pas respecté tous les critères exposés dans le livre (cf. e.g. la discussion dans [Bar93]), la confrontation de cet échec à la description des critères acoustiques a été très instructif. On verra plus loin que la plupart des critères objectifs aujourd'hui considérés pour décrire la qualité acoustique d'une salle ont été découverts ou définis après l'échec de la salle de New York.

2.2 L’acoustique des salles avant Sabine

L’histoire de la musique occidentale, à partir du Moyen Age, commence avec une première période où l’on demande aux compositeurs de s’adapter à un lieu d’écoute donné plutôt que d’adapter les salles à des répertoires préexistants (cf. [Dar54] dans [Jul92]). On peut comparer, par exemple, la musique de Giovanni Gabrieli, composée pour l’église Saint Marc à Venise, et les cantates ou passions de Jean-Sébastien Bach, composées en grande partie pour les églises protestantes de Leipzig, Saint Thomas et Saint Nicolaï.¹ Récemment, une étude [Mey78] a clairement démontré l’influence des lieux sur les projets d’écriture et sur l’orchestration chez Joseph Haydn.

De toute manière, en ce temps là, on n’écoutait que la musique de l’époque : on pouvait sans problème demander aux compositeurs d’écrire pour un lieu spécifique, car, en règle générale, ils écrivaient l’œuvre pour cette seule occasion, c.-à-d. ce seul concert. Même plus tard, après qu’un public spécifique et plus nombreux se soit développé, les œuvres ont souvent été écrites pour une seule représentation (on pense par exemple aux symphonies qu’écrivait Haydn à Londres).

Les premiers concerts se déroulaient dans les “ball-rooms”, les salles de fêtes ou de réceptions des châteaux et cours européennes. Ce n’est que vers la fin du XVIII^e siècle, avec le développement de la bourgeoisie qu’apparaît la demande de véritables salles de concerts.

Pour diminuer les coûts et les risques de construction, on préféra s’inspirer des salles ayant fait leurs preuves musicalement ou acoustiquement : les salles de réception des châteaux.

On entre alors dans une époque qu’on pourrait appeler la “période de copies”.

Ces copies ont, en fait, souvent été très libres et ces “adaptations” ont parfois mené à des salles qui n’ont plus grande chose à voir avec leurs modèles : par exemple, le Concertgebouw Amsterdam (2200 places, ouverture en 1888) est une “copie” du Nouveau Gewandhaus à Leipzig (1500 places, 1886), adaptation de l’Ancien Gewandhaus à Leipzig (400 places, 1780; balcons ajoutés en 1842, 570 places), lui-même une copie de la salle de réception de l’empereur autrichien (Hofburgsaal) à Vienne (250 places, 1744). Dans ce laps de temps, le nombre de spectateurs ainsi que le volume de la salle s’est démultiplié.

Mais les constructeurs ont su garder les principes les plus importants des salles réputées, qui servaient de modèle pour la copie en question, malgré quelques très mauvaises réalisations qui durent être délaissées ou détruites — sauf quand le feu s’en chargeait lui-même.²

Pour l’opéra, ce principe de copie existait déjà presque un siècle auparavant et c’est celui du baroque italien qui servit longtemps de modèle (Opera di Parma, aussi nommé Teatro Farnese, 1628, ou, pour citer l’exemple le plus connu aujourd’hui, le Teatro alla Scala, Milan, 1778). Il a fallu un Richard Wagner pour sortir du modèle italien et rompre avec la tradition de copier des modèles de base ayant prouvé leur efficacité.³

Ce mode de construction des salles de concerts et d’opéras a fourni un nombre d’ouvrages conséquent : outre de nombreux articles décrivant les découvertes des secrets d’une salle, secrets qui prêtent souvent à rire aujourd’hui, on trouve surtout des ouvrages détaillés et comparatifs sur l’architecture et la construction des salles, avec les plans de constructions, les dimensions et les matériaux utilisés (par exemple [Dum74, 1774], [CF60, 1860] ou voir l’introduction du livre de Barron, [Bar93]).

Pourtant les critiques sur le manque profond de connaissances scientifiques étaient nombreuses, le fameux article de Charles Garnier n’en étant qu’un exemple ([Gar80], d’après [Bar93]). Sabine encore, dans son article intitulé “Reverberation” ([Sab00]), se moque de ce

1. Le temps de réverbération de l’église St Thomas, à l’époque de Bach, est évalué, à partir de dessins et d’estampes de cette période, à environ 1,7 secondes [For85], tandis que celui de St Marc a toujours été supérieur à 6 secondes.

2. Le danger d’incendie était encore accru pour les opéras nécessitant un très grand nombre de chandelles pour leur éclairage. On rappellera le nom de l’opéra de Venise, “La Fenice”, qui trouve son origine dans l’histoire du Phénix renaissant de ses cendres — cet opéra brûla sept fois en un demi-siècle.

3. L’opéra de Bayreuth (1876) est lui-même basé sur celui de Riga [Ber62], avec fosse d’orchestre partiellement couverte, — que l’on considérait alors comme raté.

manque de principes sérieux, tout en évoquant les limites de la copie :

“No one can appreciate the condition of architectural acoustics — the science of sound as applied to buildings — who has not with a pressing case in hand sought through the scattered literature for some safe guidance . . . The most definite and often repeated statements are such as the following, that the dimensions of a room should be in the ratio 2 : 3 : 5, or according to some writers, 1 : 1 : 2, and others, 2 : 3 : 4; it is probable that the basis of these suggestions is the ratios of the harmonic intervals in music, but the connection is untraced and remote. Moreover, such advice is rather difficult to apply; should one measure the length to the back or to the front of the galleries, to the back or the front of the stage recess? Few rooms have a flat roof, where should the height be measured? One writer, who had seen the Mormon Temple, recommended that all auditoriums be elliptical. Sanders Theatre is by far the best auditorium in Cambridge and is semicircular in general shape, but with a recess that makes it almost anything; and, on the other hand, the lecture-room in the Fogg Art Museum is also semicircular, indeed was modeled after Sanders Theatre, and it is the worst. But Sanders Theatre is in wood and the Fogg lecture-room is plaster on tile; one seizes on this only to be immediately reminded that Sayles Hall in Providence is largely lined with wood and is bad. Curiously enough, each suggestion is advanced as if it alone were sufficient.”

2.3 Wallace Clement Sabine (1868 - 1919)

W.C. Sabine, jeune professeur de physique à l’université de Harvard, a été appelé pour rectifier une nouvelle salle de cours, le Fogg Art Museum, copie déjà d’une autre salle de cours, le Sanders Theatre (cf. la citation ci-dessus). Plus tard il sera aussi consultant acoustique pour la Boston Symphony Hall. Non seulement il comprit très rapidement que le problème qualitatif de la salle de cours était un temps de réverbération excessif (supérieur à cinq secondes), mais, par l’introduction des coussins absorbants, il trouva la correspondance quantitative entre la surface d’absorption, le volume et le temps de réverbération d’une salle. Cette relation, la formule de Sabine, s’écrit dans une formulation d’aujourd’hui :

$$TR[s] = 0.16[s/m] * V[m^3]/A[m^2], \quad (2.1)$$

avec : TR = temps de réverbération, en secondes ; V = volume de la salle, en m³ ; A = surface équivalente d’absorption, en m².

Cette formule de Sabine présente la première solution mathématique et quantitative d’un problème en acoustique des salles. A partir des connaissances des matériaux⁴ et des dimensions (donc le plan) de la salle, on pouvait désormais prédire le temps de réverbération finale de la salle. Ceci a ouvert la voie pour “copier” des salles réputées pour leurs qualités acoustiques plutôt qu’en copiant aveuglement les éléments architecturaux.⁵

Sabine était conscient que le TR n’est pas suffisant pour décrire toute la qualité acoustique d’une salle. On cite, de nouveau, son article “Reverberation” ([Sab00] ou [Sab22]). Dans les termes d’aujourd’hui on dirait qu’il donna la première description multidimensionnelle de la qualité acoustique d’une salle :

“In order that hearing may be good in any auditorium, it is necessary that the

4. Sabine même a continué ses recherches en mesurant les coefficients d’absorption des matériaux couramment utilisés dans le bâtiment et les salles de spectacles.

5. Il est d’ailleurs extrêmement intéressant de voir que Sabine même, pour tout autre aspect que le temps de réverbération, qui était calculé d’après sa formule — en plus avec une erreur relativement large — copiait des modèles, dans ce cas précis l’ancienne salle de musique à Boston (Boston Music Hall) et le Gewandhaus de Leipzig. Il avait trouvé une manière scientifique pour un aspect de l’acoustique d’une salle, mais il se fiait à la copie pour les autres aspects, pour lesquels il n’avait pas encore trouvé des descriptions scientifiques. D’ailleurs, jusqu’à la fin prématuré de sa vie il essayait de trouver des descriptions scientifiques pour d’autres aspects, sans toutefois y parvenir.

sound should be sufficiently loud; that the simultaneous components of a complex sound should maintain their proper relative intensities; and that successive sounds in rapidly moving articulation, either of speech or music, should be clear and distinct, free from each other and of extraneous noises. These three are the necessary, as they are the entirely sufficient, conditions for good hearing. The architectural problem is, correspondingly, threefold, and in this introductory paper an attempt will be made to sketch and define briefly the subject on this basis of classification. Within the three fields thus defined is comprised the whole of architectural acoustics.”

Dans la suite de la discussion, il nomme les trois facteurs comme :

1. Loudness.
2. Distortion of Complex Sounds: Interference and Resonance.
3. Confusion: Reverberation, Echo and Extraneous Sounds.

On note que ceci est une description de la qualité acoustique en termes de facteurs perceptifs. Pour les deux premiers facteurs Sabine se contente de donner des commentaires très clairvoyants, mais généraux, et ne définit pas de critères mesurables pour quantifier un effet quelconque. Pour le troisième facteur, par contre, il donne un traitement complet et scientifique et définit ainsi le premier critère objectif, le temps de réverbération. Sabine mesurait le temps de réverbération à l'aide de tuyaux d'orgue, d'un chronomètre et avec ses oreilles. Dans la plupart des standards d'aujourd'hui le temps de réverbération est défini comme une régression linéaire sur la pente de la décroissance intégrée [Sch65], dans la plage énergétique de -5 à -35 dB par rapport au niveau maximal [ISO93].

La clairvoyance de Sabine reste étonnante; on verra plus tard que les mêmes facteurs perceptifs, ou des facteurs très proches, apparaîtront à l'issue d'autres études, notamment celle de l'équipe de Berlin (cf. chapitre 2.8).

2.4 De Sabine à Beranek

Les travaux de Sabine ont marqué le début de la science de l'acoustique des salles. Pourtant, les années après la mort de Sabine ont vu un retour à une simplification de la description des phénomènes acoustiques. La multidimensionalité de la qualité acoustique, clairement évoquée par Sabine, a été assez négligée, principalement parce qu'une description scientifique n'existait que pour le processus de la réverbération, et non pas pour les autres aspects. La nuisance potentielle de la réverbération a même amené des chercheurs à prescrire des salles de concerts s'approchant d'une situation de plein air [Wat23].

Au lieu d'une approche globale, l'attention des chercheurs se focalisait sur des points précis. On pense, d'une part, à la description des phénomènes objectifs: reformulation de la formule de Sabine par Eyring [Eyr30], densité modale dans les salles [KT54], [Sch54]. D'autre part, sur le plan perceptif, à la découverte de l'effet de précedence [Bék30], [Jef48], [Haa51], ou [CM82] et aux travaux sur l'intégration de l'énergie des premières réflexions [LB58], [LB59], [LB60], [LB61b], [LB64], [Haa51], [RS66], [AA73].

Ces travaux ont permis l'introduction de facteurs perceptifs supplémentaires: Sabine pensait, en parlant de trois facteurs perceptifs dans la qualité acoustique d'une salle, à un champ diffus et donc, dès le début de la réponse impulsionnelle, à une décroissance exponentielle. Ses trois facteurs peuvent alors se contenter de décrire les aspects globaux de la réponse impulsionnelle, la puissance (c.-à-d. l'énergie totale de la réponse impulsionnelle), la distorsion (c.-à-d. la balance, ce qu'intègre la balance spectrale ainsi qu'une balance spatiale entre les différentes sources sonores dans une salle) et, troisièmement, la réverbération (c.-à-d. la décroissance de la réponse impulsionnelle). L'analyse des réponses impulsionnelles a montré que la décroissance dans une salle n'est pas exponentielle à partir du début de la réponse, et les travaux sur l'intégration de l'énergie des premières réflexions ont montré les effets perceptifs résultants. Par

conséquent, l'énergie des premières réflexions peut amener à des changements de la perception de la qualité acoustique dans une salle sans pourtant changer ni l'énergie totale ni le temps de réverbération de la salle. Il s'en suit qu'il faut au moins un facteur perceptif supplémentaire pour en tenir compte.

Depuis, plusieurs chercheurs ont étudié les liens entre l'énergie des réflexions et le facteur de l'intelligibilité du discours musical ou de la parole, et ont essayé de définir une frontière entre l'énergie dite "utile" et l'énergie dite "nuisible", menant à l'introduction du facteur perceptif de la "clarté" ou de "l'intelligibilité". Parmi les critères objectifs proposés comme étant liés à ce facteur de la clarté se trouvent la "Deutlichkeit" D d'après Thiele, [Thi53], le "Hallmaß" B d'après Beranek, [BS65], le "modulation transfer function" de Houtgast & Steeneken, [HS73], le "rapport signal sur bruit" S/N de Lochner & Burger [LB58], le "Hallabstand" H ou le "Raumeindrucksmaß" R d'après Reichardt [Rei70, RL78a] et l'indice de clarté C80 d'après Abdel Alim, [AA73], [RAAS75].

2.5 *Music, Acoustics & Architecture* de Leo L. Beranek

Il a fallu attendre Leo L. Beranek [Ber62] pour obtenir une nouvelle approche générale de la définition de la qualité acoustique. Sa description des différents aspects perceptifs mérite d'être reproduite en entier. Il est surprenant de voir la minutie de la description, surtout quand on sait qu'elle est issue non pas d'une étude en laboratoire, mais d'interviews de professionnels de la musique et d'une expérience approfondie d'écoutes de l'auteur dans des lieux de spectacles.

Son étude des aspects perceptifs se base sur :

- des interviews de chefs d'orchestre, d'interprètes et de critiques musicaux ;
- des impressions de l'auteur. L'auteur assistait à au moins un concert dans chacune des salles, écoutant à partir d'au moins deux places différentes.

Le but de l'étude était de comparer des *salles* entre elles plutôt que de considérer la qualité acoustique à des endroits différents à l'intérieur d'une même salle. Sachant qu'à l'époque les possibilités de voyager et d'assister à des concerts dans différents endroits étaient beaucoup plus limitées pour le grand public, ce choix des personnes interrogées s'explique par le fait qu'elles seules avaient une expérience suffisante de nombreuses salles de spectacles, pouvant ainsi donner des jugements comparatifs, et relativement fiables, sur un ensemble de salles. Dans le projet de comparer des salles ces personnes présentent l'avantage que leurs places dans les différentes salles restent similaires : celle d'un chef d'orchestre est bien déterminée, celles des critiques musicaux sont souvent soit dans le milieu du parterre soit à l'avant du premier balcon. De plus, Beranek note que l'analyse des réponses d'un groupe d'auditeurs non expérimentés n'a pas permis de dégager des résultats intéressants.

Le choix reste néanmoins très critiquable, notamment en ce qui concerne les chefs d'orchestre. Si leurs jugements (les chefs d'orchestre sont ceux qui connaissent le plus de salles dans le monde) sont très importants pour la réputation d'une salle, la qualité acoustique à la place du chef peut être extrêmement différente de la qualité acoustique dans la salle même.

A partir des interviews et de ses écoutes de salles, Beranek distille un ensemble de 18 facteurs, voir la figure 2.1, extraite du livre. Puis il essaie d'en tirer des aspects indépendants et dresse le tableau suivant (termes correspondants à la figure, traduit en français) :

Attributs indépendants positifs :

- intimité
- vivacité
- chaleur
- puissance sonore du son direct
- puissance sonore du champ réverbéré

QUALITY		ANTITHESIS	
<i>Noun form</i>	<i>Adjectival form</i>	<i>Noun form</i>	<i>Adjectival form</i>
1 intimacy, presence	intimate	lack of intimacy lack of presence	non-intimate
2 liveness, fullness of tone reverberation	live reverberant	dryness deadness lack of reverberation	dry dead unreverberant
3 warmth	resonant warm	dryness	dry
4 loudness of the direct sound	loud direct sound	lack of bass	brittle
5 loudness of the reverberant sound	loud ...	faintness ... weakness ...	faint ... weak ...
6 definition, clarity	clear	faintness ... weakness ...	faint ... weak ...
7 brilliance	brilliant	poor definition	muddy
8 diffusion	diffuse	dullness	dull
9 balance	balanced	poor diffusion	non-diffuse
10 blend	blended	imbalance	unbalanced
11 ensemble	—	poor blend	unblended
12 response, attack	responsive	poor ensemble	—
13 texture	—	poor attack	unresponsive
14 no echo	echo-free anechoic	poor texture	—
15 quiet	quiet	echo	with echo echoic
16 dynamic range	—	noise	noisy
17 no distortion	undistorted	narrow dynamic range	—
18 uniformity	uniform	distortion	distorted
		non-uniformity	non-uniform

FIG. 2.1 - *Vocabulaire des attributs subjectifs de la qualité acoustique de Leo Beranek, figure reproduite de [Ber62].*

- diffusion
- balance et homogénéité
- ensemble

Attributs indépendants négatifs :

- écho
- bruit de fond
- distorsion
- inhomogénéité des places dans la salle

Attributs dépendants, c.-à-d. non-indépendants des attributs ci-dessus :

- clarté
- brillance
- attaque

- texture
- dynamique

2.5.1 Discussion

Pourquoi Beranek trouve-t-il autant d'attributs subjectifs, et, par ailleurs, peut-on être assuré de l'exhaustivité de la description? Les différents termes proposés sont issus de ses multiples entretiens avec des chefs d'orchestre, des musiciens et des critiques de musique. Si la base de données ainsi constituée semble suffisamment étendue pour assurer l'exhaustivité de la description, il faut tenir compte du fait que les jugements ont été émis de mémoire — et l'on connaît les limites de la mémoire auditive —, et qu'ils ne traduisent en aucun cas des impressions immédiates, qui auraient peut-être fourni plus de nuances et de finesse. Affirmer que les attributs n'ont pas été, au moins partiellement, doublés, aurait nécessité une étude sémantique approfondie. Premièrement, différentes personnes emploient des termes différents en parlant d'un même effet objectif ou perceptif. Deuxièmement, les mêmes mots ou attributs sont souvent interprétés comme faisant allusion à des effets différents. Des techniques statistiques (analyses multidimensionnelles, régressions multiples) auraient pu donner des indices sur le nombre réel des attributs indépendants, et donc des dimensions — mais ces techniques étaient peu disponibles à l'époque.

Le choix effectué par Beranek entre attributs indépendants et attributs dépendants reste critiquable sinon décevant. En effet, il est principalement déterminé par l'existence, ou non, d'un critère objectif correspondant. Quand il n'y a pas de critère correspondant, différent des autres critères déjà utilisés, l'attribut est décidé dépendant. De plus, on remarque que certains des attributs indépendants et dépendants pourraient être échangés sans que cela change l'interprétation générale et le nombre total des dimensions.

Une autre raison du nombre élevé des attributs se trouve dans l'ajout d' "attributs négatifs". Parmi eux, l'écho, le bruit de fond et la distorsion (déjà inclus dans la description de Sabine) font allusion à l'existence de défauts bien particuliers. Par contre, le paramètre de non-uniformité des zones d'écoute dans la salle est le résultat de la description de la qualité acoustique par salle plutôt que par endroit précis à l'intérieur d'une salle.

On conclura en disant que l'étude de Beranek ne permet de fixer ni un seuil supérieur ni un seuil inférieur du nombre de facteurs perceptifs, mais que ce nombre peut dépasser largement celui de trois, originalement évoqué par Sabine.

Quant aux critères objectifs proposés par Beranek, comme étant reliés aux aspects perceptifs, on peut s'étonner que le nombre des critères définis à partir des mesures acoustiques soit si réduit. Il s'agit principalement du temps de réverbération mesuré dans les différentes plages temporelles. Les autres critères sont de nature géométrique ou architecturale: volume et dimensions de la salle, nombre de spectateurs, matériaux utilisés, degré de diffusion, etc.⁶ Afin de prédire la qualité acoustique d'une salle à partir des mesures acoustiques ou à partir des plans d'un projet en construction, Beranek établit un classement ("rating scale"), en affectant des poids variables aux différents paramètres (ou déviations de ces paramètres d'un point optimal). Dans ce classement, le paramètre le plus important, ayant le poids le plus grand dans le calcul de la préférence globale, est la date d'arrivée de la première réflexion (*Initial Time Delay gap*, ITD), mesurée géométriquement à partir des plans de la salle. Ce paramètre est associé à la perception de l'intimité: une faible valeur contribue à assurer une bonne intimité, en réduisant acoustiquement la taille subjective de la salle. Il est issu de l'observation d'une grande intimité subjective dans les anciennes salles rectangulaires (comme la Musikvereinsaal à Vienne), où la faible largeur assurait l'existence de réflexions très précoces. Dans la salle de New York, Beranek voulait assurer l'effet bénéfique de ces réflexions précoces par un ensemble de réflecteurs

6. La définition des critères objectifs utilisés s'explique par deux facteurs: premièrement, par les systèmes de mesures acoustiques de l'époque, principalement adaptés aux mesures du TR. Deuxièmement, et plus important encore, le but de Beranek était de donner une classification des salles existantes ou en construction. Les autres critères objectifs risquent de varier beaucoup à l'intérieur d'une même salle (voir paragraphes suivants, cf. aussi [Pel90], [PVP91]), et ne sont pas accessibles à partir des plans architecturaux.

suspendus. La défaillance de la salle de New York a permis de comprendre que, d'un point de vue perceptif, les réflexions du plafond ne peuvent pas remplacer les réflexions latérales. Les recherches sur la salle de New York ont abouti, entre autres, à la découverte de l'importance des réflexions latérales et de leurs effets (cf. e.g. [SASW66], [Mar67], [Bar71], [And85] et voir les paragraphes suivants). Le critère de la date de la première réflexion (ITD) lui-même et son importance sur la perception a entre-temps été infirmé par plusieurs études ([Got73], [Leh76], [Bar88], [Bar93], [CDL93]).

2.5.2 Beranek : Concert hall acoustics—1992

L. Beranek a publié en 1992 ([Ber92]) un article de résumé des recherches en acoustique des salles menés après la publication de son livre ([Ber62]). Dans ce texte il se focalise sur *l'indépendance* des attributs perceptifs ainsi que sur les correspondances entre critères (ou, plus généralement, propriétés) objectifs d'une salle et attributs perceptifs.

Il distingue 7 attributs perceptifs importants (reproduits en anglais), qu'il *suppose* indépendants, encore une fois sans preuve rigoureuse :

1. Reverberance ;
2. Loudness ;
3. Spaciousness ;
4. Clarity ;
5. Intimacy ;
6. Warmth ;
7. Hearing on stage.

La liste d'attributs objectifs correspondants contient toujours la date d'arrivée de la première réflexion après le son direct (initial-time-delay gap), ainsi que le temps de réverbération en basses fréquences (*bass ratio*, [Ber62], cf. les résultats de Barron, [Bar88] dans le chapitre 2.14.2). On remarque aussi l'échange entre l'attribut de l'écoute entre musiciens, contenu dans la description perceptive, et la diffusion, contenu dans la liste d'attributs objectifs suivante :

1. Acceptable reverberation time ;
2. adequate loudness ;
3. a short initial-time-delay gap between the direct sound and the first reflection reaching the listener ;
4. a number of early lateral reflections that immediately follow the first reflection — these contribute to the feeling of “spaciousness” ;
5. a diffuse sound field created by an adequate number of reflections from all angles plus irregularities and ornamentation to eliminate “acoustical glare” ;
6. the ratio of energy in the first 80 ms to that in the next 2 s ;
7. warmth of the sound by properly shaping the reverberation-time curve at low frequencies.

On remarque surtout que la description objective de la qualité acoustique d'une salle se fait presque entièrement avec des *critères acoustiques* (sauf pour la diffusion, mais une définition objective pour ce critère est *a priori* possible — même si elle n'est pas évidente du tout), et sans faire recours à des paramètres architecturaux de la salle. L'expérience acquise grâce à la multiplication des formes architecturales dans la construction des salles dans les trente

dernières années (le premier exemple étant la Philharmonie de Berlin, Scharoun et Cremer, 1963) a permis de prouver qu'un résultat acoustique convaincant peut être atteint avec différents modèles architecturaux. On cite l'article de Beranek ([Ber92]) :

“Four basic concert hall designs offer the architect high probability of good acoustics, provided the necessary acoustical details are incorporated. The four types are the classical rectangular hall, the wide fan-shaped hall with overhead suspended panels, the segmented, asymmetrical, vineyard design, and the arena type with large sloping sidewall panels.”

En fait, l'exhaustivité de cette liste n'est pas assurée. Il s'agit plutôt de quatre types de salles ayant eu au moins une réalisation satisfaisante. Pour la salle “classique” rectangulaire (aussi surnommé “boîte à chaussures”), citons, entre autres, la Musikvereinsaal à Vienne, le Concertgebouw Amsterdam et le Boston Symphony Hall; pour la salle en éventail, avec panneaux réflecteurs suspendus, le Tanglewood Music Shed à Lennox, Ma. (Bolt Beranek and Newman Inc., 1959); pour la salle segmentée en vignobles, la Philharmonie à Berlin, ou l'Orange County Center for the Performing Arts (à Orange County, Los Angeles, Marshall and Hyde, 1986); pour la salle en arène (aussi nommée salle à réflexions latérales), le Christchurch Town Hall et le Michael Fowler Centre, Wellington (Marshall, 1979 et 1983).

Affiner les connaissances des liens entre les facteurs perceptifs et les critères objectifs d'un côté et entre les critères acoustiques et les paramètres géométriques d'un autre côté (par exemple par des programmes de simulation informatique) permettra éventuellement de trouver de nouvelles formes architecturales, tout en gardant, voire même en augmentant, la qualité acoustique obtenue.

2.6 Göttingen, Berlin et Dresde : les recherches après Beranek

L'ouvrage de Beranek, ainsi que la défaillance de la nouvelle salle de concert à New York, ont incité une vague de recherches en acoustique.

Un des buts principaux de toutes ces recherches était de dépasser les limites de la méthodologie employée par Beranek. Recueillir des jugements par interview présente plusieurs inconvénients :

la sémantique : des termes différents, avancés par les différents sujets, peuvent en fait décrire un même phénomène acoustique ;

la mémoire acoustique à longue terme : les jugements comparent des salles entendues à des mois, sinon des années, d'intervalle ;

les influences acoustiques autres que la qualité acoustique de la salle : qualités de l'orchestre et de la présentation musicale, influence de l'œuvre écoutée ;

l'influence d'autres paramètres non-acoustiques : aspects architecturaux, renom de la salle.

Afin de s'affranchir de toute influence non-acoustique et de permettre des comparaisons instantanées, un certain nombre de procédés ont été mis en œuvre et ont été utilisés pour des tests psycho-acoustiques. Ils reposent soit sur une méthode d'enregistrement gardant tous les aspects spatiaux du champ sonore (enregistrement par tête artificielle [DW69], [WKP71], [Wil75], [Mel72]),⁷ soit sur la recreation artificielle d'un champ sonore par des haut-parleurs

7. L'enregistrement par tête artificielle ne prend pas en compte les différences interindividuelles. Néanmoins, les aspects spatiaux sont correctement pris en compte, notamment en ce qui concerne l'importance subjective du champ réverbéré. Pour la reproduction binaurale sans capteur des mouvements de la tête, Wilkens ([Wil75], [LW80]) a vérifié que les jugements des auditeurs ne sont pas influencés par les inversions avant/arrière qui peuvent apparaître avec ce procédé.

laboratoire/ chercheur(s)	signal source	diffusion	question(s)	méthode d'analyse	résultats	commentaires
Göttingen	enregistrement anéchoïque	transaural	préférence	analyse factorielle	2 - 4 facteurs	niveau égalisé
Berlin	orchestre répétition salle vide	binaural	questionnaire	analyse factorielle	3 facteurs fact. global préf. indiv.	
Berlin	comparaison orchestre/ enr. anéch.	binaural	quest. réduit	différences	diff. signif.	résultats sont non comparables
Dresde	enr. anéchoïques	acoustique virtuelle	quest. divers	classement	liens crit. obj fact. subj.	C80 Raummass
AT&T	enr. anéch. convolution RI	casque	quest. divers	corrélations	TR précoce	EDT15 ou tr160
Barron (1971)	enr. anéch.	ac. virt.	impression d'espace	corrélations	réfl. latérales	lateral efficiency
Douglas & Hawkes	orchestre	concert	questionnaire	ACP	4-6 facteurs	
Barron (1988)	orchestre	concert	questionnaire	corrélations	5 questions analysées	G, EDT et lef
IRCAM (1989)	enr. anéchoïques	casque/ ac. virt.	dissimilarités/ préférence	INDSCAL, cor. travers tests	11 facteurs modèle perceptif	16 tests description complète
IRCAM (1995)	orchestre	concert	questionnaire	ACP corrélations	3 - 4 facteurs	vérification du modèle perceptif

TAB. 2.1 - *Tableau des tests psycho-acoustiques : méthodes employées pour le signal source, enregistrement (pour une diffusion binaurale et transaurale : enregistrement par tête artificielle), diffusion et analyses. Les résultats principaux et commentaires sont indiqués.*

reproduisant les effets principaux d'un champ acoustique (son direct, réflexions, réverbération tardive). Une autre possibilité réside dans la convolution des réponses impulsionnelles (de préférence binaurales), éventuellement modifiées [Sch75], avec les enregistrements anéchoïques. Tous ces procédés présentent l'avantage de permettre des comparaisons instantanées ; on s'affranchit ainsi — partiellement — des limites de la mémoire auditive. La possibilité d'utiliser des jugements non-verbaux permet d'éliminer les problèmes d'interprétation sémantique. Les deux derniers procédés permettent, en plus, de contrôler les paramètres objectifs d'un champ sonore de manière détaillée et indépendante.

Mais quel signal sonore utiliser pour ce genre de tests ? L'enregistrement d'une bande-test anéchoïque permet de disposer d'un signal totalement reproductible. Par contre, l'enregistrement par couple stéréophonique de microphones — ou par un seul microphone —, ne permet ni une reproduction correcte de la directivité des instruments ni de la balance spatiale entre les instruments, situés à des endroits différents sur scène ([WJ90], [JKM⁺93] ou [WP75], [Mey92]). Plusieurs équipes ont eu recours à un enregistrement effectué à la BBC avec l'English Chamber Orchestra ([Bur69], e.g. dans [Sie73], [Got73], [AA73]). Sinon des enregistrements spécifiques d'ensembles de taille réduite ont été réalisés en chambre sourde ([AA73], [Lav89]). Un autre type d'excitation possible est un orchestre réel, soit pendant un concert en utilisant la méthode des questionnaires ([HD71], [Yam72], [Bar88]), soit pendant une répétition spécifique ([Wil75], [WP75]).

Habituellement, la méthode des questionnaires est confrontée à deux difficultés complexes à résoudre : premièrement les mesures sont effectuées salle vide et les écoutes salle pleine ; deuxièmement

mement le programme, et souvent également l'orchestre, changent entre les différentes écoutes. La seule étude contournant ce problème est celle de Berlin ([Wil75], [WP75], [PLWW75]), où l'orchestre Philharmonique de Berlin jouait de courts extraits pendant une répétition spécifique (salle vide) dans plusieurs salles lors d'une tournée de l'orchestre. La seule différence d'occupation de la salle entre mesures et enregistrements (avec une tête artificielle) est celle de la scène — occupée par l'orchestre lors des enregistrements —, changement probablement non négligeable. Dans l'avenir, il serait fortement souhaitable d'établir des procédés de mesures salle pleine afin de garantir une bonne correspondance entre les mesures et les tests d'écoute.

Pour la diffusion des signaux, enregistrés par tête artificielle, les groupes de Berlin et de Göttingen ont eu recours à deux systèmes différents : le groupe de Berlin diffusait sur casque, le groupe de Göttingen par un couple de haut-parleurs placés en chambre sourde, en utilisant la technique de “cross-talk cancellation” (annulation des chemins croisés; [Sch75], [Sie73]).

2.7 Les travaux du groupe de Göttingen / AT&T Bell Labs (1965 - 1976)

Un premier résultat des études de ce groupe a démontré que l'impression de réverbérance subjective est mieux corrélée avec un temps de réverbération mesuré sur le début de la réponse impulsionnelle qu'avec le TR classique [ASS65]. Par ailleurs, grâce aux mesures de la Philharmonie Hall à New York, Schroeder [SASW66] a pu donner les premiers indices de l'importance d'une direction d'arrivée latérale des premières réflexions.

Au début des années 70, une campagne de mesures objectives [Got73] et de tests subjectifs [Sie73] a été entreprise dans une vingtaine de salles.

Deux minutes du finale de la symphonie “Jupiter” de Mozart, extraites de la bande anéchoïque stéréophonique de la BBC [Bur69], étaient diffusées à partir de deux haut-parleurs, situés sur scène à 5 m de distance et à 3 m du front de scène. Les signaux tests étaient enregistrés à deux ou trois endroits de la salle, non occupée, par une tête artificielle. Les mesures objectives étaient effectuées pour les mêmes positions de source sur la scène et les mêmes emplacements de réception dans la salle, mais avec une étincelle comme source sonore. Ensuite, pour procéder aux tests subjectifs, les signaux étaient diffusés par un couple de haut-parleurs en chambre sourde (en utilisant la technique transaurale) à puissance subjective égale. Seuls des jugements de préférence, non-verbaux, étaient demandés.

Plusieurs reproches peuvent être adressés à cette étude :

- la diffusion du message anéchoïque était effectuée par un couple de haut-parleurs. Or, aucune indication de la qualité de ces haut-parleurs n'est donnée, ni concernant leur courbe spectrale, ni, plus important encore, leur directivité. Dans l'hypothèse la plus probable, où il ne s'agit pas de haut-parleurs spéciaux omnidirectionnels, leur directivité devait être nettement plus forte que celle d'un orchestre. De plus, un couple de haut-parleurs ne peut pas restituer l'étendue spatiale d'une source orchestrale;
- pour les tests subjectifs, la puissance subjective a été égalisée, car l'effet de différence subjective des niveaux avait tendance à gommer toute autre différence. L'argument avancé est que, dans la réalité, les niveaux sonores des salles de concerts ne peuvent pas être comparés instantanément et que les auditeurs s'adapteront totalement à cette différence globale des niveaux sonores. On verra plus tard que notre étude ne confirme pas cette hypothèse. En outre, ce procédé élimine la puissance comme facteur potentiel, ce qui risque de faire apparaître un facteur secondaire, normalement d'importance négligeable car fortement lié au niveau sonore;
- seuls des jugements de préférence ont été demandés aux sujets, ce qui fait disparaître d'autres facteurs n'ayant pas d'influence sur la préférence subjective, mais servant à différencier des champs sonores;

- les mesures objectives ont été effectuées avec une source différente (étincelle vs. haut-parleurs);
- les critères objectifs utilisés pour étudier la correspondance entre les mesures objectives et les jugements subjectifs sont peu nombreux. Notamment, aucun critère de balance spectrale n'est inclus dans l'analyse.

Les jugements de préférence sont soumis à une analyse factorielle. Le nombre de facteurs relevés est compris entre 2 et 4. Le premier facteur est interprété comme facteur de consensus de préférence entre les sujets, les autres comme facteurs de goût personnel. Seul le premier facteur est analysé en termes de corrélations avec les critères objectifs.

La structure même des résultats semble très fortement influencée par le type d'analyse (jugements de préférence soumis à une analyse factorielle). On reproduira néanmoins les résultats principaux. Les critères objectifs à forte corrélation avec l'axe de consensus sont :

- le TR, exprimé comme déviation d'un point optimal d'un TR de 2,1 s (surtout lorsque le TR est inférieur à 2 secondes);
- la "Deutlichkeit" D (clarté D_{50} , d'après Thiele), soit comme critère absolu, soit comme déviation d'un point optimal de 0,34. La corrélation, $r_{D_{50},axe1}$, avec la préférence globale est fortement *négative*, une réduction de la clarté est donc préférée. On pense que cet effet est engendré par la diffusion du message musical sur des haut-parleurs directifs qui n'excitent pas la salle de manière suffisante, ce qui conduit les sujets à vouloir plus d'effet de salle tardif et par suite une clarté moins grande;
- l'IACC, négativement corrélé avec la préférence.

Le deuxième critère, D , mesure le rapport entre énergie précoce (le son direct plus l'énergie précoce réfléchi) et énergie tardive; le troisième, $IACC$, mesure plus particulièrement l'énergie précoce latérale, intrinsèquement liée à la largeur de la salle de concert, une largeur moindre (entraînant des réflexions latérales plus fortes) étant préférée.

En ce qui concerne les autres axes, le groupe de Göttingen a uniquement montré qu'un des groupes d'auditeurs préfère des temps de réverbération encore plus grands.

2.8 Les travaux du groupe de Berlin (1968 - 1976)

Pour l'étude des jugements subjectifs, le groupe de Berlin a préféré travailler à partir d'une source réelle: lors d'une tournée, l'Orchestre Philharmonique de Berlin jouait, dans chaque salle, trois extraits musicaux (Mozart, Brahms et Bartok), d'environ deux minutes chacun. Les extraits musicaux, joués en salle vide, étaient enregistrés à différents endroits dans la salle avec des têtes artificielles.

Pour le système de reproduction, ils ont choisi le casque (technique binaural), permettant des comparaisons instantanées en laboratoire. Pour recueillir les jugements des sujets, un questionnaire comprenant 19 paires de jugements opposés a été proposé aux sujets afin qu'ils le remplissent après chaque écoute.

La procédure de test peut se résumer comme suit :

- message musical identique;
- comparaisons instantanées;
- toute influence autre qu'acoustique exclue;
- utilisation d'un questionnaire, les sujets peuvent s'exprimer sur une multitude d'aspects différents, mais les problèmes sémantiques ne sont pas résolus;
- source réelle

- salle vide \implies enregistrements et mesures dans des conditions similaires, mais jugements de la qualité acoustique dans une situation différente de celle du concert.

Une étude systématique des influences potentielles de la méthodologie employée a été réalisée ([Wil75], [WK78]) :

Excitation de la salle : des enregistrements avec une tête artificielle ont été effectués avec soit un orchestre réel jouant sur scène, soit la diffusion d'un enregistrement anéchoïque ([Bur69]) par un couple de haut-parleurs (directifs) sur scène. Les places choisies dans la Philharmonie de Berlin ainsi que l'œuvre musicale (4ème mouvement de la Symphonie "Jupiter" de W.A. Mozart) étaient identiques. Les différences perceptives entre les deux types d'excitation étaient très significatives, les différences principales portant sur :

- la taille apparente de la source, réduite, vus les haut-parleurs utilisés, nettement plus directifs qu'un orchestre réel ;
- les influences d'une dynamique plus faible d'environ 10 dB pour l'enregistrement anéchoïque. Une diffusion "forte", c.-à-d. une égalisation de la puissance subjective des passages *forte*, réduit l'écart entre les réponses concernant la taille apparente de la source, mais crée des différences perceptives majeures sur d'autres questions, comme le couple dur/doux. Une diffusion "faible", c.-à-d. une égalisation de la puissance subjective des passages *piano*, augmente l'écart entre les réponses concernant la taille apparente de la source ;
- dans l'analyse multidimensionnelle, l'importance des aspects relatifs au timbre est surévaluée. En effet, dans l'analyse des différentes salles avec un orchestre réel comme source sonore, les questions liées à la balance spectrale forment le troisième axe. Lorsque l'analyse inclue une diffusion par haut-parleurs, ces questions forment le premier axe de l'analyse ;
- la structure des différences entre places est changée de manière significative.

Il s'ensuit que la simplification de la source conduit à des appréciations perceptives différentes, de sorte que les résultats obtenus avec des haut-parleurs comme sources sonores deviennent sujets à caution. Pour assurer le réalisme, l'utilisation d'une source orchestrale réelle semble nécessaire.

Reproductibilité de l'interprétation : La reproductibilité de l'interprétation musicale a été jugée excellente, sinon largement suffisante pour ce type de tests. Des différences d'emplacement de la tête artificielle d'environ 2 m ont été discernées avec nettement plus de sûreté que les différences entre interprétations successives.

Inversions avant-arrière : Avec le système de reproduction binaurale (et les enregistrements à partir d'une tête artificielle) des inversions de localisation de la source avant-arrière ou des différences de distance auditive (image sonore plus proche) apparaissent. Avec un système de suivi des rotations de la tête, une localisation "avant" et une localisation "arrière" (simulation des indices auditifs "corrects" et "incorrects" pour une localisation avant, cf. [Bla74, Bla83]) ont été comparées. Les différences sur la perception de la qualité acoustique ont été trouvées non significatives.

Le soin apporté à la méthodologie expérimentale nous conduit à accorder une grande confiance aux résultats de cette étude. Le questionnaire utilisé par Wilkens est issu d'une étude de paires opposées dans la littérature germanique et la liste des paires finalement adoptée semble au moins aussi complète que la description de Beranek. Le questionnaire final (après élimination de doublures) est reproduit dans la figure 2.2.

Les réponses ont été soumises à une analyse multidimensionnelle ([Wil75, Wil77]). Trois facteurs expliquent près de 90 % de la variance totale des réponses. Les plans 1/2 et 1/3 de l'analyse sont donnés dans les figures 2.3 et 2.4.

	1	2	3	4	5	6	
1 small	---	---	-	-	---	---	large
2 pleasant	---	---	-	-	---	---	unpleasant
3 unclear	---	---	-	-	---	---	clear
4 soft	---	---	-	-	---	---	hard
5 brilliant	---	---	-	-	---	---	dull
6 rounded	---	---	-	-	---	---	pointed
7 vigorous	---	---	-	-	---	---	muted
8 appealing	---	---	-	-	---	---	unappealing
9 blunt	---	---	-	-	---	---	sharp
10 diffuse	---	---	-	-	---	---	concentrated
11 overbearing	---	---	-	-	---	---	reticent
12 light	---	---	-	-	---	---	dark
13 muddy	---	---	-	-	---	---	clear
14 dry	---	---	-	-	---	---	reverberant
15 weak	---	---	-	-	---	---	strong
16 emphasised treble	---	---	-	-	---	---	treble not emphasised
17 emphasised bass	---	---	-	-	---	---	bass not emphasised
18 beautiful	---	---	-	-	---	---	ugly
19 soft	---	---	-	-	---	---	loud
Name:	Date:						Item no.:

FIG. 2.2 - Termes sémantiques opposées de Wilkens, traduit en anglais, d'après [Wil75].

Le premier facteur peut être appelé “puissance” ou “ampleur” du son, le deuxième “clarté” et le troisième “balance spectrale”. Une étude de corrélations ([LW80]) propose ces critères objectifs correspondants :

- pour le premier axe (“ampleur du son”), le critère de la force sonore G ;
- pour le deuxième axe (“clarté”), le temps central, ou le groupe des temps de réverbération ;
- pour le troisième axe (“balance spectrale”), la pente du temps de réverbération (ici EDT10) en fonction de la fréquence. Il s’agit principalement de la pente en hautes fréquences.

En étudiant la préférence subjective, il est apparu que, parmi leurs sujets, deux groupes avec des préférences très différentes se distinguaient. Autant la structure de la perception (les facteurs perceptifs) est commune à tous les sujets, autant les préférences interindividuelles les départagent. Entre ces deux groupes, de taille similaire, l’un préférerait surtout un son fort et ample (et accepterait pour cela une clarté plus faible), tandis que l’autre était plus sensible à la clarté.

Cette étude confirme l’existence de facteurs perceptifs structurant notre perception de la qualité acoustique (cf. également la définition et la discussion dans le chapitre 3.2). Ils sont communs à tous, et ce n’est qu’en évaluant la préférence subjective que des différences interindividuelles se manifestent : chaque sujet préfère des valeurs différentes des facteurs perceptifs et attache une importance variable aux différents facteurs.

2.9 Les travaux du groupe de Dresde (1966 - 1980)

Le groupe de Dresde, Schmidt ([Sch67]), Abdel Alim ([AA73]) et Lehmann ([Leh75]), sous la supervision de W. Reichardt, a utilisé des champs sonores synthétiques (acoustiques virtuelles) afin de pouvoir contrôler les caractéristiques des champs sonores le plus finement possible. Ils ont principalement étudié les facteurs de l’effet de salle et de la clarté. Dans leurs études, l’effet de salle (“Raumeindruck”) contient celui de “Räumlichkeit” (importance de l’effet de

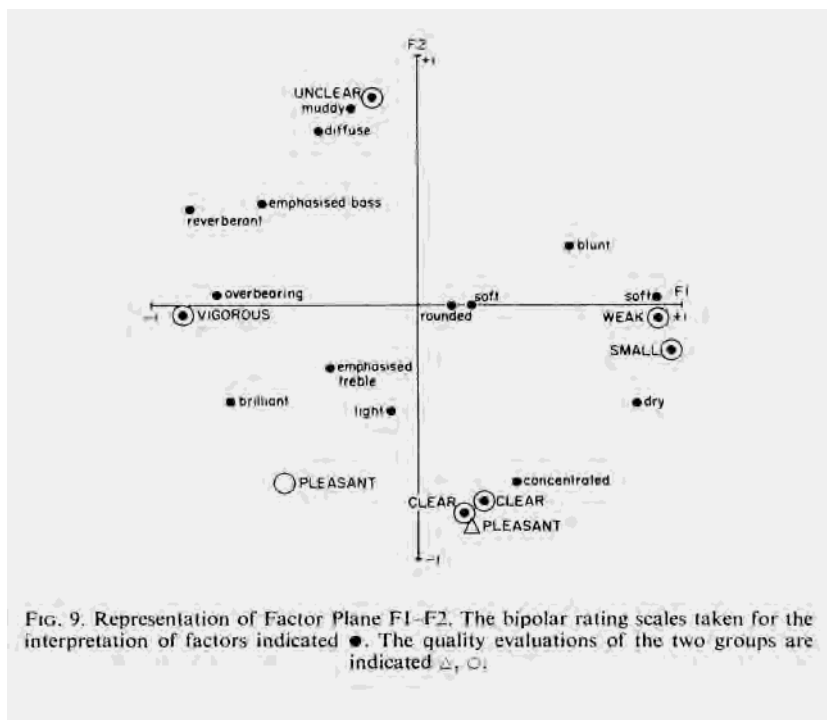


FIG. 2.3 - Le plan 1/2 de l'analyse de Wilkens.

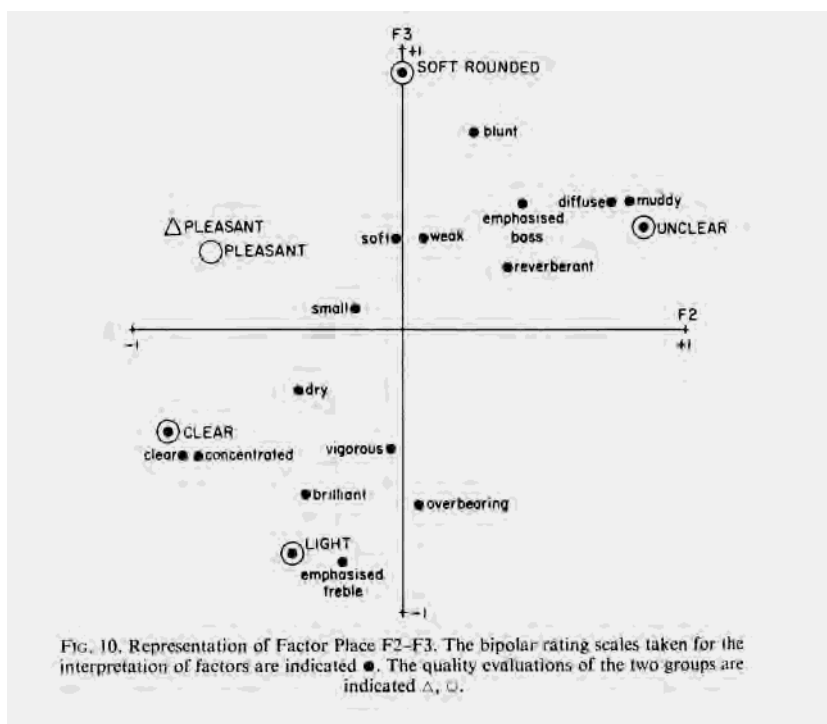


FIG. 2.4 - Le plan 2/3 de l'analyse de Wilkens.

salle, mais aussi impression d'espace) ainsi que celui de "Halligkeit" (effet de traînage du son, réverbérance).

Il a été démontré que la séparation entre une transparence temporelle ("Zeitdurchsichtigkeit") et une transparence verticale (transparence des registres, "Registerdurchsichtigkeit"), deux aspects de l'effet de clarté, est inutile, les deux effets étant très fortement corrélés.

Aucun des deux effets n'a pu être expliqué de manière convaincante avec les critères objectifs existants (Hallmaß de Beranek et Schultz ; "Deutlichkeit" de Thiele etc.). Par contre, ils ont amélioré les corrélations avec les jugements subjectifs en définissant les critères objectifs suivants :

pour l'effet de salle, le "Raumeindrucksmaß" (indice de l'effet de salle) :

$$R = 10 \log \frac{\int_{t=25ms}^{t=\infty} p_{omni}^2 - \int_{t=25ms}^{t=80ms} p_{cardio}^2}{\int_{t=0ms}^{t=25ms} p_{omni}^2 + \int_{t=25ms}^{t=80ms} p_{cardio}^2} dB; \quad (2.2)$$

pour la clarté, l'indice de clarté C80 :

$$C80 = 10 \log \frac{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p^2}{\int_{t=80ms}^{t=\infty} p^2} dB. \quad (2.3)$$

Les nouvelles définitions suppriment quelques contradictions entre l'évolution des critères objectifs existants et des jugements subjectifs relevés lors des tests d'écoutes avec les champs sonores spécifiques, mais la concordance est encore loin d'être parfaite. Par contre, la base de données établie avec ces multiples expériences en laboratoire, avec des conditions bien contrôlées, est extrêmement riche et permet même de mettre en évidence quelques influences supplémentaires.

2.10 Les thèses de Lehmann et de Wettschurek

Dans la suite on rapportera de manière plus détaillée les résultats de deux recherches, peu connus à l'extérieur des pays germanophones. Il s'agit, d'une part, de la thèse de Ulrich Lehmann à l'université de Dresde [Leh75], portant sur les influences des variations de paramètres d'un champ acoustique synthétique sur la perception de la présence de l'effet de salle et, d'autre part, de la thèse de Rüdiger Wettschurek à l'université de Berlin, sur les influences du niveau sonore sur la perception de la qualité acoustique.

2.10.1 Lehmann (1975), sous la supervision de Reichardt

L'étude de Lehmann porte principalement sur une question : celle du "Raumeindruck". Ce terme est difficilement traduisible car deux interprétations sont possibles. Le terme, comme l'utilise Lehmann, se traduit par "impression générale de l'effet de salle", et plus spécifiquement par "présence de l'effet de salle". Mais ce terme peut aussi être traduit par "impression d'espace". Il est donc fort probable qu'une certaine confusion entre les deux connotations apparaîtra dans les réponses des sujets.

Une phrase explicative a été donnée aux sujets : "Veuillez interpréter l'effet de salle comme le rapport entre l'énergie provenant de la salle, de l'extérieur de la scène (et de l'entourage proche de la scène), et l'énergie provenant de la scène et de l'entourage proche de la scène, en comparant ces deux énergies subjectives".

Les résultats des tests psycho-acoustiques montrent les effets suivants :

- les poids de l'énergie tardive et de l'énergie précoce non frontale sur la présence d'effet de salle sont égaux ;

- les réflexions latérales sont plus efficaces que les réflexions du plafond pour l'impression de présence de l'effet de salle.
- des réflexions multiples (c.-à-d. réflexions plus diffuses) augmentent davantage la présence de l'effet de salle que des fortes réflexions isolées, à énergie identique;
- une dilatation de la séquence des premières réflexions n'a pas (ou très peu) d'effet quand ces réflexions sont précoces (séquence dilatée de [15 ms, 25 ms] à [25 ms, 45 ms]);
- une dilatation de la séquence des réflexions a un effet perceptible quand ces réflexions sont tardives (séquence dilatée de [20 ms, 70 ms] à [40 ms, 140 ms]);
- une forte réflexion précoce, même non frontale, peut, en partie, remplacer ou se substituer à l'onde directe;
- une réverbération tardive (décroissance exponentielle) ne peut pas être remplacée par des réflexions isolées de même contenu énergétique. La perception de la présence de l'effet de salle est plus grande avec une décroissance exponentielle qu'avec un paquet de réflexions et encore plus faible avec une réflexion isolée;
- le temps de réverbération a une influence sur la perception de l'effet de salle, un TR plus important induit une présence plus forte de l'effet de salle. L'influence reste faible: pour un champ acoustique réel, avec son direct, réflexions et réverbération. L'augmentation du critère H_w ($H_w = 1/R$) peut être estimée à $\frac{\Delta H}{\Delta TR} = -\frac{1,5dB}{1s}$;
- l'effet d'un masquage postérieur est clairement visible, notamment quand il est absent: l'existence d'un "trou" dans la réponse impulsionnelle augmente l'importance subjective de l'événement suivant. Lehmann cite la thèse de Schubert [Sch67] en disant que des réflexions isolées peuvent partiellement masquer la réverbération tardive.

L'équation suivante donne la formule finale de Lehmann pour H_w ("wirksamer Hallabstand"), la "distance effective de réverbération":

$$H_w = 1/R = 10 \log \frac{E_o + E_{ef}}{E_{er} + E_n} dB + K'_e + K'_r + K'_T \quad (2.4)$$

avec :

o : son direct

ef : énergie précoce frontale

er : énergie précoce non frontale

n : énergie de la réverbération tardive

K : corrections; pour le temps de réverbération K_T , pour le rapport entre l'énergie précoce frontale et non-frontale (si ce rapport est trop différent d'unité) K_e , et pour une diffusion insuffisante de l'énergie précoce non frontale K_r .

2.10.2 Wettschurek (1976)

La thèse de Rüdiger Wettschurek [Wet76], dans l'équipe de Berlin, part d'une contradiction apparente relevée dans la littérature de l'époque. D'une part, on avait constaté les fortes influences du niveau sonore sur la perception des phénomènes de base, comme la perception d'un écho ([Bur61], [LB58]), ainsi que sur les phénomènes complexes comme l'intelligibilité de la parole ([Fle22], [LB61a], ou cf. [CM82]) ou l'impression d'espace dans une salle de concert ([Mar67], [Kee68]). D'autre part, la quasi-totalité des critères objectifs utilisés à l'époque (surtout des rapports énergétiques et pentes de décroissance, tous invariants sous la transformation du niveau global) ne prenaient pas en compte le niveau absolu du signal sonore. Le but de l'étude était alors de quantifier certains effets du niveau sonore sur la perception des phénomènes acoustiques. Parallèlement au déroulement de cette thèse, l'équipe de Berlin définissait le critère de force sonore, G ([Leh76], [LW80], suggéré dans [WP75]).

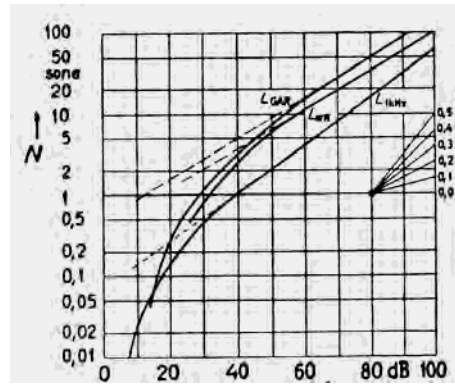


FIG. 2.5 - Sonie d'un son pur de 1 kHz, d'un bruit blanc et d'un bruit uniformément excitant, en fonction du niveau de pression acoustique, d'après [ZF81].

La forte dépendance des sensations acoustiques par rapport au niveau sonore a été mise en évidence de manière flagrante dans l'étude de l'équipe de Göttingen : le biais relatif au niveau sonore était si élevé qu'ils ont préféré éliminer le paramètre du niveau sonore objectif et effectuer le test à niveau subjectif égal (cf. section 2.7) — excluant ainsi la possibilité de faire une étude quantitative sur les effets de variation du niveau sonore.

2.10.2.1. Seuil d'audibilité d'une réflexion isolée tardive

En rappelant que, dans les salles de concerts, les échos nuisibles sont beaucoup plus perceptibles dans les passages *forte* ou *fortissimo* que dans les passages plus faibles, Wettschurek formule et teste le modèle suivant, basé sur la non-linéarité de la courbe de sonie ([ZF67], [FM33], [Fle38], cf. la figure 2.5) : une différence équivalente (en dB) de la pression acoustique produit un changement plus grand en sonies pour des niveaux faibles. Il a alors effectué des enregistrements d'un locuteur en chambre sourde qui prononçait la même phrase avec deux niveaux de locution, fort et faible. Les enregistrements ont été diffusés en chambre sourde par un système de haut-parleurs en ajoutant un effet de salle (réflexions précoces et réverbération) ainsi qu'une réflexion isolée tardive (70 ms après le son direct). Chaque enregistrement a été diffusé à deux niveaux sonores (38 dB et 72 dB SPL). Pour les quatre cas en résultant, le seuil d'audibilité de la réflexion tardive isolée était significativement différent.

Deux paramètres ont pu être isolés afin d'expliquer les différences de seuil d'audibilité :

- le niveau sonore (pression acoustique à l'emplacement de l'auditeur en chambre sourde). Le fort niveau sonore (72 dB SPL) conduit à un seuil d'audibilité diminué d'environ 7 dB ;
- le niveau de parole du locuteur, lié à un changement de timbre de la voix. Le niveau de la bande fréquentielle autour de 5 kHz (par rapport à la bande fréquentielle de 1 kHz) est plus fort en parlant plus faiblement. Ce changement de timbre mène à une différence du seuil d'audibilité de la réflexion d'environ 1,5 dB, prouvant que la sensibilité à l'écho est plus grande pour des fréquences élevées.

Pour l'expérience psycho-acoustique considérée, l'influence du niveau de reproduction prédomine par rapport au changement de timbre.

2.10.2.2. Seuil d'audibilité d'une réflexion isolée tardive en fonction de la direction d'arrivée

Après la vérification qualitative des influences du niveau de diffusion ("niveau sonore") et du timbre (dû à une différence de niveau de locution), Wettschurek a établi le seuil d'audibilité d'une réflexion tardive isolée, pour trois directions d'incidence de cette réflexion : frontale, arrière

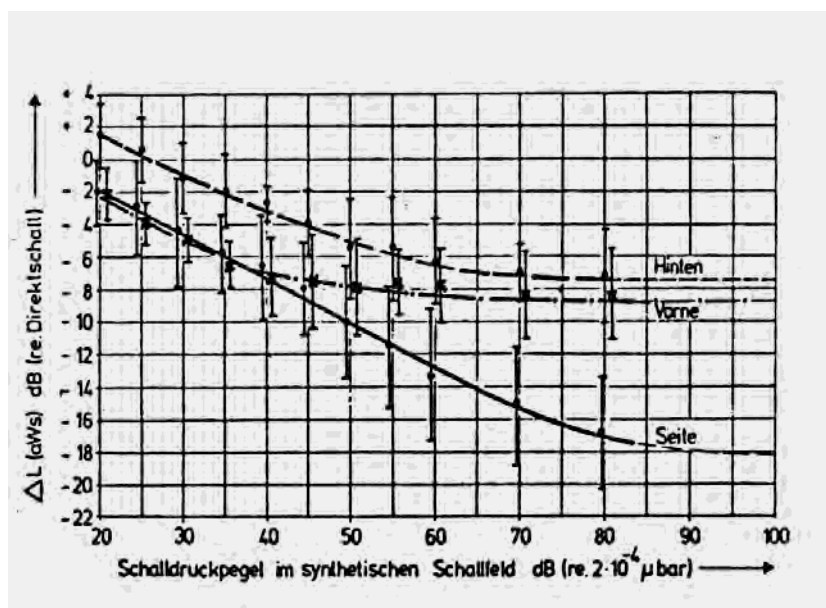


FIG. 2.6 - Seuil d'audibilité d'un écho (à 70 ms du son direct), en fonction du niveau sonore global, paramétré par la direction d'incidence : Vorne = incidence frontale, Hinten = incidence de l'arrière, Seite = incidence latérale.

et latérale. Le message diffusé a été, de nouveau, la parole, enregistrée à un seul niveau de locution (55 dB SPL), et le niveau sonore de la diffusion a été augmenté par pas de 5 dB.

La figure 2.6 reproduit les résultats obtenus. Ceux-ci sont remarquables, surtout par rapport à d'autres, plus récents, tels que ceux d'une étude effectuée autour du *spatialisateur* de l'Ircam ([JWKM93], [Mei93]) :

- Le seuil d'audibilité d'une réflexion isolée est plus élevé (c.-à-d. la réflexion s'entend *moins*) pour une réflexion provenant de l'arrière. Deux explications sont possibles pour cet effet : soit on considère que des réflexions provenant de l'arrière sont plus facilement intégrées au champ tardif, soit que ceci traduit l'effet d'ombre de la tête, induisant un niveau objectivement plus faible pour des signaux arrivant de l'arrière. La différence observée pour les niveaux élevés, d'environ 2 dB, correspond aux différences mesurées sur les fonctions de transfert de l'oreille externe (head-related transfer functions, HRTFs) des sujets. L'effet d'ombre de la tête est plus prononcé pour les fréquences aiguës, pour lesquelles la sensibilité à l'écho est également plus élevée;
- le seuil d'audibilité, pour des forts niveaux de reproduction, est le plus faible pour des réflexions latérales. Ceci indique une performance accrue du système auditif pour des cas où la résolution spatiale d'un système auditif binaural peut être utilisée. De plus, les résultats suggèrent que cette capacité est non-linéaire et que la résolution spatiale du système auditif est supérieure pour des niveaux élevés.⁸

2.10.2.3. Largeur apparente des sources sonores

En accord avec, entres autres, les études de Michael Barron ([Bar71], [Bar74], [Kee68]), Wetschurek établit que l'impression de largeur des sources dépend du niveau sonore ainsi que des paramètres géométriques de la salle, notamment de l'entourage proche de la source et de l'auditeur. Mais, au moins pour les cas étudiés (avec des variations du niveau de reproduction

⁸. Cet effet peut aussi expliquer la sensation qu'une salle "se réveille" progressivement pendant un crescendo musical de *pianissimo* au *fortissimo*.

de 30 dB), il a constaté que la variation de niveau est absolument *prédominante* par rapport à une variation de l'emplacement à l'intérieur de la salle. Les tests ont été effectués dans la Philharmonie de Berlin, et vérifiés par des tests en laboratoire, utilisant des enregistrements par tête artificielle effectués dans la même salle.

Pour le cas de la parole, une influence du niveau de locution a de nouveau été constatée. Le spectre de la parole, prononcée à un niveau de locution faible, est plus riche autour de 5 kHz (bande de fréquence critique pour la perception de l'écho), mais surtout en basses fréquences (toujours en niveau relatif par rapport à la bande de fréquence autour de 1 kHz).⁹

Quand les différents enregistrements sont diffusés au même niveau de reproduction *objectif* (par rapport à la bande de fréquence de 1 kHz), l'enregistrement à niveau de locution plus faible est perçu comme étant subjectivement plus fort, reflétant l'effet du rétrécissement des courbes d'isotonie ([ZF67]) en basses fréquences. Ce biais enlevé, quand les différents enregistrements sont diffusés au même niveau de reproduction *subjectif*, la largeur apparente de la source est plus *grande* pour un enregistrement à niveau de locution plus faible, ce qui souligne l'importance du niveau en basses fréquences pour la sensation de largeur apparente ainsi que l'impression d'espace. Les données confirment l'importance des fréquences graves pour la perception de la largeur apparente des sources sonores et de l'impression d'espace (cf. les études de Barron, [Bar71] et de Morimoto, [MISM94a] et [MISM94b]).¹⁰

Ces résultats, obtenus en utilisant la parole comme signal test, ont été vérifiés avec des enregistrements d'orgue (également enregistrés et diffusés à différents niveaux). Les résultats sont qualitativement identiques mais, dans le cas de l'orgue, la même variation du niveau de reproduction menait à une variation deux fois plus grande de la largeur apparente de la source, par rapport au cas de la parole. Ce résultat confirme l'importance du niveau en basses fréquences, puisque le spectre de l'orgue en *forte* a été plus riche en basses fréquences que celui du locuteur. De plus, il a pu être prouvé que la largeur apparente de la source, dans une salle réelle, ne dépend *que* du niveau sonore et non pas de la largeur réelle de la source. L'enregistrement de l'orgue a été diffusé en utilisant trois situations différentes, mais aucune différence significative de la largeur apparente n'a été trouvée :

- 1° enregistrement monophonique, diffusion par un seul HP ;
- 2° enregistrement monophonique, diffusion par quatre HPs en ligne ;
- 3° enregistrement à quatre canaux, diffusion par quatre HPs en ligne.

2.10.2.4. Clarté et transparence (“Durchsichtigkeit”)

Finalement, Wettschurek s'est interrogé sur l'influence du niveau sonore sur la transparence spatiale du message sonore (“Durchsichtigkeit”). Afin d'utiliser la définition la plus neutre ou “objective” de la transparence, il a étudié la sensibilité des auditeurs aux variations spatiales d'emplacement des sources. Un quatuor à vents a été enregistré, en chambre sourde, sur quatre canaux, un canal distinct pour chaque instrument. Cet enregistrement a ensuite été diffusé sur quatre haut-parleurs, un par instrument, avec un écartement variable entre les haut-parleurs. Wettschurek a étudié la sensibilité des auditeurs à un changement d'attribution instrument/haut-parleur. En affectant les instruments aux haut-parleurs de façon aléatoire, il a demandé aux sujets, pour chaque paire de configurations, si un changement avait ou non eu lieu. Malheureusement, pour des raisons d'objectivité de la question posée aux sujets, il a limité son étude à cet aspect de la séparation spatiale, sous-aspect de la question plus générale de transparence et de clarté, excluant ainsi les influences du niveau sonore sur ces aspects de la

9. On dit souvent que quelqu'un *élève* la voix, ce qui reflète une augmentation de la note fondamentale avec le niveau de locution.

10. La discussion sur l'importance des basses fréquences pour l'impression d'espace a été et est toujours vive. Une des raisons est que deux critères concurrentes ont été définis pour traduire l'impression d'espace et que l'un est indépendant de la fréquence (LE), tandis que l'autre (IACC) attribue plus de poids aux fréquences aiguës (cf. également les chapitres 2.11 et 2.12). Récemment, L.L. Beranek, [HBO92], a proposé de surmonter ce défaut par l'introduction d'un critère supplémentaire, la force sonore globale en dessous de 335 Hz, *G335*.

question. Pour l'aspect étudié, aucune influence significative du niveau de reproduction n'a été constatée.

2.11 Barron et Marshall : importance des réflexions latérales

Les travaux de Marshall et de Barron ont établi l'importance de la provenance des réflexions précoces. A. Harold Marshall avait suggéré, de manière qualitative ([Mar67]), l'importance des réflexions précoces de provenance latérale et avait avancé que les réflexions parvenant du plafond ne devaient en aucun cas arriver avant une réflexion latérale forte.

Les effets perceptifs des réflexions latérales ont été étudiés, dans le cadre d'une thèse, par Michael Barron ([Bar71], [Bar74]) et une mesure objective, l'efficacité latérale ("lateral efficiency", lef), a été proposée ([BM81]).

Dans [Bar71], les effets des réflexions sont classés comme suit :

- augmentation de la puissance et de la présence des sources (pour toute provenance) ;
- pour les réflexions parvenant du plafond, il existe un danger accru d'une coloration ou d'une délocalisation de la source ;
- pour les réflexions latérales, le danger de colorations et de délocalisations est fortement diminué ;
- les réflexions latérales augmentent l'impression d'espace.

Barron et Marshall préconisent comme critère le mieux corrélé avec cette augmentation de l'impression d'espace la fraction d'énergie latérale, ou efficacité latérale (lef) :

$$\text{lef} = L_f = \frac{\int_{t=5ms}^{t=80ms} p^2 \cos \phi}{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p^2} \quad (2.5)$$

En utilisant un microphone omnidirectionnel et un microphone figure 8, on peut mesurer l'efficacité latérale par :

$$\text{lef} = \frac{\int_{t=5ms}^{t=80ms} p_{fig.8}^2}{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p_{omni}^2}, \quad (2.6)$$

ou bien, en s'approchant plus de la formule théorique :

$$\text{lef} = \frac{\int_{t=5ms}^{t=80ms} p_{omni} * p_{fig.8}}{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p_{omni}^2} \quad (2.7)$$

L'efficacité latérale peut également être exprimé en dB, en utilisant la formule :

$$LE = 10 * \log_{10}(\text{lef}) = 10 * \log_{10}\left(\frac{\int_{t=5ms}^{t=80ms} p_{fig.8}^2}{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p_{omni}^2}\right) \quad (2.8)$$

2.12 Impression d'espace

Une discussion s'est établie dans les dernières années, autant sur les effets perceptifs que sur les critères objectifs les mieux adaptés pour mesurer ces effets perceptifs.

Il est généralement admis qu'il y a plus d'un seul effet dû à la provenance spatiale des réflexions et de la réverbération. Par contre, selon les chercheurs, le nombre d'effets varie de deux à quatre et les noms et définitions diffèrent énormément. Il semble exister un consensus pour différencier les effets de la largeur apparente de la source ("auditory source width", ASW) et d'enveloppement. D'autres termes utilisés, soit en parallèle, soit en complément, comprennent spatial impression, source halo, spaciousness, spaciousness of the direct sound, etc.

Par contre, les différents chercheurs s'accordent peu sur la définition des critères mesurant ces effets.

Le critère de l'efficacité latérale proposé par Barron et Marshall a l'avantage de mesurer de manière globale et relativement simple l'effet de provenance des réflexions. Il est également bien adapté à la conception des salles car facilement prédictible à partir de modèles. D'autres chercheurs préconisent le critère d'IACC ([And85], [Sch75], [Ber92], [HBO92], pour un modèle de l'oreille humaine intégrant un processus d'intercorrélation cf. [BC78], [Lin85a], [Lin85b]). L'IACC (InterAural Cross Correlation) se définit comme :

$$IACC(\tau) = \frac{\int (p_{gauche}(t) * p_{droite}(t + \tau)) dt}{\sqrt{\int p_{gauche}^2 * \int p_{droite}^2}}, \quad (2.9)$$

$$IACC = \max(|IACC(\tau)|), -1ms \leq \tau \leq 1ms; \quad (2.10)$$

ou, en considérant $IACC(t_1, t_2)$ sur une plage temporelle :

$$IACC_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (p_{gauche}(t) * p_{droite}(t + \tau)) dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_{gauche}^2 \int_{t_1}^{t_2} p_{droite}^2}}, \quad (2.11)$$

$$IACC_{t_1, t_2} = \max(|IACC_{t_1, t_2}(\tau)|), -1ms \leq \tau \leq 1ms. \quad (2.12)$$

Une $IACC_E$ et une $IACC_L$, respectivement l'IACC dans les 80 premières ms et l'IACC après 80 ms, sont utilisées par exemple dans [HBO92]. De plus, différentes plages fréquentielles peuvent être distinguées ([HBO92], [MISM94a, MISM94b]).

Récemment Soulodre a pu démontrer l'influence des *deux* critères de LE et d'IACC : aucun de deux critères ne suffit à lui seul à expliquer les jugements recueillis dans un test psycho-acoustique ([SBS93]).

Une comparaison exhaustive de mesures des deux critères à plusieurs places dans différentes salles, y inclus de la variabilité inter-salle et intra-salle des deux critères, en fonction de la fréquence, a été publiée par John Bradley, [Bra94].

2.13 Griesinger

Une explication légèrement différente est donnée par David Griesinger ([Gri92a], [Gri92b], [Gri93]). Son but était de définir des critères objectifs proches du traitement effectué par le système auditif humain.

2.13.1 Modèle de localisation de l'oreille humaine

L'idée de base de Griesinger est de prendre un modèle de localisation de l'oreille humaine ([Bla83], [Mac91]). L'oreille humaine détermine l'emplacement azimutal des sources, principalement par les différences d'amplitude et de temps d'arrivée (différence de phase pour les basses fréquences, différences d'enveloppe pour les hautes fréquences) des signaux arrivant aux tympans. Pour la détermination de l'élévation ainsi que la différenciation avant/arrière, les informations spectrales apportées par l'effet de l'ombre de la tête et les structures fines de l'oreille deviennent primordiales afin de lever l'ambiguïté des indices binauraux (cône de confusion, [Wal39], [Bla83]).

Les signaux sonores, ayant subi les transformations apportées par les fonctions de transfert de l'oreille externe (HRTF), arrivent aux deux tympans et aux membranes basilaires. La membrane basilaire sépare d'abord le signal en plusieurs bandes critiques. Le nombre des bandes critiques est de 24, leur largeur de bande est variable (environ 1/3 d'octave pour les fréquences moyennes et aiguës, plus large pour les basses fréquences), et leurs fréquences centrales s'adaptent au spectre du signal arrivant. Les variations de pression acoustique sont ensuite transformées en impulsions neuroniques, par de multiples systèmes de neurones adaptés à des tâches spécifiques ([Moo89]). Ce qui nous intéresse, concernant le processus de localisation, ce sont surtout les détecteurs de niveau sonore et les détecteurs d'attaque ("edge detectors"). Les détecteurs de niveau effectuent une intégration à court-terme de la pression acoustique dans la bande critique.¹¹ Les détecteurs d'attaque, pour les bandes critiques situées dans les basses fréquences, suivent la phase du signal arrivant et se déclenchent à une valeur donnée de la phase du signal, permettant ainsi un "timing" extrêmement précis. Les détecteurs d'attaque, pour les bandes critiques situées dans les moyennes et hautes fréquences, sont insensibles à la phase du signal et détectent les variations brusques de l'enveloppe du signal.

Le processus de localisation implique aussi des traitements situés dans les niveaux supérieurs. A chaque nouvel "événement" détecté par un déclenchement simultané des détecteurs d'attaques dans les différentes bandes critiques, les informations arrivant des deux oreilles sont évaluées : pour chaque bande critique, la comparaison des niveaux dans les deux oreilles et la comparaison du temps de déclenchement des détecteurs d'attaques donnent un indice d'intensité et un indice temporel afin de déterminer l'azimut de la source sonore. A partir de cette masse d'informations, l'oreille (aux niveaux supérieurs du cerveau), va effectuer une décision de "meilleur choix" afin de déterminer la localisation la plus probable de la source sonore (décision qui sera aussi influencée par les expectatives, comme la connaissance préalable de l'existence d'une source sonore à un certain endroit).

Plusieurs chercheurs ont commenté le rapprochement du processus de localisation de l'oreille et du critère objectif de la corrélation interaurale IACC ([BC78], [Lin85a], [Lin85b]). Mais ce rapprochement n'est que partiel : dans le processus de localisation, un choix est effectué aux niveaux supérieurs du cerveau, nécessitant une synthèse des multiples informations provenant des différentes bandes critiques. Pour la mesure objective, des signaux large-bande sont évalués et aucun filtrage (ou un filtrage en bandes d'octaves) n'est appliqué.

2.13.2 Fluctuations de la localisation et impression d'espace

Des réflexions peuvent perturber ce processus de localisation de l'oreille humaine. Par exemple, à cause d'une réflexion isolée, de même amplitude que le son direct, la pression acoustique d'une sinusoïde peut devenir nulle à une oreille (interférence totalement destructrice à l'emplacement exacte d'une oreille), tandis que la pression sur l'autre oreille ne l'est pas. La perturbation de la localisation est clairement audible.

Pour un signal variant dans le temps (chaque signal musical, mais aussi du bruit), l'effet des réflexions et du champs tardif va induire une *fluctuation* de la localisation apparente de la source

11. L'intensité à la sortie des neurones est à peu près proportionnelle au logarithme de la pression acoustique, ce qui explique la performance de l'oreille pouvant réagir à des stimuli extérieurs dans une plage de variation de treize ordres de grandeur.

autour d'une valeur "moyenne". De plus, les musiciens introduisent et utilisent cette modulation du signal par l'ajout d'un *vibrato* dans leur jeu. Griesinger avance que les musiciens préfèrent utiliser un vibrato de hauteur (c.-à-d. frequency modulation, *FM*) à un vibrato d'amplitude (*AM*), le premier étant plus efficace pour la perturbation du processus de localisation.

Comme l'oreille effectue un jugement complexe (évaluations des indices d'amplitude et de temps d'arrivée, dans plusieurs bandes critiques), même une fluctuation assez forte n'empêche pas une localisation de la source au "bon" endroit. Mais cette fluctuation et la "moindre certitude" de la localisation en résultant conduit à un élargissement subjectif de la source (augmentation de l'ASW [Apparent Source Width]).

Griesinger poursuit en définissant une quantité nommée pseudo-angle (la localisation apparente instantanée), variant dans le temps. La variabilité temporelle de cette quantité détermine la largeur apparente de la source et l'impression d'espace. Comme l'oreille distingue les fluctuations de phase et d'amplitude, deux quantités supplémentaires sont définies : le pseudo-angle d'amplitude et le pseudo-angle de phase. Griesinger avance que la différence de l'impression d'espace induite par la variation de l'une et de l'autre de ces quantités est clairement audible. De plus, une dépendance fréquentielle est ainsi introduite, car la variation du pseudo-angle d'amplitude est prédominante en hautes fréquences tandis que la variation du pseudo-angle de phase est prédominante dans les basses fréquences.

Quels nouveaux éléments peut-on tirer de cette interprétation? En fait, les variations du critère de pseudo-angle sont souvent proches de celles du critère d'IACC. Mais, prenant en compte le processus de localisation en basses fréquences (avec les détecteurs d'attaque sensibles à la phase), la performance de discrimination en basses fréquences est nettement supérieure à celle pour l'IACC. Par sa définition, l'IACC converge vers 1 en basses fréquences, indiquant que les basses fréquences auraient peu d'importance pour l'effet d'augmentation de la largeur apparente de la source et pour l'impression d'espace, ce qui est fortement contredit par maintes expériences (cf. le chapitre 2.10.2, [Wet76], [BM81], [BML86]). L'explication par des fluctuations de la localisation peut démontrer que les basses fréquences ont autant d'importance que les hautes fréquences (sinon plus, car le processus de localisation est plus sensible aux petites variations en basses fréquences).

2.13.3 Discussion

Le choix des sujets, exprimant leur préférence pour un faible valeur d'IACC et une forte efficacité latérale ([And85], [BM81]), indique que, dans une salle de concert, les auditeurs préfèrent une localisation *moins nette* en situation de concert. Ce résultat pourrait être interprété comme une contradiction apparente avec le principe selon lequel l'être humain cherche toujours à récupérer un *maximum* d'informations.

Mais cette contradiction apparente se résoud lorsqu'on observe plus en détail le type d'information recherchée par un auditeur en situation de concert. Dans le cas de la parole, l'intelligibilité (et donc une localisation précise) est primordiale. Dans le cas de la musique, un auditeur recherchera plus que la simple intelligibilité du discours musical — même si une intelligibilité suffisante est une condition nécessaire. Plus important encore est la recherche d'une sensation d'être immergé, donc impliqué, dans la musique. Pour cela, il est nécessaire que le son ne parvienne pas uniquement d'une direction précise — ce qui augmente la séparation entre la source, d'un côté, et l'auditeur, de l'autre côté — mais de toutes les directions possibles, afin que l'auditeur puisse se sentir *au milieu* de la musique. La localisation des sources est déjà suffisamment assurée par l'effet du premier front d'onde (effet de précedence) et par la vision de l'orchestre. Une localisation moins nette est donc recherchée afin d'obtenir le plus d'informations possible sur *l'espace* entourant l'auditeur. Ce même argument peut aussi expliquer pourquoi les auditeurs, dans des salles de concert, préfèrent des conditions acoustiques assez *réverbérantes* — le compromis entre l'intelligibilité du discours musical et la révélation de l'espace penche, de nouveau, pour une augmentation de la sensation d'espace.

Lors de la construction d'une salle de concert, l'objectif est alors de réaliser une acoustique qui révèle, le plus possible, à l'auditeur l'espace qui l'entoure, sans néanmoins perdre une bonne

intelligibilité (sinon un minimum). Ceci explique la séparation des auditeurs en deux classes dans les études de Berlin (chapitre 2.8) et de Barron (chapitre 2.14.2) : ce “minimum” d’intelligibilité varie selon les sujets. Ou, formulé différemment, un groupe de sujets focalise davantage sur le sentiment d’espace (être entouré par, ou “baigner” dans la musique), l’autre préférant plus d’intelligibilité et de séparation par rapport aux sources sonores.

Le critère de pseudo-angle de Griesinger a l’avantage de se rapprocher de la perception en situation vraie de concert, mais, en contrepartie, il présente l’inconvénient de dépendre du message musical. Ceci reflète bien la réalité d’un concert, mais rend difficile l’établissement d’un *diagnostic* d’une salle, où des critères, indépendants du message, sont requis.

2.13.4 Proposition d’amélioration du critère IACC

Au lieu de définir un critère totalement dépendant du message musical, on pourrait songer à améliorer le critère IACC. Il a déjà été expliqué que le critère d’IACC converge vers 1 dans les basses fréquences, les différences interaurales d’amplitude devenant négligeables pour les basses fréquences lorsque les longueurs d’onde sont très grandes. Mais la raison en est que la définition du critère IACC (équation 2.10) ne prend pas réellement en compte les différences de temps d’arrivée, si importantes pour la localisation dans les basses fréquences : le signal évalué est large-bande et aucun filtrage n’est effectué. Et, plus important encore : dans la définition de l’IACC, le maximum de la corrélation est calculé sur des valeurs de τ comprises entre -1 ms et 1 ms. Effectuer l’intercorrélacion des deux signaux permet de trouver l’azimut (ou l’angle par rapport à l’axe interaural, menant à la détermination d’un cône de confusion). Mais fixer la valeur de τ à la valeur trouvée retire toute ambiguïté sur les différences interaurales de temps d’arrivée — ce qui revient à dire que toutes les bandes critiques auraient donné la même valeur de différence temporelle interaurale.

En se rapprochant de l’analyse effectuée par l’oreille humaine, le signal devrait *d’abord* être séparé en bandes critiques. On proposerait que, dans chaque bande critique, une mesure d’IACC (ou une évaluation par un modèle de localisation binaurale, décrit par exemple par Macpherson, [Mac91]) soit effectuée, donnant une valeur d’azimut et “d’insécurité” (IACC). Seule l’analyse de toutes ces données peut fournir, par un processus de choix, la localisation estimée finale (correspondant à l’endroit de l’événement auditif, “Hörereignisort” d’après Blauert) ainsi qu’un écart-type de cette localisation (“incertitude” de la localisation de l’événement auditif), ce dernier pouvant être rapproché de la largeur apparente de la source et de l’impression d’espace.

Enfin, Griesinger remarque qu’il n’y a pas d’angle optimal pour une réflexion précoce (c.-à-d. 90° pour l’efficacité latérale, 55°, comme le suggère Ando ([And85]) pour l’IACC) afin de maximiser l’effet sur l’impression d’espace, car la perturbation maximale de la localisation par une forte réflexion précoce dépend de la fréquence. Ce qui maximise la perturbation de la localisation, et donc maximise l’impression d’espace, ce sont des réflexions latérales mais diffuses.

2.14 Etudes utilisant des questionnaires

2.14.1 Hawkes & Douglas (1971)

La première étude utilisant des questionnaires dans des situations de concert réel (“live”) a été décrite dans l’article de Hawkes & Douglas ([HD71]). Elle portait principalement sur le Royal Festival Hall à Londres, avec différents réglages du système de réverbération assistée ([PM65], [PM70]). Ils ont également effectué une comparaison de quatre salles de concerts de la région de Londres, sur la base de quatre places par salle.

Pendant le déroulement du concert, les sujets répondaient à un questionnaire proposant 16 questions, avec des paires sémantiques opposées, issues de la liste établie par Beranek. Les réponses ont été soumises à une analyse factorielle, révélant, pour les différents cas étudiés,

quatre à six aspects indépendants. L'ensemble maximal de facteurs et les noms attribués (en anglais) sont les suivants :

- Reverberance
- Balance and Blend
- Intimacy
- Definition
- Brilliance
- Proximity

Les différences perçues par les auditeurs ont pu être corrélées avec des différences objectives, notamment entre les différentes salles.

2.14.2 Barron (1988)

Après une campagne exhaustive de mesures, Michael Barron ([Bar88], aussi [Bar94]) a procédé à l'évaluation subjective de onze salles de concerts britanniques, caractérisant entre deux et cinq places par salle. Des professionnels de l'audio ont répondu à un questionnaire structuré réduit, proposant neuf échelles indépendantes. Ce questionnaire était issu d'une première étude effectuée à la Gulbenkian Hall de Lisbonne ([Bar78]). Il est reproduit dans la figure 2.7. Barron a avancé que, à cause de la réduction du nombre de questions, une analyse factorielle des données recueillies est inappropriée. En fait, par une étude des corrélations entre les différentes questions, il a démontré que seule la question de la préférence subjective doit être considérée comme variable dépendante, les taux de corrélations restant inférieurs à 50% pour toutes les autres questions.

CLARITY	Muddy	-----	Clear
REVERBERANCE	Dead	-----	Live
ENVELOPMENT	Expansive	-----	Constricted
INTIMACY	Remote	-----	Intimate
LOUDNESS	Loud	-----	Quiet
BALANCE:			
		Weak	Loud
	Treble re. mid-frequencies	-----	
	Bass re. mid-frequencies	-----	
	Singers/Soloists re. orchestra	-----	
BACKGROUND NOISE:	-----		
	Inaudible	Acceptable	Tolerable
	Intolerable		
OVERALL IMPRESSION:	-----		
	Very poor	Poor	Mediocre
	Reasonable	Good	Very good
	Excellent		
N.B.: scale extremes refer to experience limits			

FIG. 2.7 - Les questionnaire structuré de BARRON.

Sur le plan subjectif, deux résultats méritent d'être rapportés :

- comme dans l'étude du groupe de Berlin, deux classes de sujets se différenciaient en ce qui concerne leur préférence subjective. Un groupe de sujets préférait les situations avec une grande réverbérance subjective, l'autre recherchait surtout une bonne intimité;

- contrairement à l'étude de Berlin, cette distinction entre sujets se retrouve aussi dans l'interprétation des facteurs perceptifs. Barron constate surtout une ambiguïté dans l'interprétation sémantique de la question sur l'enveloppement spatiale. Pour le groupe de sujets préférant des conditions réverbérantes, les questions de la "réverbérance" et de l'"enveloppement" sont fortement corrélées, tandis que pour les sujets préférant une bonne intimité, la question de l'"enveloppement" est fortement corrélée avec la question d'"intimité". Par rapport aux données objectives, le premier groupe porte plus d'attention à l'aspect spatial de la réverbération tardive en évaluant la question de l'enveloppement, tandis que, pour le deuxième groupe, une bonne corrélation apparaît entre l'enveloppement et le niveau sonore objectif.

Les meilleures corrélations entre les réponses aux questionnaires et les critères objectifs calculés à partir des mesures effectuées dans les salles (les critères étant corrigés afin de représenter des données objectives "salle pleine"), sont indiquées dans le tableau suivant. Le tableau n'inclut que les cinq questions principales. Pour les autres (notamment celles qui portent sur l'équilibre fréquentiel perçu), aucune corrélation significative n'a pu être trouvée. Néanmoins, les résultats indiquaient que la correspondance entre les réponses aux questionnaires (pour ces questions) et les mesures objectives est améliorée en prenant les mesures de l'équilibre fréquentiel du *niveau* et non pas du *temps de réverbération* (comme le propose, par exemple, Beranek, avec la mesure de "bass ratio", [Ber62]).

clarity	?
reverberance	early decay time
envelopment	E.l.e.f. and total sound level
intimacy	total sound level
loudness	total sound level

TAB. 2.2 - Meilleures correspondances entre les réponses aux questionnaires et les mesures objectives effectuées dans les salles (corrigées pour l'occupation effective de la salle), d'après [Bar94].

Ces résultats nécessitent quelques commentaires supplémentaires. Une corrélation (négative) a, en fait, été trouvée entre la question de clarté et les critères de temps de réverbération (TR) et de early decay time (EDT), mais ce résultat a été fortement influencé par quelques "outliers", c.-à-d. des valeurs extrêmes présente dans quelques salles. Notamment pour le Royal Albert Hall, salle d'environ 6000 places, un TR excessif ainsi qu'une très mauvaise clarté subjective ont été trouvés. Lorsqu'on élimine cette salle, les taux de corrélations avec tous les critères calculés sont faibles. On peut donc en conclure qu'aucun des critères considérés n'explique à lui seul les jugements subjectives sur la question de clarté.

En ce qui concerne les autres questions, il est surprenant de constater que, même si les réponses sont relativement indépendantes (cf. ci-dessus, les taux de corrélation entre ces questions sont tous inférieurs à 0.5), trois questions sont fortement corrélées au critère de niveau global acoustique G . La différenciation entre les questions se fait par des "influences secondaires": pour l'enveloppement, il s'agit de la fraction d'énergie précoce latérale; pour l'intimité, de la proximité par rapport aux sources sonores. Pour la question de la puissance, un niveau objectif équivalent est perçu comme étant plus fort subjectivement aux places éloignées, indiquant que les auditeurs effectuent une "correction" par rapport au niveau acoustique estimé à leur place.

Néanmoins, on peut s'interroger sur l'indépendance des questions. Compte tenu du fait que trois critères objectifs (ou quatre, en incluant la distance objective) suffisent pour une première explication des réponses aux questionnaires, il paraît clair que l'espace ainsi construit est *dégénéré*. Mais cette dégénérescence de l'espace multidimensionnel peut être induit par la corrélation des critères acoustiques dans les salles (ou places) considérées pour l'étude. On reviendra sur ce point dans la discussion finale de l'étude bibliographique.

On retiendra un autre point primordial de l'analyse de Barron: plusieurs questions ou facteurs perceptifs peuvent être influencés par un même critère objectif. Ceci a de fortes influences

sur le modèle de correspondances entre la description de la qualité acoustique en termes de critères objectifs et de facteurs perceptifs. Plusieurs modèles sont alors possibles :

liaisons un-à-un, matrice diagonale de correspondances : pour chaque facteur perceptif, on cherchera un (et *un seul*) critère objectif correspondant. On exclut alors l'interdépendance des facteurs perceptifs ainsi que la possibilité qu'un facteur perceptif soit influencé par plusieurs critères objectifs ou qu'un critère objectif puisse influencer plusieurs facteurs perceptifs. D'après les résultats de Barron et d'autres recherche (cf. e.g. les travaux de l'équipe de Göttingen sur l'influence de la puissance sonore) ce modèle doit passer par une redéfinition de la base des critères objectifs — équivalente à une diagonalisation de la matrice de correspondances perceptif/objectif. Les critères en résultant (ou leur interprétation) peuvent être non-triviaux.

matrices de correspondances complète : le but serait de se limiter à déterminer une matrice de rang maximal. Chaque facteur perceptif peut être influencé par un ou plusieurs critères objectifs. La seule contrainte imposée est que le jeu de facteurs perceptifs ne peut être expliqué qu'avec le jeu complet de critères objectifs (c.-à-d. espaces objectif et perceptif non-dégénérés);

matrices de correspondances triangulaire : un compromis possible entre les deux extrêmes décrits ci-dessus consisterait à rechercher une matrice triangulaire, conduisant à une hiérarchisation des critères objectifs et facteurs perceptifs. Le premier facteur perceptif serait lié uniquement au premier critère objectif, les facteurs suivants pouvant être influencés par des critères objectifs figurant plus haut dans la hiérarchie.

Lorsqu'on regarde en détail les recherches et les résultats d'études en acoustique des salles, on s'aperçoit que, pour la plupart, un modèle du premier type est recherché, c.-à-d que à chaque aspect perceptif on associe exactement un critère objectif. Malheureusement, l'indépendance des facteurs et des critères ainsi trouvés est plus souvent supposée *a priori* que vérifiée *a posteriori*.

Une vérification de cette indépendance nécessite deux volets : sur le plan perceptif, il faut vérifier que l'espace n'est pas dégénéré, c.-à-d. que le nombre de dimensions trouvées ne peut pas être réduit. Par contre, il n'est pas forcément nécessaire que les aspects perceptifs trouvés soient orthogonaux ; il suffit qu'ils restent *potentiellement* indépendants, c.-à-d. qu'une variation sur un facteur perceptif soit possible sans que les autres facteurs ne changent, pour *une variation des données objectives appropriée*. Car, sur le plan objectif, les valeurs des critères inclus dans le jeu de critères choisi pour l'explication des données perceptives souvent changent simultanément, c.-à-d. que leurs variations sont objectivement corrélées. Ceci est surtout le cas pour les mesures dans les salles réelles, où un déplacement, à l'intérieur d'une même salle, du premier rang au dernier rang, entraîne la variation simultanée d'une multitude de critères. Seul le laboratoire, avec son environnement contrôlé et grâce aux techniques de l'acoustique virtuelle, permet de dissocier totalement les différents critères.

2.15 Eléments psycho-acoustiques

Ce chapitre donnera les résultats de quelques études psycho-acoustiques qui n'étaient pas mentionnés dans le chapitre précédent. Ces éléments seront utilisés dans la suite de ce document et sont à la base des définitions de critères objectifs.

2.15.1 Intégration de l'énergie des réflexions précoces au son direct

La découverte de l'effet de précedence (loi du premier front d'onde) a démontré que des réflexions précoces ne gênent pas la localisation de la source sonore. Mais ceci ne veut nullement dire qu'ils n'auraient pas d'effets perceptibles, notamment en termes de colorations (e.g. [SASW66], [And77]) et d'augmentation d'impression d'espace ([MK52], [Sch67], [Bar71], [Bar93]).

Mais l'effet principal reste l'augmentation de la puissance subjective du son direct, les réflexions précoces augmentant le niveau perçu de la source sonore.

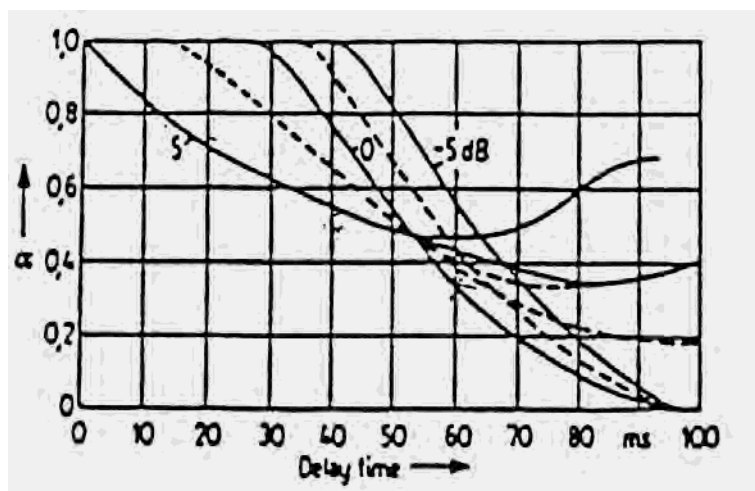


FIG. 2.8 - Fraction de l'énergie de la réflexion intégrée perçutivement à l'onde directe, en fonction du retard et paramétrée par le niveau de la réflexion.

Reste à décider maintenant si toute l'énergie des réflexions est intégrée au son direct ou si cette intégration dépend d'autres paramètres. Les tests les plus complets sur cette question ont été effectués par Lochner & Burger (e.g. [LB58]). La figure 2.8 montre les résultats les plus importants :

- l'intégration dépend du délai de la réflexion ;
- l'intégration dépend du niveau de la réflexion.

L'intégration est quasi-totale jusqu'à 40 ms après la date d'arrivée du son direct, avant de décroître, dans la plupart des cas, à un niveau négligeable vers 90 ms. Deuxièmement, une réflexion de faible niveau est plus facilement intégrée dans sa totalité qu'une forte réflexion. Le premier point, ainsi que le niveau de bruit de fond, est intégré dans la définition de rapport signal sur bruit S/B (ou S/N , pour Signal to Noise ratio) de Lochner & Burger :

$$S/B = 10 \log \frac{kE_u}{kE_n + L_b}, \quad (2.13)$$

$$\text{où } E_u = \int_{0ms}^{95ms} a(t)h^2(t)dt \quad \text{et} \quad E_n = \int_{95ms}^{\infty} h^2(t)dt$$

la pondération $a(t)$ est donnée par :

$$a(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq t \leq 35ms \\ 1 - \frac{(t-35)}{60} & \text{pour } 35 < t \leq 95ms \\ 0 & \text{pour } t > 95ms \end{cases} \quad (2.14)$$

Il existe aussi une définition plus complexe dans laquelle la pondération a dépend aussi du niveau de la réflexion, $a(t)$ devenant ainsi $a(p, t)$. La courbe pour une réflexion, plus forte de 5 dB que le son direct, apporte un autre élément : cette réflexion est intégrée plus fortement quand les délais sont plus grands, avec un maximum d'intégration vers 80 ms. Ou, exprimé différemment, en terme d'énergie de la réflexion, les réflexions avec un délai d'environ 80 ms sont à peine intégrées dans l'énergie du son direct quand leur énergie est inférieure, mais sont plus fortement intégrées quand leur énergie est supérieure à celle du son direct.

Malheureusement, seule l'intégration des réflexions isolées a été étudiée. Ces résultats, resteront-ils valables dans le cas des réflexions multiples, comme dans un champ acoustique réel? Dans ce cas, chaque réflexion isolée va avoir un niveau relativement faible, privilégiant son intégration totale pour des délais faibles. De plus, la multiplication des réflexions se succédant les unes aux autres diminue l'écart entre les réflexions et amoindrit ainsi le risque et la gêne potentiels d'écho, privilégiant de nouveau une intégration totale.¹²

Une autre question est de savoir si "l'intégration conditionnelle" des réflexions plus tardives (dans le cas où les réflexions tardives ont plus d'énergie que le son direct) reste valable pour le cas des réflexions multiples.

2.15.2 Effets du niveau sonore

Quelques effets du niveau sonore sur la perception de la qualité acoustique ont déjà été discuté dans le chapitre 2.10.2 à propos de la thèse de R. Wettschurek. Un effet, qui n'était alors que brièvement mentionné, sera discuté ici un peu plus en détail (voir e.g. [ZF67]):

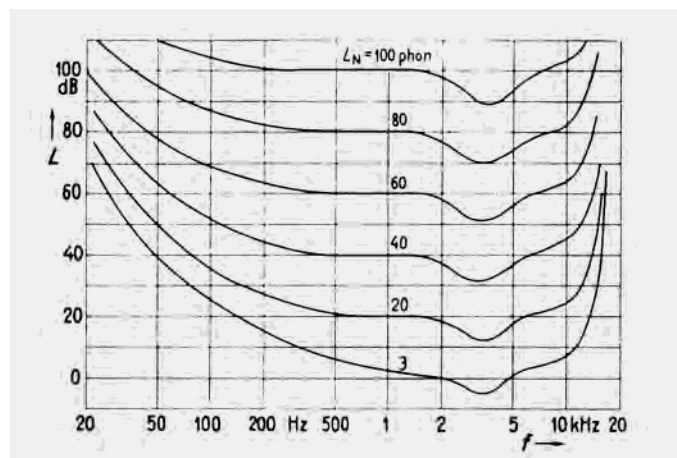


FIG. 2.9 - Courbes d'isophonie (en champs libre), d'après [ZF81].

Resserrement des courbes d'isophonie: Notamment pour les fréquences graves ainsi que, dans un moindre degré, pour les fréquences aiguës (supérieur à 5 kHz), une variation du niveau objectif d'un son, de même grandeur, produit un changement *subjectif* plus grand que pour les fréquences moyennes (autour de 1 kHz). Cet effet se vérifie très clairement sur les *courbes d'isophonie*, reproduit dans la figure 2.9. Reflétant la forte non-linéarité de l'oreille humaine, cet effet peut notamment produire un changement de la balance spectrale en fonction du niveau objectif du message sonore. Il pourrait alors s'avérer utile de convertir les niveaux objectifs (en fonction de la fréquence) en niveaux *subjectifs*, en intégrant ce resserrement des courbes d'isophonie.

2.15.3 Masquage postérieur

Un son ne peut pas uniquement être masqué par un son masquant simultané, mais chaque son a un pouvoir masquant *après* sa terminaison. Ce pouvoir de masquage décroît avec l'écoulement du temps après l'arrêt du son masquant, commençant avec un pouvoir de masquage égal à celui observé dans le cas de deux sons simultanés, et devenant négligeable après environ 200 ms. La figure 2.10, d'après [ZF81], démontre graphiquement cet effet de masquage postérieur.

12. L. Beranek avance une nouvelle interprétation de son critère d'ITD (initial time delay gap) dans ce sens : un délai minimal entre le son direct et les premières fortes réflexions assure l'intégration totale de ces réflexions et "élargit" la plage temporelle d'une intégration totale.

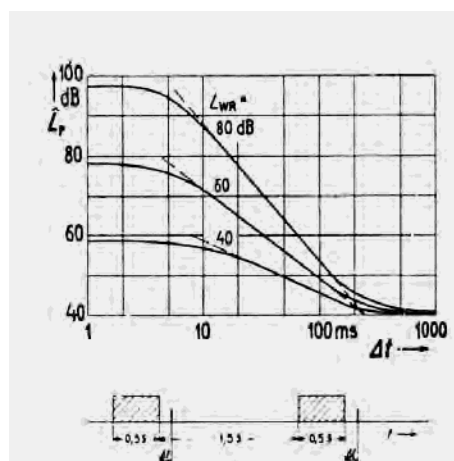


FIG. 2.10 - Masquage postérieur d'une impulsion de pression gaussienne de durée 30 μs , par un bruit blanc. en fonction de la durée Δt après l'arrêt du bruit, d'après [ZF81].

Chapitre 3

Travaux antérieurs de l'équipe acoustique des salles de l'Ircam

3.1 Discussion à partir de l'étude bibliographique

L'étude bibliographique a mis en évidence la complexité de la perception de la qualité acoustique d'une salle. Les différentes recherches ont dénombré un grand nombre d'aspects perceptifs, et, dans les tentatives d'expliquer ces effets perceptifs, un grand nombre de critères objectifs a été défini.

Mais, en essayant de recenser les aspects perceptifs *indépendants* et de déterminer les critères objectifs correspondants, deux obstacles principaux ont été rencontrés :

corrélations entre critères objectifs : il a été vérifié que les différents segments temporels de la réponse impulsionnelle sont *a priori* indépendantes. Cette indépendance ne peut plus être observée dans des salles réelles. Par exemple, à volume constant, le temps de réverbération et l'énergie du champ réverbéré sont entièrement liés. De la même manière, les différents critères de clarté (C80, temps central, etc.) sont naturellement corrélés avec le temps de réverbération d'une salle. Plusieurs études de corrélations de critères objectifs dans des salles réelles ont été menées (pour n'en donner que quelques exemples, [Sev84], [Jul86], [TY93], cf. aussi le chapitre 8 de ce document). Seules des études en laboratoire, dans lesquelles différents critères acoustiques peuvent être variés de manière indépendante et contrôlée, permettent d'éviter ces corrélations et les ambiguïtés d'interprétation en résultantes ;

nombre de facteurs perceptifs : le nombre de facteurs perceptifs trouvé dans chaque étude *individuelle* semble borné à trois ou quatre. De plus, la nature exacte de ces facteurs est fortement influencée par les stimuli présentés, ainsi que par la méthode d'analyse utilisée (questionnaires vs. jugements non-verbaux, étude de corrélation vs. analyse factorielle).

Ceci met un doute sur la question du nombre total de facteurs perceptifs de la qualité acoustique d'une salle : l'étude globale de Beranek ([Ber62], chapitre 2.5) ainsi que tous articles de "review" ([Ber92], [Gri93], voir aussi [Bar93]) trouvent systématiquement un nombre élevé de facteurs perceptifs, compris entre 5 et 11. Par contre, toute étude spécifique utilisant des méthodes d'analyse multidimensionnelle (notamment les études de Berlin, cf. 2.8 et de Göttingen, cf. 2.7) ne fait apparaître que trois ou quatre facteurs perceptifs.

Mais ce problème est commun à toute étude psychologique car les sujets, afin de remplir la tâche de discrimination demandée, se focalisent sur les différences *les plus pertinentes* et négligent ainsi (ou ne perçoivent même pas) des différences existant sur d'autres aspects — différences pourtant facilement perceptibles en tant que telles.¹ Si l'on accepte le concept des

1. Pour illustrer ce phénomène on prendra l'exemple suivant : on imagine la tâche "simple" de différencier des

facteurs perceptifs indépendants, défini ci-après, cette argumentation amène à considérer deux points importants :

- 1° une *hiérarchie* doit exister entre les facteurs perceptifs. La hiérarchisation des facteurs peut, par contre, être influencée par les stimuli présentés, car elle dépend de l'importance de la variation sur chaque facteur perceptif. La “véritable” hiérarchisation ne peut être établie que dans des situations réelles de concerts ;²
- 2° afin de révéler tous les détails de la structure perceptive, l'espace doit être balisé en plusieurs sous-espaces : pour trouver les facteurs perceptifs masqués, des tests doivent être effectués en gardant *constant* tout aspect influençant les facteurs perceptifs déjà identifiés.

L'équipe acoustique des salles à l'Ircam, sous la direction de Jean-Pascal Jullien et en collaboration avec le CNET (Centre Nationale d'Etudes de Télécommunications), a mis en œuvre une *série* de tests en laboratoire afin de dépasser ces limites observées dans les études antérieures. L'étude a principalement été effectuée dans le cadre de la thèse de Catherine Lavandier ([Lav89]), avec l'aide d'Olivier Warusfel pour la mise en place expérimentale. Une méthode d'analyse spécifiquement adapté à ce type de question a pu être utilisée grâce à l'aide de Suzanne Winsberg, statisticienne et collaboratrice de l'équipe. Il s'agit du programme INDSCAL (INDividual SCALing, [CC70], [Pas84]) permettant non seulement d'effectuer des analyses multidimensionnelles sur la moyenne des jugements, mais de prendre en compte les différences interindividuelles (voir le paragraphe suivant).

3.2 Facteurs perceptifs et le programme Indscal

Le concept des *facteurs perceptifs*, déjà beaucoup utilisé dans ce document, mais pas encore défini, et la structure du programme INDSCAL sont intrinsèquement liées.

On part de l'hypothèse selon laquelle la qualité acoustique d'une salle est un continuum qui peut être représenté dans un espace multidimensionnel. Tous les auditeurs doivent avoir, dans cet espace multidimensionnel, des repères afin de distinguer différentes qualités acoustiques. On suppose *a priori* que ces repères sont *commun* à tous les auditeurs et qu'il s'agit de facteurs mutuellement orthogonaux. On les appellera *facteurs perceptifs*. De plus, la distance perceptive entre deux situations acoustiques est donnée par la distance euclidienne dans l'espace multidimensionnel structuré par les facteurs perceptifs. Par contre, les auditeurs affectent des *poids* différents à chaque facteur, ce qui traduit une *sensibilité* variable selon l'auditeur à tel ou tel aspect de la qualité acoustique. Pour établir la préférence subjective, les différents facteurs interviennent selon le poids attribué par le sujet ainsi que par des *valeurs optimales* qui peuvent dépendre de l'individu.

L'hypothèse de base est alors que la *structuration* de l'espace multidimensionnel par les facteurs perceptifs est commune à tous les auditeurs, les différences interindividuelles ne jouant que sur les poids attribués aux différents facteurs et sur la préférence subjective. On peut alors donner la définition suivante du concept des facteurs perceptifs :

Définition : Un facteur perceptif est un repère dans l'espace multidimensionnel qui est commun à tout sujet. Mais si les repères sont communs à tous, l'importance attribuée à chacun d'entre eux ainsi que les valeurs préférées sont susceptibles de varier entre sujets.

Le programme INDSCAL reflète ces hypothèses : les données de départ sont des jugements de *dissimilarité* sur des *pairs* de stimuli. Le principal avantage de cette méthode est qu'elle est

êtres humains, présentés en paires pendant environ 15 secondes. Si on choisit comme “objets” des humains très différents par leur taille et leur poids (ou rapport poids/taille) ainsi que leur couleur de peau, des aspects tels que la couleur des yeux ou des détails du visage ne seront pas perçus de manière consciente et n'influenceront pas les jugements recueillis.

2. On entend par “véritable” qu'il s'agit de la hiérarchisation trouvée avec les variations des critères objectifs observées dans les salles réelles — ou plutôt sur un sous-ensemble représentatif des salles réelles.

basée sur des jugements non-verbaux (sur une échelle de 0 à 10, suivant que le sujet trouve les deux configurations totalement semblables ou très éloignées), ainsi évitant tout problème de sémantique.

Pour chaque test, chaque configuration doit être comparée à toutes les autres. Si l'on considère n configurations, il y a donc $n(n-1)/2$ couples de configurations à écouter. Les données de départ se présentent alors comme une matrice triangulaire de distances δ_{ij} par sujet p .

Chaque matrice de distances peut être représentée dans un espace multidimensionnel, propre au sujet p . Mais le but est de trouver l'espace *commun* à tous les auditeurs de façon optimale; pour cela il faut déterminer à la fois les axes (communs à tous auditeurs) et les poids (propre à chaque auditeur, pour chaque axe). On prévoit que l'optimisation interindividuelle fera apparaître les repères de l'espace considéré.

L'optimisation dépendra cependant de la dimension r de l'espace vectoriel dans lequel on cherche à placer les configurations. Ce nombre est également le nombre de facteurs perceptifs que l'on obtient pour le test considéré. Des analyses statistiques (évolution du pourcentage de la variance expliquée, erreur quadratique résiduel) permettent de choisir un nombre optimal de dimensions.

On discutera encore des différences principales entre l'analyse INDSCAL et les analyses multidimensionnelles plus classiques comme l'ACP (Analyse en Composantes Principales, un sous-ensemble de l'analyse factorielle, [MT77], [SRN72], [BCW88]).³ L'ACP part également d'une représentation multidimensionnelle des données, après transformation des données brutes par l'analyse de corrélations et/ou covariances entre les questions. La détermination des axes dans cet espace multidimensionnel est effectuée selon le critère de la maximisation de la variance du premier axe. Prenons comme cas d'exemple deux aspects distincts, mais légèrement corrélés. L'ACP, afin de maximiser la variance du premier axe, déterminera le premier axe par la *somme* des deux aspects, car la variance de la somme est supérieure à la variance de chaque aspect individuel. L'analyse INDSCAL, par contre, peut utiliser l'optimisation des différences interindividuelles (variation des poids individuels) afin d'établir si les sujets utilisent la somme des deux aspects ou plutôt les deux aspects *individuellement* comme repère dans l'espace multidimensionnel. L'ACP a donc tendance à *mélanger* ou *corrélérer* les aspects individuels, tandis que l'analyse INDSCAL, au contraire, a tendance à séparer ou *décorrélérer* les aspects — au moins si les poids des sujets sont assez différenciés. Cette décorrélation deviendra importante par la suite, pour la raison suivante: si les deux aspects considérés sont corrélés, une partie de la variance du deuxième aspect (aspect avec la variance la plus faible) est déjà imputée dans le premier axe, car les axes doivent toujours rester mutuellement orthogonaux. S'il existe maintenant un critère objectif correspondant au deuxième aspect, et parfaitement corrélé avec celui-ci, ce critère objectif n'est plus parfaitement corrélé avec le deuxième axe de l'analyse INDSCAL. Il faudra considérer que seules les corrélations avec le *premier axe* de l'analyse peuvent être interprétées en tant que telles; pour les axes suivants, cette imputation partielle de la variance doit être prise en compte.

L'analyse INDSCAL peut alors être considéré comme étant extrêmement puissante en ce qui concerne le fait d'*extraire* les facteurs perceptifs structurant la perception de la qualité acoustique. Un atout supplémentaire est l'évacuation de tout biais ou problème d'interprétation sémantique. Le prix à payer, par contre, est la difficulté d'interprétation des axes résultants. Les données de départ étant les distances inter-configurations notées par les sujets, aucune information n'indique sur quels paramètres les sujets se sont basés afin de remplir cette tâche de discrimination. De même, les axes qui en résultent ne portent aucune indication sur leur signification perceptive. L'interprétation des facteurs perceptifs dégagés doit être effectuée *a posteriori*, par une étude de corrélations avec des critères objectifs. Cette étude permet, pour chaque facteur perceptif, de trouver — et d'optimiser — un critère objectif *correspondant*.

Les facteurs perceptifs peuvent aussi être nommés *a posteriori* en faisant écouter aux sujets des variations portant sur un seul facteur perceptif à la fois. Pour cela, on choisit des configurations dont les coordonnées dans l'espace multidimensionnel de l'analyse ne diffèrent que sur

3. Pour plus de détails cf. [Jul95].

un seul axe.

3.3 La thèse de Catherine Lavandier

Le point de départ de cette étude ([Lav89]) était de vérifier si certains critères, habituellement utilisés en acoustique des salles, sont pertinents d'un point de vue perceptif. Ces critères étaient notamment :

- le temps de réverbération, TR ;
- le niveau sonore, G ;
- l'indice de clarté, C80 ;
- les pentes fréquentielles du niveau et du TR ;
- la distribution spatiale des premières réflexions.

Une série de 17 tests a été menée. Les tests portant uniquement sur les aspects *temporels* de la réponse impulsionnelle ont été effectués sur casque, tandis que pour les tests intégrant les aspects *spatiaux*, un système de 11 haut-parleurs en chambre sourde a été utilisé. Des enregistrements, réalisés en chambre sourde, ont été diffusés à travers un ensemble de lignes à retard, de filtres et une unité de réverbération du commerce, recréant ainsi un effet de salle artificiel. Deux tests ont été dédoublés avec un autre enregistrement comme signal test (un air de soprano de Bellini au lieu d'un mouvement d'une sonate pour flûte seule de Bach) et en faisant appel à des sujets différents, afin d'observer la stabilité des axes perceptifs par rapport à ces deux paramètres. La stabilité des axes donnés par la méthode d'analyse a été trouvée très bonne.

Dans chaque test, entre un et trois critères ont été variés de manière indépendante, en conservant, dans la mesure du possible, tous les autres critères constants.

On est parti de l'hypothèse selon laquelle, si les critères extraits de la littérature (critères de construction des tests) sont bien adaptés à la structuration de la perception, l'analyse doit révéler des espaces perceptifs qui sont structurés de manière similaire aux espaces de construction : le nombre de dimensions des deux espaces doit être identique et, plus encore, les deux espaces doivent être homéomorphes (les seules transformations bijectives autorisées sont des translations, des homotéties et des inversions ; en toute rigueur, des rotations sont exclues, car les critères sont censés correspondre directement aux facteurs perceptifs, et non pas à des combinaisons linéaires de facteurs perceptifs).

Le nombre de dimensions de l'analyse (donc des facteurs perceptifs par test), paramètre libre du programme INDSCAL, a généralement pu être déterminé sans ambiguïté. Le nombre d'axes d'analyse *par test* était de 2 à 4 (sauf pour un test où la meilleure interprétation a été trouvée en gardant 5 axes). D'emblée, le nombre d'axes était donc supérieur au nombre de critères de construction qui ont varié dans un test. Il a été prouvé qu'un certain nombre de critères, habituellement utilisés en acoustique des salles, engendrent des effets sur *plusieurs* facteurs perceptifs à la fois.

La plupart des critères de construction n'a ainsi pas pu être retenue pour la définition des critères correspondant aux facteurs perceptifs. Notamment une variation de l'indice de clarté C80 a induit des variations sur plusieurs facteurs perceptifs.

Le problème majeur de l'interprétation des données recueillies consiste, premièrement, à nommer les axes et à trouver des critères objectifs correspondants, et, deuxièmement, à *relier* les espaces trouvés dans les différents tests. Pour chaque test, chaque axe représente un facteur différent. Mais, *sur l'ensemble des tests*, chaque facteur perceptif peut correspondre à un axe *pour chaque test différent*. La totalité des 17 tests donnait 56 axes d'analyse. Le problème est alors d'identifier quels axes, pour les différents tests, correspondent au même facteur perceptif. La manière la plus fiable d'établir ces correspondances est, de nouveau, une étude de corrélations. Si deux axes (de deux tests différents) sont bien corrélés au *même* critère objectif,

ils représentent le *même* facteur perceptif. Pour compliquer la situation, cette interprétation est, pour les axes postérieurs, parfois brouillée par l'imputation partielle de la variance aux premiers axes.

Le but final, pour la *série* des tests, est de trouver un *jeu* de facteurs perceptifs et de critères objectifs correspondants pouvant être considéré comme une *base* (au sens mathématique strict) de l'espace multidimensionnel de la perception. Quand cette base est déterminée une fois pour toute, la qualité acoustique peut, sans ambiguïté, être décrite par l'ensemble des valeurs sur chaque facteur perceptif — ou, par la correspondance perceptif/objectif, par l'ensemble des valeurs des critères objectifs correspondants.

termes descriptifs	critères objectifs	sensibilité
absent — présent	ZDIR	1/dB
faible — énergique	G	1/dB
brouillé — net	C80	1,05/dB
lointain — proche	ZDIR _{C80} _{>+3dB}	0,95/dB
sec — réverbérant	$10 * \log_{10}(TR)$	2/dB = 0,8/(10% de variation)
plat — contrasté	Dir/REF	0,60/dB
coulant — heurté	Tcp	0,06/ms
dur — doux	ETA	0,05/ms
neutre — intime // pateux	$10 * \log_{10}(TR_{BF})$	1,1/dB
sec — vivant // acide	$10 * \log_{10}(TR_{HF})$	2/dB
creux — chaud // lourd	G _{BF}	0,7/dB
pauvre — brillant // acide	G _{HF}	0,8/dB
impression d'espace	LE = $10 * \log_{10}(\text{lef})$	0,95/dB
largeur de la source	ANG	0,1/degré

TAB. 3.1 - *Tableau final de la thèse de Catherine Lavandier : les facteurs perceptifs, les noms proposés, les critères objectifs correspondants et des sensibilités perceptives pour une variation du critère objectif. Les noms proposés sont donnés en forme d'un couple de termes descriptifs opposés. Les // séparent les termes proposés pour une valeur excessive du critère. Les critères sont définis de la manière suivante: G, C80 et TR sont les critères habituels. ZDIR est l'énergie arrivant pendant les premiers 40 ms, mesurée avec un microphone cardioïd orienté vers la source. REF est l'énergie des réflexions arrivant avant 80 ms. Dir/REF est défini comme le rapport (en dB) du son direct pur avec REF, Tcp est le barycentre en temps des réflexions REF et ETA l'écart-type des réflexions dans REF. TR est le temps de réverbération large-bande, pour les tests intégrant une variabilité du TR en fonction de la fréquence $TR = TR(1kHz)$. BF dans ce cas signifie la moyenne des bandes d'octave 125 Hz et 250 Hz, HF la moyenne des bandes d'octave 4 kHz et 8 kHz. LE est l'efficacité latérale de Barron (en dB) et, finalement, ANG est le barycentre en angle de l'énergie associée à la source comme mesurée par ZDIR.*

Le tableau 3.1, repris de l'annexe 3 de la thèse de Catherine Lavandier, donne le résumé des résultats concernant l'ensemble des facteurs perceptifs. Un nombre total de 14 facteurs perceptifs a été identifié. Ces facteurs peuvent être répartis dans quatre sous-groupes :

- facteurs perceptifs concernant les variations des critères temporels : 5 facteurs ;
- facteurs perceptifs concernant les effets de coloration dus aux premières réflexions : 3 facteurs ;
- facteurs perceptifs concernant les effets de coloration dus aux valeurs de TR et du niveau (G) en fonction de la fréquence : 4 facteurs ;
- facteurs perceptifs concernant les effets de spatialisation : 2 facteurs.

3.4 Nouvelle interprétation des tests en laboratoire par Jean-Pascal Jullien

Les données ont été reprises et réinterprétées par Jean-Pascal Jullien dans les années 1991 à 1994. Ces résultats n'étant que partiellement publiés et/ou difficilement accessibles ([JKWW92], [Jul93]), ils seront décrits plus en détail. Le but principal était d'améliorer la cohérence dans l'interprétation des différents tests, en essayant de réduire le nombre *total* de facteurs perceptifs.

L'optimisation portait sur plusieurs volets en même temps :

- identification des facteurs perceptifs qui apparaissent dans les différents tests ;
- prise en compte de l'imputation partielle de la variance du premier axe sur les suivants (prise en compte de l'orthogonalisation des axes par INDSCAL) ;
- optimisation des critères correspondants aux facteurs perceptifs, *simultanément* sur les différents tests ;
- recherche d'explications psycho-acoustiques.

D'un point de vue acoustique, il a été constaté que la perception des *premières* réflexions (réflexions comprises entre 10 et 40 ms après la date d'arrivée du son direct) est *très différente* de la perception des *deuxièmes* réflexions (réflexions comprises entre 40 et 80 ms après la date d'arrivée du son direct). La prise en compte des effets dus à cette différence de perception a permis d'améliorer notablement l'interprétation des données sur la base d'un jeu de facteurs perceptifs et de critères objectifs correspondants.

Le nombre de facteurs perceptifs nécessaires à la description complète de la perception de la qualité acoustique d'une salle a ainsi pu être réduit à neuf — ou à cinq, si l'on ne tient pas compte des effets fréquentiels.

Les données objectives disponibles ont été : l'énergie du son direct (nommé **OD**) ; l'énergie des premières réflexions (réflexions comprises entre 10 ms et 40 ms, nommé **R1**) ; l'énergie des deuxièmes réflexions (réflexions comprises entre 40 ms et 80 ms, nommé **R2**) ainsi que l'énergie et le taux de décroissance (TR) de la réverbération tardive (la décroissance était exponentielle à partir de 80 ms). Pour les tests effectués en chambre sourde, la date et les directions d'arrivée des réflexions individuelles sont connues à partir des critères de construction.

3.4.1 Effets du niveau précoce : DirE

Dans aucun des tests un axe spécifique lié à la variation du niveau global n'est apparu. Par contre, et de manière cohérente, des axes liés au *niveau précoce* et au *niveau tardif* sont apparus. Pour chaque test, lorsque le niveau global a été changé, *deux* axes ont été trouvés systématiquement, un axe étant davantage lié à la perception du niveau précoce, l'autre étant plus lié à la perception du niveau tardif.

Pour le critère DirE (pour son DIRect Etendu), une optimisation portant sur les 13 axes liés à ce critère (sur 14 tests étudiés) a conduit aux observations suivantes :

intégration de R1 : l'intégration de l'énergie des premières réflexions, **R1**, est complète ;

intégration de R2 : l'intégration de l'énergie des deuxièmes réflexions, **R2**, n'est pas *partielle*, mais *conditionnelle*. L'énergie contenue dans les deuxièmes réflexions n'est que très faiblement intégrée au son direct étendu, DirE, quand elle est inférieure à l'énergie précédente (somme — désignée par **O40** — de l'énergie du son direct, **OD**, et des premières réflexions, **R1**). Par contre, la partie de **R2** dont le niveau excède l'énergie de **O40** est *totale*ment intégrée. Ce résultat est présenté comme une extension des résultats de Lochner & Burger (décrit dans le chapitre 2.15.1) ;⁴

4. Une pondération spatiale a été trouvée pour les tests variant la direction d'arrivée des réflexions, les réflexions provenant de l'arrière étant légèrement affaiblies. Ce résultat est cohérent avec l'interprétation des résultats de Wettschurek donnée dans le chapitre 2.10.2 : l'affaiblissement est due à l'effet de l'ombre de la tête.

élongation temporelle de R2: l’optimisation a aussi démontrée que la plage temporelle de R2 (plage temporelle de l’intégration conditionnelle) devrait être légèrement plus grande que l’intervalle [40, 80 ms]: un intervalle [40, 95 ms] semble en effet plus adapté. Ce résultat se rapproche davantage de la formule de l’indice S/B donné par Lochner & Burger.

Le son direct étendu (DirE) est alors la somme énergétique du son direct, **OD**, des premières réflexions, **R1**, ainsi que des deuxièmes réflexions, **R2**, décomposées en deux parties: la partie énergétique dépassant l’énergie de **O40** est totalement intégrée tandis que le reste n’est intégré que faiblement, la pondération (en linéaire) étant de 0,18:

$$DirE = 10 * \log_{10}(OD + R1 + R2[R2 > O40] + 0.18 * R2[R2 \leq O40]), \quad (3.1)$$

où $R2[R2 > O40]$ indique la partie énergétique de **R2** dont le niveau excède l’énergie de **O40** (**O40** étant la somme linéaire de **OD** et de **R1**) et $R2[R2 \leq O40]$ la partie de R2 étant plus faible que l’énergie de O40.

Une autre manière de formuler l’équation 3.1 consiste à comparer le contenu énergétique des deux plages temporelles [0, 40 ms] et [40, 80 ms], ce qui mène à une autre interprétation de la signification de l’intégration *conditionnelle*:

$$\begin{aligned} DirE &= 10 * \log_{10}(\max(O40, R2) + 0.18 \min(O40, R2)) \\ &= 10 * \log_{10}(\max(\int_{0ms}^{40ms} p^2 dt, \int_{40ms}^{80ms} p^2 dt) + \min(\int_{0ms}^{40ms} p^2 dt, \int_{40ms}^{80ms} p^2 dt)). \end{aligned} \quad (3.2)$$

Dans cette formulation il devient clair que R2, dans le cas où R2 contient plus d’énergie que O40, est interprété comme le son direct, avec une intégration partielle de l’énergie précédente: R2 se substitue à O40. Cette substitution de R2 à O40 ne concerne *que* la perception du niveau précoce (on appellera le facteur perceptif correspondant “*présence*”), l’effet du premier front d’onde et donc la localisation ne sont pas affectés.⁵

Les formules 3.1 et 3.2 ont été présentées avec les bornes temporelles de [40 ms, 80 ms] pour R2. Actuellement les informations sur l’élongation temporelle ne semblent pas suffisamment fiables et nécessiteraient d’autres investigations et/ou études psycho-acoustiques.⁶

3.4.2 Effet de salle: Rev

La principale amélioration apportée par Jean-Pascal Jullien dans la définition du critère de **Rev**, à l’issue d’une optimisation effectuée sur les 13 axes perceptifs liés à ce critère (sur 14 tests étudiés), consiste à intégrer le masquage postérieur (cf. chapitre 2.15.3, [ZF67]) de la réverbération tardive par le son direct étendu. La question reste de savoir à quel degré les résultats psycho-acoustiques, trouvés sur des clicks, peuvent être appliqués à une réponse impulsionnelle — réponse qui doit être convoluée avec le message musical pour obtenir le signal parvenant aux tympanes d’un auditeur. Ce masquage est au moins valable pour la perception des transitoires d’attaques, et l’amélioration de la correspondance entre le facteur perceptif et le critère objectif indique très clairement l’importance de ce masquage.

5. Supposant que le niveau de l’onde direct est suffisamment fort pour “déclencher” l’effet de prédérence. A ce sujet, cf. également les travaux de D. Griesinger ([Gri95a],[Gri95b]).

6. L’optimisation effectuée par Jean-Pascal Jullien montre que les meilleurs résultats sont obtenus en prenant la plage temporelle de [40 ms, 80 ms] pour la comparaison $\max(O40, R2)$, mais en effectuant la somme énergétique de O40 et R2 sur un R2’ avec les bornes temporelles de [40 ms, 95 ms]. L’ambiguïté de la frontière entre les réflexions, au moins partiellement intégrées au son direct, et la réverbération tardive, est très courante et ne s’applique pas seulement à cette étude. On rappellera par exemple les différences de bornes temporelles définies pour différents critères comme le C80 et LE (80 ms), pour le critère S/B (95 ms), ainsi que les découpages effectués par David Griesinger (son direct, 10-50 ms, 50-100 ms et 100 ms-∞) ou par l’équipe de Paul Veneklasen (son direct, réflexions enveloppantes (20-110 ms) et réverbération, [Ven75]). De toute manière il est peu probable que des frontières fixes soient adaptées à la perception et à l’intégration des réflexions dans le son direct, cf. par exemple les données expérimentales à ce sujet dans [AA73].

L'optimisation effectuée portait sur plusieurs paramètres à la fois :

énergie masquante : il a été trouvé que l'énergie masquante est constituée par l'énergie des premiers 40 ms, O40, et non par le son direct étendu, DirE ;

énergie masquée : le masquage s'applique, en accord avec les résultats d'études psycho-acoustiques ([ZF67, chapitre 78]), sur les premières 200 ms de la réverbération statistique, commençant à 80 ms (ou avec le changement de la borne temporelle, à 95 ms). Il est intéressant d'observer que l'énergie contenue dans la plage temporelle de **R2** ne contribue ni à l'énergie masquante ni à l'énergie masquée ;

pondération de l'énergie masquante : l'efficacité du masquage dépend du retard entre l'énergie masquante et l'énergie masquée, le pouvoir masquant diminuant au fur et à mesure que le retard s'approche de la valeur limite de 200 ms. Il a été décidé, pour des raisons de simplification, d'incorporer cet effet par un facteur de pondération sur l'énergie masquante. Le masquage se calcule, par une simple soustraction de sonies, avec l'énergie masquante diminuée de 11 dB (ce qui, en linéaire, est équivalent à un facteur multiplicatif de 0,08).

La définition du critère Rev reflète notamment un effet qui est très notable lorsqu'on écoute la différence entre les grandes salles de concerts et celles de taille réduite: la réverbération tardive est d'autant plus audible qu'elle arrive tardivement.

On pourrait penser qu'un masquage appliqué uniquement aux premières 200 ms (pour un TR souvent égal ou supérieur à 2 s), avec, de plus, une diminution de l'énergie masquante de 11 dB, serait insuffisant pour produire un effet notable. Mais il faut rappeler que les 200 premières millisecondes d'une décroissance exponentielle contiennent une grande partie de l'énergie totale du champ tardif — énergie qui, en fait, est souvent soit totalement, soit largement, masquée.

La Rev se calcule alors comme la somme énergétique de l'énergie du champs tardif, arrivant après 280 ms après la date d'arrivée du son direct (appelé **R280**) et l'énergie *non-masquée* de la plage temporelle [80ms, 280ms] (appelé **Rr80_280**, r pour restante).

L'application des règles de masquage donne la formule de l'énergie non masquée, Rr80_280 :

$$Rr80_280 = 10^{\log_2(2^{\log_{10}(R80_280)} - 2^{\log_{10}(0,08 * O40)})}, \quad (3.3)$$

et la formule finale de la Rev devient :

$$Rev = 10 * \log_{10}(Rr80_280 + R280), \quad (3.4)$$

où $Rr80_280 = R80_280_{non_masqué} = R[80\ ms, 280\ ms]_{non_masqué}$ est l'énergie restante dans la plage temporelle [80 ms, 280 ms], après application du masquage par le son direct étendu, et $R280 = R[280\ ms, \infty[$ est l'énergie arrivant plus tard que 280 ms après le son direct.

3.4.3 Réverbérance subjective

De bonnes corrélations ont été trouvées entre le critère de construction, TR, et les axes perceptifs interprétés comme correspondant au facteur perceptif de *réverbérance*.⁷

L'optimisation de la correspondance objectif/subjectif, effectuée sur les 12 axes liés au facteur perceptif de la réverbérance, a révélé les influences supplémentaires suivantes :

- la réverbérance subjective dépend principalement de la décroissance précoce (cf. [ASS65], [Jor75], [Bar93]) ;
- la réverbérance subjective ne dépend pas seulement de la durée de réverbération (TR), mais aussi du *niveau* du champ tardif ;

7. On essaiera dans ce document de toujours faire la distinction entre la *réverbération* et la *réverbérance*. Une variation du paramètre objectif du temps de réverbération entraîne (ou peut entraîner) un changement de la perception de la réverbérance subjective.

- en évaluant la réverbérance, une confusion apparaît entre la réverbération globale (pour toutes fréquences, c.-à-d. sans application d’un filtrage) et la réverbération pour des fréquences aiguës.

Le premier point peut être pris en compte en substituant au temps de réverbération “classique”⁸ un temps de réverbération calculé sur le début de la décroissance intégrée. Le tableau suivant reproduit les différentes formules proposées dans la littérature pour le calcul d’un temps de réverbération précoce (“early decay time”, EDT), ainsi que la définition standardisée pour le temps de réverbération (cf. aussi l’article [KJ94], reproduit en Annexe) :

critère	(référence)	nom utilisé dans ce document	intervalle d’évaluation
TR	(ISO 3382)		-5 à -35 dB (ou -5 à -25 dB)
T_E(EDT)	(Jordan)	EDT (EDT10)	0 à -10 dB
T_I	(Atal et al.)	EDT15	0 à -15 dB
T_A	(Kürer & Kurze)	EDT20	0 à -20 dB
t160	(Atal et al.)	t160	0 à 160 ms

TAB. 3.2 - Différentes formules proposées dans la littérature (cf. [CM82]) pour le calcul du temps de réverbération, avec leurs intervalles d’évaluation.

Mais il y a un autre problème dans l’évaluation des temps de réverbération précoces : le temps de réverbération TR est calculé, d’après [ISO93], par une régression linéaire sur la courbe de décroissance intégrée ([Sch65]) dans l’intervalle d’évaluation [-5, -35 dB] (ou [-5, -25 dB], quand la dynamique de la mesure ne permet pas de calculer la décroissance sur l’intervalle [-5, -35dB]). Il a paru évident de procéder de la même manière en calculant les temps de réverbération précoces. Mais plusieurs chercheurs (entre autres David Griesinger, [Gri93]) ont remarqué qu’il y aurait une autre méthode, plus pertinente d’un point de vue de la perception : l’EDT est censé correspondre à l’audibilité de l’effet de réverbération, surtout pendant le déroulement d’un discours musical continu (“running reverberation”, au lieu de “stopped reverberation”, le traînage du son étant perçu après un arrêt brusque de la musique). Si l’on considère qu’on entend la réverbération jusqu’à un niveau de -10 dB, par rapport au niveau total de la décroissance intégrée, il faut calculer le temps *en absolu* qui se déroule entre le temps zéro (date d’arrivée du son direct) et le moment où le niveau de la décroissance intégrée atteint -10 dB re. le niveau total — au lieu de calculer une régression linéaire sur les échantillons de l’intervalle considéré. La différence principale entre les deux méthodes est l’importance attribuée au son direct : pour un champ acoustique avec un son direct prépondérant, l’effet de celui-ci est *sous-estimé* par une régression linéaire, car le nombre d’échantillons correspondants est extrêmement petit (voire un seul pour une réponse impulsionnelle idéale) ; l’effet est, par contre, pris en compte par la méthode considérant la différence absolue.⁹

Avec la nouvelle définition du temps de réverbération précoce, la dépendance de la réverbérance du niveau du champ tardif est déjà prise en compte. L’optimisation a donné les meilleures correspondances avec le facteur de la réverbérance pour le critère EDT15, défini sur les 15 premiers dB de la décroissance intégrée. On cite de l’article de Jean-Pascal Jullien [Jul93] :

“Le critère EDT classique (EDT10, d’après Jordan) semble optimal lorsque les deux facteurs de réverbérance et d’effet de salle sont mêlés, par exemple lorsque le

8. Ci-après l’abréviation TR indiquera le temps de réverbération “classique”.

9. D’une certaine manière l’EDT, calculé selon la nouvelle méthode proposée, est un rapport énergétique — comme les différents critères de clarté proposés. La différence est double : premièrement, l’intervalle temporel correspondant est nettement plus grand (pour un TR de 1,8 secondes, l’intervalle d’évaluation d’EDT10, pour une décroissance parfaitement exponentielle, correspond à 300 ms). Deuxièmement, le rapport ne se fait pas sur un intervalle temporel fixe, mais sur un rapport énergétique fixe. De plus il y a une autre différence dans la définition : on ne considère pas un rapport énergie précoce sur énergie tardive, mais un rapport énergie totale sur énergie tardive. La nouvelle définition de l’EDT correspond à la formule suivante : on cherche le temps t pour lequel $E_{\text{total}}/E_{\text{tardive}}$ devient égal à 10.

TR tardif est constant comme c'est le cas lorsque l'on reste dans une même salle. Par contre, si l'on ne veut mesurer que l'effet de réverbérance, il est préférable d'appliquer la modification proposée (et d'utiliser le critère EDT15).”

Un critère incluant l'ambiguïté entre la réverbération du signal large-bande (ou réverbération aux fréquences moyennes) et la réverbération des fréquences aiguës est proposé dans [KJ94]. Ce critère intègre la pente de la réverbération vers les hautes fréquences :

$$\text{EDT}' = \text{EDT15}_{\text{global}} + 0.5 * (\text{EDT15}_{\text{HF}} - \text{EDT15}_{\text{MF}}), \quad (3.5)$$

où EDT15_{MF} est la moyenne d'EDT dans les deux bandes d'octave autour de 500 Hz et 1 kHz et EDT15_{HF} la moyenne dans les deux bandes d'octave 2 kHz et 4 kHz.

3.4.4 Perception des réflexions dans la plage temporelle [40 ms,80 ms]

Comme il a été mentionné dans l'introduction de ce chapitre (cf. page 48), la perception des deuxièmes réflexions, R2, (réflexions contenues dans l'intervalle temporel [40 ms,80 ms] ou [40 ms,95 ms]) est sensiblement différente de celle des premières réflexions (R1 : [20 ms,40 ms]). Il a déjà été vu que l'énergie contenue dans cette plage temporelle, sauf pour le cas exceptionnel où elle est supérieure à celle des 40 premières ms, ne contribue que peu dans la perception de l'effet précoce de la salle, ni non plus dans la perception de l'effet de salle (tardif). Mais ceci ne veut nullement dire qu'elle n'a pas d'effet perceptible.

Il a d'abord tenté l'explication des axes perceptifs liés à cet effet par des critères de rapport énergétique. Il a été trouvé que le niveau du son direct, et du son direct étendu DirE, n'intervient que très peu sinon pas du tout. Par contre, la correspondance est significative en comparant, sur la décroissance intégrée, l'énergie contenue dans cette plage temporelle avec l'énergie arrivant *après*, c.-à-d. l'énergie du champ tardif. Il s'agit alors d'évaluer la *chute relative* de la décroissance intégrée dans la plage temporelle [40 ms,80 ms].

Ceci a induit la définition d'un nouveau critère, nommé D2 :

$$\begin{aligned} \text{D2} &= 10 * \log_{10} \left(\frac{R2 + R3 + R4}{R3 + R4} \right) \\ &= 10 * \log_{10} \left(\frac{\int_{t=40ms}^{\infty} p^2 dt}{\int_{t=80ms}^{\infty} p^2 dt} \right) \end{aligned} \quad (3.6)$$

Les études ont montré qu'une valeur trop élevée de ce critère D2 peut produire un effet de son "heurté" ainsi qu'une diminution de la clarté subjective, surtout pour des valeurs supérieures à 2 dB (effet de "cassure" de la décroissance). Si cela se produit, on doit ou bien diminuer l'énergie de ces réflexions ou bien augmenter le niveau de la réverbération tardive pour améliorer les conditions d'écoute.

Mais une autre interprétation de cet effet est possible, et a finalement été préférée: en fait, à quelques détails près, le critère de D2 peut être interprété comme étant une variation du critère EDT15, *orthogonalisé* par rapport aux critères de DirE et de Rev. L'effet perceptif correspondrait alors à une variation de l'EDT15 pour un rapport DirE/Rev constant).

Comme le pouvoir explicatif des trois critères, DirE, Rev et EDT, a été trouvé supérieur à celui des quatre critères DirE, Rev, EDT et D2, une interprétation ne conservant que les trois premiers critères a été préférée — surtout car il n'y avait aucun test où D2 et EDT apparaissent *en même temps*. De nouvelles expériences psycho-acoustiques seront nécessaires afin de vérifier si le critère de D2 peut apparaître comme un facteur perceptif, c.-à-d. potentiellement indépendant du critère EDT. L'étude des questionnaires dans les salles réelles permettra éventuellement de fournir des éléments de réponse à cette question.

3.4.5 Critères liés à l'impression d'espace

Pour l'impression d'espace, comme pour les aspects énergétiques, une différenciation des effets perceptifs des premières réflexions (**R1**) et des deuxièmes réflexions (**R2**) a été constatée, mais de manière différente. Les résultats obtenus nécessitent quelques remarques préalables :

- le système de haut-parleurs utilisé pour la récréation d'un champ acoustique artificiel en chambre sourde impliquait que les réflexions n'arrivaient que de quelques directions *discrètes*. Aucune formule de dépendance spatiale ne peut alors être obtenue, il s'agit seulement de pondérations pour les différentes directions d'arrivée, indiquant la forme générale de la dépendance spatiale ;
- les effets perceptifs des réflexions discrètes (provenant des emplacements des haut-parleurs) peuvent être comparés avec les effets des réflexions *diffuses*. Deux sortes de réflexions peuvent être considérées comme diffuses : premièrement, des réflexions multiples, envoyées simultanément sur plusieurs haut-parleurs en chambre sourde ; deuxièmement, pour tous les tests utilisant le casque comme moyen de diffusion, les réflexions peuvent être considérées comme diffuses.

L'optimisation a abouti à la définition de deux critères objectifs, nommés ANG1 et dANG2 :

$$\text{ANG1} = 10 * \log_{10}(\text{R1} + 0,23 * \text{R2}), \quad (3.7)$$

et

$$\text{dANG2} = 10 * \log_{10}(\text{R1} + \text{R2} + 0,2 * \text{R3}) - d \quad (3.8)$$

$$= \text{ANG2} - d, \quad (3.9)$$

où d indique l'énergie du son direct perçu : $d = 10 * \log_{10}(\max(\text{OD}, \text{R1}))^{10}$ et les énergies arrivant des différentes directions sont *pondérées* par les valeurs données dans les tableaux 3.3 et 3.4 suivants.

azimut	0°	50°	130°	180°	diffus
R1	0,01	0,33	0,28	-	1,1
R2	0,01	0,33	0,28	0	0,2

TAB. 3.3 - *Pondérations spatiales, en fonction de la date d'arrivée de la réflexion et de l'angle d'arrivée, pour le critère ANG1. Le signe "-" signifie des valeurs non accessibles, ces cas n'ont pas apparus dans les tests.*

azimut	0°	50°	130°	180°	diffus
R1	0,3	0,5	0,7	-	0,3
R2	0,3	0,4	0,7	0,7	1,5
R3	-	-	-	-	1,5

TAB. 3.4 - *Pondérations spatiales, en fonction de la date d'arrivée de la réflexion et de l'angle d'arrivée, pour la partie ANG2 du critère dANG2. Le signe "-" signifie des valeurs non accessibles, ces cas n'ont pas apparus dans les tests.*

Les pondérations pour les réflexions diffuses sont extrêmement fortes, ce qui souligne l'importance de la diffusion dans des lieux d'écoute.

Comment interpréter ces deux nouveaux critères ? Le critère ANG1 est surtout sensible à l'énergie arrivant entre 20 et 40 ms, avec une sensibilité plus forte pour les réflexions latérales.

10. On voit donc, de nouveau, que les plages temporelles ayant un contenu énergétique supérieur au son direct proprement dit, peuvent se substituer perceptivement à celui-ci.

L'énergie de cette plage temporelle étant totalement intégrée dans la perception de la présence des sources, il s'agit alors d'un effet sur la perception des *sources*, effet qui peut être interprété comme l'élargissement subjectif de la source dû aux réflexions précoces — on retrouve l'aspect de la largeur apparente de la source (“apparent source width”, ASW), discuté dans l'étude bibliographique, chapitre 2. Le critère ANG2 est surtout sensible à l'énergie contenue dans R2, mais également à l'énergie contenue dans R1 et, pour des réflexions diffuses, à l'énergie dans R3.¹¹ L'inspection de la dépendance azimutale d'ANG2 montre que toute énergie *ne parvenant pas de l'entourage proche de la source* contribue à l'augmentation du critère ANG2 — ce critère est alors représentatif de la perception spatiale de la *salle*, par rapport au son direct **d**, la seule contribution directe de la *source* (ce qui aurait été perçu en champ libre). On note aussi le rapprochement de la dépendance angulaire avec le critère *R*, défini par le groupe de Dresde, [RL78b]. On rapprochera alors ce critère ANG2 de la notion d'*enveloppement*.

Pour le critère d'ANG1, la meilleure correspondance entre critère objectif et facteur perceptif n'a pas été trouvée pour le critère ANG1 en tant que tel, mais pour le critère **dANG1**,¹² défini comme (tout en dB) :

$$\text{dANG1} = \text{ANG1} - \text{DirE}. \quad (3.10)$$

Le critère ANG1 se compare au critère DirE, il s'agit alors du “pourcentage” (en linéaire) de l'énergie établissant la présence arrivant latéralement.

Les données disponibles, à partir de cette série de tests en laboratoire, ne permettent pas d'affirmer que les formules des critères correspondants aux facteurs perceptifs concernant l'impression d'espace sont exactes, et des recherches supplémentaires peuvent s'avérer utiles afin de vérifier les pondérations spatiales trouvées et d'établir de véritables fonctions spatiales. Néanmoins, les analyses ont permis d'établir la forme générale des dépendances spatiales ainsi que temporelles. De plus, l'analyse effectuée par le programme INDSCAL prouve qu'il y a bien *deux* facteurs perceptifs relatifs à l'impression d'espace, et que les deux facteurs perceptifs peuvent être identifiés respectivement comme *largeur apparente de la source* et comme *enveloppement*.

3.4.6 Critères liés aux effets fréquentiels

Seuls deux tests ont été spécifiquement consacrés à l'étude des phénomènes fréquentiels. Dans un premier test, la courbe du temps de réverbération en fonction de la fréquence a été variée, de manière indépendante pour les fréquences graves et les fréquences aiguës. Dans un autre test, en utilisant un filtre appliqué à la totalité du signal (son direct, réflexions ainsi que réverbération tardive), le niveau en fonction de la fréquence a été varié, de manière indépendante pour les fréquences graves et les fréquences aiguës, ici encore.

Dans l'analyse de données perceptives chaque variation objective correspondait à un axe INDSCAL, ce qui indique que chacune des variations effectuées est perçue de manière indépendante et correspond à un facteur perceptif. Etant donné qu'il n'y avait qu'un seul test par variation — et donc qu'un seul axe perceptif correspondant au changement objectif —, il est difficile d'optimiser les critères correspondants aux axes perceptifs, l'explication utilisant les critères de construction donne déjà une explication satisfaisante. Il n'a pas été possible, par exemple, d'établir si les facteurs perceptifs correspondants aux variations de TR en fonction de la fréquence correspondent plus à des pentes du TR en fonction de la fréquence, ou à des pentes de l'EDT.

Une optimisation a été réussie sur les variations de G en fonction de la fréquence : la correspondance avec les axes perceptifs est meilleure lorsque l'on considère les variations du critère de DirE en fonction de la fréquence plutôt que les variations du critère de G. De plus, une influence *négative* de la variation du critère DirE pour les fréquences graves a été observée sur

11. L'intégration de R3 peut être interprétée comme indicateur d'un élargissement de la plage temporelle de R2.

12. Ce problème d'interprétation des facteurs perceptifs est intrinsèquement lié au programme INDSCAL, discuté au chapitre 3.2. Comme les facteurs perceptifs liés à l'impression d'espace ne sont jamais apparus comme *premier* axe de l'analyse, l'axe se trouve *orthogonalisé* par rapport aux axes supérieurs.

le facteur perceptif lié à la variation du critère DirE pour les fréquences aiguës. Cela indique qu'un manque du niveau précoce dans les fréquences graves peut conduire à des effets similaires qu'un excès du niveau précoce dans les fréquences aiguës.

Les meilleures correspondances ont été trouvées avec les critères suivants:¹³

$$\Delta TR_{BF} = (TR_{63Hz} - TR_{\frac{125Hz \dots 8kHz}{4}})/4 \quad (3.11)$$

$$\Delta TR_{HF} = (TR_{\frac{4kHz, 8kHz}{2, 5}} - TR_{1kHz})/2, 5 \quad (3.12)$$

$$\Delta DirE_{BF} = (DirE_{63Hz} - DirE_{1kHz})/4 \quad (3.13)$$

$$\Delta DirE_{HF} = (DirE_{8kHz} - DirE_{1kHz})/3 \quad (3.14)$$

Des bonnes performances ainsi qu'une bonne stabilité des correspondances a également été trouvée lorsque l'on considère les trois plages fréquentielles BF (BF = moyenne des bandes d'octaves 125Hz et 250Hz), MF (MF = moyenne des bandes d'octaves 500Hz et 1kHz) et HF (HF = moyenne des bandes d'octaves 2kHz et 4kHz). Les pentes fréquentielles sont définies comme des déviations par rapport à la bande fréquentielle MF et les critères sont définis de la manière suivante:

$$\Delta TR_{BF} = (TR_{BF} - TR_{MF})/2 \quad (3.15)$$

$$\Delta TR_{HF} = (TR_{HF} - TR_{MF})/2 \quad (3.16)$$

$$\Delta DirE_{BF} = (DirE_{BF} - DirE_{MF})/2 \quad (3.17)$$

$$\Delta DirE_{HF} = (DirE_{HF} - DirE_{MF})/2 \quad (3.18)$$

3.4.7 Le jeu final des facteurs perceptifs et des critères objectifs correspondants

Le tableau suivant donne le jeu final de neuf facteurs perceptifs proposés par Jean-Pascal Jullien, ainsi que les critères objectifs correspondants et optimisés. Les définitions exactes des critères objectifs ont été données dans les paragraphes correspondants ci-dessus. Le critère D2 n'est plus inclus dans la description finale, l'interprétation des axes perceptifs correspondants avec le critère de l'EDT, interprété comme résidu du rapport DirE sur Rev, ayant donné des résultats meilleurs. Les noms des facteurs perceptifs, donnés dans le tableau, sont des noms proposés *a posteriori* — l'analyse INDSCAL assure l'existence d'un facteur perceptif, sans pourtant fournir de nom correspondant.

Neuf facteurs perceptifs ont été suffisants pour expliquer les 56 axes donnés par l'analyse des 17 tests qui en composaient la série.

3.5 Sensibilités perceptives

Lors des tests en laboratoire les *sensibilités* perceptives des critères objectifs ont également pu être déterminées: des jugements quantifiés de dissimilarité avaient été demandés aux sujets. A partir de ces jugements l'analyse INDSCAL trouve la meilleure représentation dans un espace multidimensionnel euclidien. La variance des différents axes trouvés permet de comparer directement l'importance respective de la variation perceptive selon chaque axe (représentant un facteur perceptif). Pour chaque facteur perceptif un critère objectif correspondant a été isolé et optimisé. Connaissant la variation du critère objectif et la variation selon le facteur perceptif on peut aisément déterminer la sensibilité perceptive pour chaque critère objectif correspondant à un facteur perceptif — à une constante près. Le seuil perceptif d'une variation de niveau étant

13. En utilisant les définitions suivants tous les critères des pentes fréquentielles sont donnés *par octave*. Les indices correspondent au bandes d'octave centrées autour de la fréquence indiquée.

Facteur	nom proposé	critère correspondant	sensibilité
F1	présence	DirE	1 u.p./dB
F2	effet de salle	Rev	1 u.p./dB
F3	réverbérance	EDT15	1 u.p./100ms = 10 u.p./s
F4	diffusion	dANG1 = ANG1 - DirE	0,25 u.p./dB
F5	enveloppement	dANG2 = ANG2 - d	0,7 u.p./dB
F6	brillance	$\Delta DirE_{HF} - 0,5 * \Delta DirE_{BF}$	2,4 u.p./dB/oct
F7	chaleur	$\Delta DirE_{BF}$	1,2 u.p./dB/oct
F8	vivacité	ΔTR_{HF}	2 u.p./100ms/oct
F9	lourdeur	ΔTR_{BF}	1 u.p./100ms/oct

TAB. 3.5 - Tableau final des facteurs perceptifs, de noms proposés, des critères objectifs correspondants et des sensibilités (en unités perceptives) pour une variation du critère objectif. Les définitions des critères sont données dans le texte.

d'environ 1 dB (cf. e.g. [CM76]), la sensibilité pour le premier facteur (DirE) a été mis à une unité perceptive pour une variation objective de 1 dB du critère DirE.

Comparant les sensibilités des différents critères liés aux facteurs perceptifs on trouve que la sensibilité du critère Rev est égale à celle du critère de DirE et vaut donc également 1 unité perceptive pour une variation de 1 dB. La sensibilité du critère d'EDT est de 1 unité perceptive pour une variation de l'EDT de 100 ms. On peut supposer que le critère de l'EDT doit être exprimé en logarithme ($10 * \log_e(EDT)$) afin d'obtenir une sensibilité qui ne varie pas selon la valeur absolue du critère.¹⁴ Les données recueillis lors des tests en laboratoire n'ont pas permis de trouver une amélioration de la correspondance objectif/ perceptif en utilisant le logarithme du critère de l'EDT. Utilisant les valeurs de l'EDT lors du test, la sensibilité (en linéaire) obtenue peut être traduit en une sensibilité en logarithme de 4 unités perceptives pour une variation de 1 dB, correspondant à 6% de variation du critère de l'EDT pour une unité perceptive.

Les sensibilités perceptives démontrent la différence des deux critères liés à la perception de l'impression d'espace: la sensibilité du critère **dANG2**, critère lié à l'enveloppement sonore, est très proche de celles des critères de DirE, Rev et EDT est vaut 0,7 unités perceptives par dB. La sensibilité du critère **dANG1**, critère lié à la largeur apparente des sources sonores, est environ quatre fois inférieure et vaut donc 0,25 unités perceptives par dB. De plus, la sensibilité change en fonction de la valeur absolue du critère, la sensibilité étant encore plus petit pour des valeurs faibles du critère.

Les sensibilités des critères liés aux effets fréquentiels seront toutes exprimé *par octave*. Les sensibilités des critères sont de:

- $\Delta DirE_{BF}$: le critère de $\Delta DirE_{BF}$ influence la perception de *deux* facteurs perceptifs, celui de la chaleur ainsi que celui de la brillance. La sensibilité conjointe sur les deux facteurs peut être évalué à 2,4 unités perceptives par dB par octave;
- $\Delta DirE_{HF}$: 2,4 unités perceptives par dB par octave pour une variation du critère $\Delta DirE_{HF}$ seul. Il est rappelé que le facteur de la brillance est également influencé par le critère $\Delta DirE_{BF}$;
- ΔTR_{BF} : 1 unité perceptive par 100 ms par octave;
- ΔTR_{BF} : 2 unités perceptives par 100 ms par octave. La sensibilité perceptive d'une variation du temps de réverbération est donc deux fois plus élevée pour les fréquences aiguës que pour les fréquences graves.

14. Il est évident qu'une augmentation de l'EDT de 1 seconde à 2 secondes produit un effet perceptif plus grand qu'une augmentation de 3 secondes à 4 secondes. Les études de Seraphim ([Ser58], [CM78]) ont établi le seuil perceptif d'une variation du TR à 4% - 5%.

3.6 Discussion

Les deux principaux résultats de cette série de tests effectués par le laboratoire d’acoustique des salles de l’Ircam ont été :

nombre de facteurs perceptifs : avec des méthodes scientifiques, il a été possible de confirmer que le nombre d’aspects perceptifs *indépendants*, utilisés par les auditeurs afin de distinguer des différences de la qualité acoustique, est bien supérieur à trois ou quatre. Le modèle final donne une description pertinente et extrêmement détaillée de la perception de la qualité acoustique ;

critères objectifs : pour chaque facteur perceptif un critère objectif *correspondant* a pu être identifié et isolé. Par la structuration des facteurs perceptifs comme axes dans un espace multidimensionnel, l’*indépendance* maximale de ces critères est assurée.

Pour finir, il faut également parler des quelques points faibles de la procédure expérimentale : les enregistrements utilisés pour les tests en laboratoire ont été *monophoniques*. Il en résulte que ni les effets d’une source (ou des sources) étendue, ni les effets de la directivité de la source (cf. [WJ90]) n’ont pu être reproduits correctement. Un instrument réel émet, dans les différentes directions de l’espace, des contributions différentes, en niveau comme en spectre. Ces différences ne peuvent pas être captées par un seul microphone (ni avec un couple stéréophonique de microphones). L’effet de salle reconstitué à partir d’un enregistrement monophonique reproduit un instrument *omnidirectionnel*, émettant la même contribution (celle qui a été captée par le microphone) dans toutes les directions. Cette différence, par rapport à des instruments réels, peut engendrer des effets importants pour des instruments avec une forte directivité, comme par exemple la voix humaine. De plus, seules des sources *frontales*, c.-à-d. à azimut et élévation de 0° , ont été simulées.

On peut conclure en affirmant que la description, issue des tests en laboratoire, devrait être très détaillée et pertinente pour des facteurs perceptifs liés à la distribution temporelle de l’énergie, ainsi que pour les facteurs liés à l’impression d’espace, due à la distribution spatio-temporelle des réflexions. Par contre, les effets de la distribution spatiale *des sources sur scène*, de la directivité des sources (en fonction de la fréquence) et d’une écoute non-centrale (c.-à-d. à une place écartée de l’axe centrale de la salle) ne sont pas, ou peu, pris en compte dans le modèle issu des tests en laboratoire. L’importance de ces effets doit être estimée dans le cadre d’autres expérimentations, menées de préférence à partir des tests en situation de concert. De plus, dans le chapitre 3.1, il a été vu qu’une hiérarchisation des facteurs perceptifs existe, mais que la hiérarchie trouvée peut fortement dépendre de détails dans le test effectué — la “vraie” hiérarchisation doit être établie à partir de tests réalisés en situation réelle.

Un des buts principaux de l’étude portant sur des situations réelles, décrite dans ce document, est de compléter les résultats obtenus par les tests en laboratoire. En second lieu, il s’agit, dans la mesure du possible, de vérifier — ou d’infirmar — les optimisations trouvées dans la nouvelle interprétation des tests effectués en laboratoire et de tester les performances des critères ainsi trouvés.

3.7 Le questionnaire structuré

Les résultats des tests en laboratoire ont aussi été utilisés afin d’établir un questionnaire structuré :

facteurs perceptifs : les facteurs perceptifs formant une base de l’espace multidimensionnel de la perception de la qualité acoustique, ils se prêtent naturellement à former la base d’un questionnaire structuré : une indépendance maximale des questions est ainsi assurée, et avec un minimum de questions on peut accéder à la totalité des informations ;

sensibilités : un atout supplémentaire pour la structuration du questionnaire se présente dans le fait que, lors de l'analyse des tests en laboratoire, la *sensibilité* à une variation de chaque critère objectif correspondant à un facteur perceptif a pu être estimée. Si, maintenant, on connaît les valeurs extrêmes que peut prendre chaque critère dans des salles réelles, une *échelle adaptée* peut être établie pour chaque question. Chaque question a donc une échelle de valeurs différente, adaptée à la sensibilité de l'aspect interrogé;

ajout des questions de la littérature : il a été décidé d'ajouter quelques questions, couramment employées dans les questionnaires rencontrés dans la littérature. Deux points peuvent être étudiés grâce à ces questions supplémentaires : premièrement, ces questions, apportent-elles de l'information supplémentaire par rapport à la base du questionnaire, formée par les questions liées aux facteurs perceptifs ? Deuxièmement, les liens entre ces questions et les facteurs perceptifs peuvent être étudiés — s'agit-il des facteurs perceptifs supplémentaires, non révélés dans les tests en laboratoire, ou plutôt des combinaisons de facteurs perceptifs ?

ajout des questions détaillées concernant la balance spatiale : les problèmes de l'intégration de la balance orchestrale dans les tests en laboratoire étant connus (emplacement spatial des sources sonores, source étendue, directivités des instruments d'orchestre, cf. la discussion ci-dessus), un soin particulier a été apporté à ces questions. Non seulement des questions concernant la "balance globale" et "l'équilibre entre soliste(s) et orchestre" ont été posées, mais, sur une page spécifique, un certain nombre de questions concernant la perception des sources, a été détaillé *par section d'instruments*.

Le premier questionnaire structuré a été établi sitôt après la fin de la thèse de Catherine Lavandier, c.-à-d. à l'issue de la première interprétation des données de l'analyse des tests en laboratoire.

La campagne européenne des mesures et des tests d'écoute a commencé en 1990, est s'est déroulée en même temps que la nouvelle interprétation des tests en laboratoire de Jean-Pascal Jullien (cf. le chapitre 3.4 ci-dessus). Chacune de ces deux études a donc profité des résultats de l'autre et une validation et optimisation du questionnaire a pu être menée.

Le questionnaire serait décrit plus en détail dans le prochain chapitre.

Chapitre 4

La campagne européenne de mesures et de tests d'écoute

Après le déroulement des tests en laboratoire (1986 - 1989), le laboratoire d'acoustique des salles de l'Ircam a procédé, dans le cadre d'un projet du Ministère de la Culture nommé "Aide aux architectes pour la conception des lieux d'écoute" ([IRC89, IRC90], [WJ92]), à une campagne de mesures et de tests d'écoute dans plusieurs lieux en Europe. Le but de ce travail a été, d'une part, de constituer une base de données pour de futures analyses et, d'autre part, de valider et de poursuivre un ensemble de recherches entreprises au sein du laboratoire d'acoustique des salles. Afin de constituer la base de données la plus fiable possible - et en vue d'analyses sur la préférence subjective - quelques salles parmi les plus réputées en Europe (comme la Philharmonie de Berlin, la Musikvereinssaal à Vienne ou la Scala à Milan) ont été incluses dans la campagne.

Toutes les salles ont été gracieusement mises à notre disposition par les directions responsables. A cet endroit, je tiens à les remercier, ainsi que toutes les personnes qui ont collaboré au bon déroulement de cette campagne laborieuse. Dans les grandes salles de concert et opéras les mesures ont été effectuées sur deux jours. Je tiens également à remercier tous les sujets qui ont participé aux tests d'écoute perceptifs.

La diversité des salles choisies permet une variation maximale des partis architecturaux : salles de concerts, opéras et salles pour la musique de chambre. Ainsi, on obtient une variation maximale des valeurs des critères objectifs et une meilleure indépendance des critères entre eux.¹ Cette diversité de salles, et donc de type de concert, a permis d'étudier la dépendance de la correspondance entre critères objectifs et réponses aux questionnaires au *type de musique* (musique symphonique, opéra et musique de chambre).

On évoquera brièvement les principaux volets de recherche menée autour de cette campagne :

validation et optimisation d'un questionnaire structuré : le but est de vérifier s'il est possible de recueillir des jugements fiables et pertinents lors de tests en situation réelle de concert. Ces dernières représentent la mise à l'épreuve de tout modèle de la perception de la qualité acoustique car tout artefact de la reproduction artificielle d'un champ sonore est éliminé. Par contre, des comparaisons instantanées ne sont plus possibles et les jugements doivent être *verbalisés*, ce qui peut conduire à des problèmes d'interprétation. Un soin particulier doit donc être apporté à l'élaboration sémantique du questionnaire. De plus, un différend persiste entre les chercheurs en acoustique des salles concernant le nombre de questions posées : est-il préférable d'utiliser un questionnaire *réduit* ou en faut-il un, au contraire, très complet ? La deuxième option a été retenue pour les tests perceptifs décrits dans ce document. Le principal avantage d'un questionnaire complet consiste à pouvoir

1. On a déjà signalé plus haut que le temps de réverbération et le niveau du champ réverbéré sont totalement liés pour un volume de salle constant. La variation des partis architecturaux et des tailles de salle permet, dans la mesure du possible, de décorréler les critères objectifs.

étudier la pertinence et l'indépendance des questions *a posteriori*. Les questions les plus pertinentes peuvent être isolées et les liens sémantiques entre les questions peuvent être révélés;

pertinence du modèle de correspondance perceptif/objectif : un des premiers objectifs de la campagne — et le point qui nous intéresse le plus dans ce document — a été la vérification, dans des situations réelles de concert, de la pertinence des relations entre perceptif et objectif trouvées à partir des tests en laboratoire (cf. chapitre précédent);

hiérarchisation des facteurs perceptifs : dans le chapitre 3.1 on a vu qu'une hiérarchisation des facteurs perceptifs existe, mais que la hiérarchie trouvée dépendra des détails du test effectué. Il s'agit alors de comparer la hiérarchisation trouvée en situation réelle avec celle obtenue par les tests en laboratoire;

balance orchestrale : les enregistrements utilisés pour les tests en laboratoire ont été *monophoniques*. Il en résulte que ni les effets d'une source étendue (ou des sources), ni les effets de la directivité des sources (cf. la discussion dans le chapitre 3.6 précédent, ou [WJ90]) n'ont pu être reproduits correctement. Les effets de la *distribution spatiale* des sources sur scène, de la directivité des sources, en fonction de la fréquence, et d'une écoute non-centrale (c.-à-d. à une place écartée de l'axe centrale de la salle) ne sont pas, ou peu, pris en compte dans le modèle issu des tests en laboratoire. Les tests en situation de concert permettront d'estimer l'importance de ces effets;

analyse des préférences : les jugements de préférence, également recueillis lors des tests en laboratoire, peuvent être vérifiés en utilisant des valeurs mesurées dans quelques-unes des salles les plus réputées du monde. De plus, les tests d'écoute apporteront des informations supplémentaires sur les jugements de préférence des auditeurs en situation de concert — plus fiables que des jugements en situation d'écoute artificielle;

protocole de mesures : le but final est de donner une caractérisation complète de la qualité acoustique d'une salle à partir des mesures objectives effectuées dans la salle ou, encore, à partir des simulations informatiques utilisant les plans architecturaux de la salle, existante ou en projet de construction. Cette caractérisation objective doit être pertinente d'un point de vue perceptif, en utilisant le modèle des correspondances objectif/perceptif décrit dans le chapitre précédent. Il s'agit ensuite d'élaborer un protocole de mesures pouvant donner cette caractérisation complète à partir d'un nombre minimal de mesures effectuées dans la salle (ou avec les outils de modélisation informatique). Pour cela, plusieurs paramètres doivent être étudiés et optimisés: nombre et emplacement des microphones, type et/ou directivité du microphone, nombre et emplacement des sources sur scène, utilisation d'un haut-parleur de mesure omnidirectionnel ou utilisation d'un haut-parleur directionnel;

modèles informatiques : la campagne de mesures a également servi à valider un environnement de simulation informatique développé au sein de l'équipe d'acoustique des salles de l'Ircam: plusieurs salles ont été discrétisées, et les résultats estimés par les outils de modélisation ont été systématiquement confrontés aux mesures objectives.

4.1 Les salles

Neuf salles ont été choisies pour la campagne de mesures et les tests perceptifs. Le choix des salles a été guidé par les critères suivants ([WJ92]):

- variation du parti architectural (volume, présence de balcons ou de fosse . . .);
- présence de salles réputées;

- présence de salles de conception récente, permettant la caractérisation acoustique de formes ou de matériaux contemporains ;
- opportunité d’accéder à des salles dans Paris.

Une dixième salle a été intégrée dans cette description de la campagne de mesures ainsi que dans les résultats de cette étude. Il s’agit de la salle de concert de la Cité de la Musique à La Villette, à Paris. Cette salle à acoustique et scénographie variables, dont l’ouverture a eu lieu en janvier 1995, a fait l’objet d’une campagne exhaustive de simulations informatiques (entre 1991 et 1994), de mesures acoustiques (à différents stades de construction de la salle : salle vide, salle munie de la moitié des sièges, salle munie de la totalité des sièges, salle occupée, entre 1993 et 1994) et de tests perceptifs (1994), [Dam91, IRC94b, IRC94c, IRC94a]. Quatre séries de tests d’écoute perceptifs ont été menées dans cette salle. La possibilité s’est donc présentée de varier plusieurs paramètres de manière systématique (variation de l’acoustique, variation et multiplication des œuvres, répétition d’une œuvre identique à plusieurs reprises, variation de l’occupation de la salle), ce qui a notamment conduit à une meilleure *quantification* des différentes influences sur les réponses aux questionnaires (cf. chapitre 5.5).

Le tableau 4.1 donne une brève description des salles incluses dans la campagne, tandis que dans le tableau 4.2 quelques précisions sont apportées sur les mesures, les tests perceptifs et les simulations effectués dans les différentes salles.

salle	code	lieu	nombre de spectateurs	$TR_{500\text{Hz}-1\text{kHz}}[s]$, salle vide
Musikvereinssaal	V	Vienne	1900	3,1
Concertgebouw	A	Amsterdam	2200	2,7
Philharmonie	B	Berlin	2400	2,3
Salle Pleyel	P	Paris	2300	2,1
Auditorium du Louvre	L	Paris	420	1,5
Opéra Palais Garnier	G	Paris	2000	1,5
Teatro alla Scala	M	Milan	2700	1,3
Théâtre des Champs-Élysées	C	Paris	2100	1,3
Auditorium du Musée d’Orsay	O	Paris	340	1,1
La Villette	I	Paris	950	1,7 - 2,4

TAB. 4.1 - Les salles incluses dans la campagne de mesures et de tests perceptifs, leur nom, lieu, nombre de spectateurs (approximatif) et temps de réverbération aux fréquences moyennes. Les mesures de TR ont été effectuées salle vide.

4.2 Le protocole de mesures employé

4.2.1 Caractérisation d’une salle par sa réponse impulsionnelle

La transformation apportée par la salle entre une source sonore et un récepteur peut entièrement être caractérisée par la mesure de la réponse impulsionnelle ([Jul86], [CM82]). Ce modèle est valable dans l’hypothèse où la salle est considérée comme un filtre linéaire invariant dans le temps. Une salle — contrairement à l’oreille humaine évaluant les informations apportées par la salle — peut être considérée comme linéaire, au moins pour les niveaux de pression acoustique considérés. Par contre, la réponse de la salle est différente selon que le régime est *transitoire* ou *stationnaire*, la différence portant sur la réponse en basses fréquences, où les modes propres de la salle entrent en jeu. Le système de mesure tient compte de cette différence en excitant la salle avec un bruit blanc avant de procéder à la mesure de la réponse impulsionnelle proprement dite. Mais la caractérisation de la salle par la réponse impulsionnelle n’est valable que pour un emplacement de la source et d’un récepteur donné ainsi que pour une directivité de la source et du récepteur donnée.

SALLE	MESURES OBJECTIVES couples sources-récepteurs / mesures	TESTS PERCEPTIFS			SIMULATIONS surfaces
		œuvres	auditeurs	places par auditeur	
Concertgebouw	341 couples / 630 mesures	3	9	4	234
Philharmonie	484 couples / 919 mesures	3	12	4	non discrétisée
Champs-Élysées	419 couples / 881 mesures	1	9	6	470
Palais Garnier	323 couples / 643 mesures	2	9	4	non discrétisée
La Villette	124 couples / 274 mesures	8	20	5	512
Louvre	95 couples / 191 mesures	4	7	7	200
Scala	361 couples / 764 mesures	1	9	4	non achevée
Orsay	89 couples / 177 mesures	3	6	3	219
Pleyel	420 couples / 816 mesures	5	12	4	242
Musikvereinssaal	300 couples / 600 mesures	3	10	6	248

TAB. 4.2 - Tableau récapitulatif de la campagne de mesures et des tests perceptifs : nombre de couples sources/récepteurs et nombre total des mesures effectuées, nombre d'œuvres, d'auditeurs et de places par auditeur pour les tests perceptifs et nombre des surfaces pour les salles discrétisées par des outils de prédiction informatique.

Afin de recueillir le maximum d'informations, tous les paramètres influençant la réponse impulsionnelle ont été variés systématiquement.² Il en a résulté :

- la multiplication des emplacements de sources ;
- la multiplication des emplacements de récepteurs ;
- la prise en compte de différentes directions d'émission de la source ;
- la prise en compte de différentes directivités du microphone.

La source de mesure utilisée était un haut-parleur *directionnel* de type *Yamaha NS1000*.³ Au préalable, ce haut-parleur a fait l'objet d'une caractérisation exhaustive (mesures de réponse impulsionnelle, réponse fréquentielle en fonction de la direction d'émission, diagramme et indice de directivité) dans la chambre sourde de l'Ircam, [Dam91].

Le microphone de mesure retenu était de type *Neumann U87*, permettant d'alterner, en n'utilisant qu'un seul microphone, entre les trois directivités *omnidirectionnel*, *cardioïde* et *figure 8*.

C'est le programme de mesures AMS (APIA Measurement System, développé par la société APIA en collaboration avec le CNET, [JGS84]) qui a été utilisé. Une séquence pseudo-aléatoire ("maximum length sequence", MLS), stockée sur disque dur, est envoyée via une carte d'acquisition *OROS U23* vers un amplificateur de puissance de type *Yamaha*, et de là vers le haut-parleur de mesure. Le signal capté par le microphone est amplifié par une table de mixage de type *SONOSAX*, numérisé par la carte d'acquisition et directement enregistré sur disque dur. Une horloge interne assure la synchronisation entre le signal envoyé et le signal récupéré. Par la date d'arrivée de l'onde direct, la distance entre la source et le microphone peut ainsi être mesurée exactement.

4.2.2 Choix d'emplacement des sources et récepteurs

Une grille régulière, avec une distance de 4 mètres entre les lignes, a été superposée au plan de la salle (cf. l'exemple sur la Philharmonie de Berlin, figure 4.1). L'origine du système

2. La norme ISO ([ISO93]) exige déjà, pour des grandes salles ayant une homogénéité acoustique de l'auditoire suffisante, un minimum de trois emplacements de source sur scène et de quatre emplacements du récepteur dans la salle.

3. Une caractérisation plus complète de la source de mesures est donnée dans le chapitre 8.3.

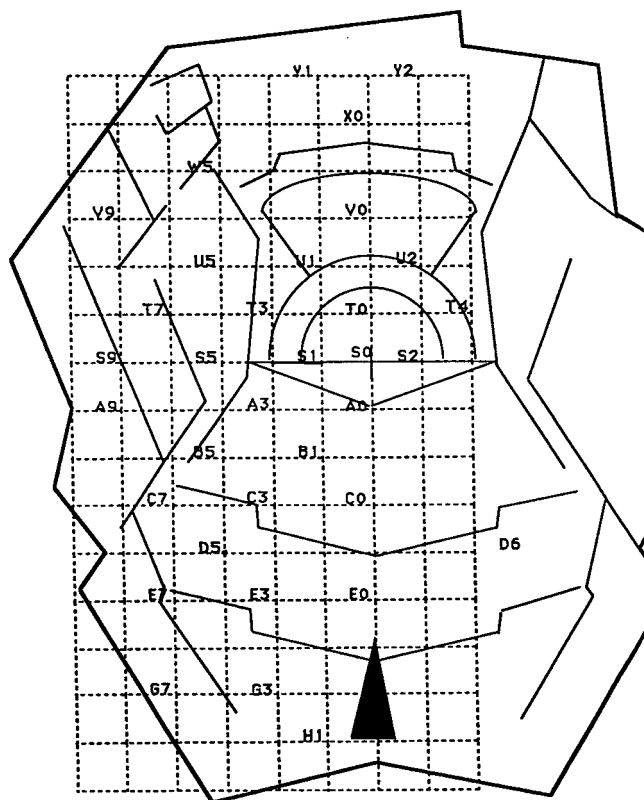


FIG. 4.1 - Plan de la Philharmonie de Berlin, avec la grille régulière superposée et les codes des emplacements des sources et des récepteurs.

de coordonnées est fixée à l'endroit du chef d'orchestre (le point correspondant est nommé "S0", pour l'origine de la scène), et chaque deuxième intersection sur la grille est considérée comme emplacement d'une source ou d'un récepteur. Lorsque le point d'intersection est situé dans l'auditoire, il est considéré comme emplacement d'un récepteur et, lorsqu'il est situé sur la scène, il est considéré à la fois comme emplacement d'une source et comme emplacement d'un récepteur. Le point "S0", emplacement du chef d'orchestre, est considéré comme point d'un récepteur.

La symétrie de la salle (toutes les salles mesurées ont un axe de symétrie) a été exploitée afin de limiter le nombre de mesures nécessaires.

Considérer la symétrie de la salle est certainement justifié, mais a, dans notre cas, induit un problème, du fait que des sources ainsi que des récepteurs ont été placés dans l'axe de la salle. Pour les couples où la source *et* le récepteur se trouvent dans l'axe de la salle, les réflexions, surtout en basses fréquences, s'ajoutent *en pression* et non pas *en énergie*. Cette interférence constructive peut modifier considérablement les valeurs de certains critères acoustiques. Malheureusement, ce problème n'a été mis en évidence qu'au cours de la campagne, et la nécessité de recueillir des données comparables dans les différentes salles a rendu impossible la modification du protocole de mesures au cours de l'expérimentation.

Pour une grande salle de concert, comme par exemple la Philharmonie de Berlin 8 emplacements de source et 23 emplacements de récepteur ont été retenus.

4.2.3 Directions d'émission de la source

Comme il a déjà été mentionné plus haut, la source était un haut-parleur *directif*. Afin d'étudier l'influence de la direction d'émission sur les valeurs des critères acoustiques, cinq directions d'émission ont été considérées :

- **F** : émission frontale
- **J** : émission vers *jardin*
- **C** : émission vers *cour*
- **A** : émission vers l'arrière
- **P** : émission vers le plafond

A partir de l'emplacement de la source "T0", situé au milieu de la scène à 4 mètres devant le chef d'orchestre, une mesure a été effectuée pour chaque direction d'émission de la source. Pour cet emplacement, il est alors possible de reconstituer une source *omnidirectionnelle*, par la sommation des énergies des différentes directions d'émission, effectuée indépendamment *par segment temporel*. Pour les autres emplacements, seules les directions d'émission *face* et vers le centre de la scène (*jardin* pour les emplacements situés côté *cour*, *cour* pour les emplacements situés côté *jardin*) ont été mesurées.

4.2.4 Directivités du microphone

Une mesure a été effectuée pour chacune des directivités du microphone, *omnidirectionnelle*, *cardioïde* et *figure 8*, pour la direction d'émission *frontale* de la source. La prise en compte de différentes directivités du microphone donne accès à des critères intégrant la direction spatiale de l'arrivée de l'énergie, comme l'efficacité latérale (LE), ou les critères du "Räumlichkeitsmaß" et du "Hallmaß" (R et H_w) de l'équipe de Dresde. Pour les autres directions d'émission, seule une mesure, avec une directivité *omnidirectionnelle*, a été effectuée.

4.3 Analyse des mesures, calcul des critères acoustiques

Le programme AMS calcule de manière automatique un certain nombre de critères acoustiques, notamment des critères "classiques" comme le temps de réverbération TR , ainsi que les critères issus de l'analyse des tests en laboratoire de l'équipe acoustique des salles de l'Ircam (cf. le chapitre précédent). Sinon, les énergies par segment temporel, aussi nommées "précritères" (cf. le tableau 4.3 suivant), permettent de calculer la majorité des critères définis dans la littérature ainsi que des critères supplémentaires, définis spécialement pour l'analyse des réponses aux questionnaires.

Avant le calcul des critères acoustiques, un filtrage de la réponse impulsionnelle par bandes d'octave est effectué. Tous les critères et les précritères sont donnés en valeurs globales et en valeurs *par octave*.

Les données en résultant sont transférées et lues par le programme d'analyse statistique S ([BCW88]), tournant sur une station Unix DEC3100. Grâce à ce programme, un grand nombre de critères a été défini et calculé, avant de procéder à des analyses statistiques — analyses des mesures seules, des réponses aux questionnaires seules, ou encore des correspondances entre les mesures objectives et les réponses subjectives recueillies. Les valeurs des critères ont également été calculées pour les bandes fréquentielles BF (basses fréquences, moyenne des bandes d'octave 125Hz et 250Hz), MF (moyennes fréquences, moyenne des bandes d'octave 500Hz et 1kHz) et HF (hautes fréquences, moyenne des bandes d'octave 2kHz et 4kHz).

Code	plage temporelle	formule	nom
OD	0 - 20 ms	$\int_{t=0ms}^{t=20ms} p^2 dt$	onde direct
R1	20 - 40 ms	$\int_{t=20ms}^{t=40ms} p^2 dt$	premières réflexions
R2	40 - 80 ms	$\int_{t=40ms}^{t=80ms} p^2 dt$	deuxièmes réflexions
R3	80 - 160 ms	$\int_{t=80ms}^{t=160ms} p^2 dt$	réverbération précoce
R4	160 ms - ∞	$\int_{t=160ms}^{t=\infty} p^2 dt$	réverbération tardive

TAB. 4.3 - *Découpage temporel de la réponse impulsionnelle effectué par le logiciel AMS*

4.4 Le questionnaire structuré

La base du questionnaire structuré est formée par les facteurs perceptifs, issus des tests en laboratoire. Le premier questionnaire a été établi à partir de la *première* interprétation des résultats des tests en laboratoire, publiée dans la thèse de Catherine Lavandier ([Lav89]). On verra plus tard comment la nouvelle interprétation des résultats par Jean-Pascal Jullien, ainsi que les résultats de cette étude peuvent être intégrés dans une reformulation et optimisation d'un questionnaire structuré.

A cette base, formée par les facteurs perceptifs, un certain nombre des questions a été ajouté. Ces nouvelles questions peuvent être classées en plusieurs catégories :

- 1° Questions couramment utilisées dans la littérature et/ou se référant à des notions géométriques, difficilement accessibles pour les tests utilisant un champ sonore artificiel. Il s'agit des questions sur la "*dynamique*", la "*distance subjective*" et la "*dimension subjective de la salle*". La question sur la dynamique peut être rapportée soit au niveau de bruit de fond de la salle (les niveaux de bruit de fond ont été mesurés pendant les mesures objectives effectuées dans les salles), soit à la non-linéarité de l'oreille humaine (la réponse de la salle pouvant être considérée comme linéaire, cf. chapitre 4.2.1).
- 2° Questions concernant la balance orchestrale. Les problèmes d'intégration de la balance orchestrale et spatiale dans les tests en laboratoire ont déjà été discutés dans le chapitre précédent. Des questions ont été ajoutées concernant la "*balance et l'homogénéité globale*" et, dans les cas appropriés, l'"*équilibre entre soliste(s) et orchestre*". De plus, toutes les questions concernant la *perception des sources* sont détaillées *par section instrumentale*.
- 3° Questions concernant la préférence subjective et questions de "contrôle". Même si, bien évidemment, la subjectivité des auditeurs se retrouve dans toutes les réponses aux questionnaires, les sujets avaient été instruits que, pour la plupart des questions, il s'agissait de rapporter leurs impressions *perceptives* sur l'acoustique à leur place, donc d'une *description* neutre, et non pas de l'expression de leur *préférence* sur cet aspect de la perception.

Par contre, sur la dernière page, il était demandé au sujet un véritable jugement de *préférence subjective* de "*l'impression générale sur l'acoustique de la salle*" à la place à laquelle il écoutait l'œuvre donnée. La question sur la "*balance et l'homogénéité globale*" est également considérée comme un jugement subjectif de préférence. Sur la même page,

une plage de libre expression, réservée à des commentaires, a été fournie. De plus, des questions de “contrôle” ont été ajoutées, à propos de “*l’adaptation de l’œuvre à la salle*”, de “*l’interprétation*” et de “*l’appréciation de l’œuvre musicale*”. Notre but est double: il s’agit premièrement d’un “garde-fou”, estimant que les réponses d’un sujet n’ayant pas du tout aimé l’œuvre musicale ni son interprétation doivent être traitées avec un soin particulier; deuxièmement, ces questions permettent d’étudier les liens entre les impressions sur la qualité acoustique de la salle et les impression plus directement musicales.

- 4° Questions spécifiques concernant la balance spectrale. Dans le questionnaire utilisé lors du premier test d’écoute perceptif à la Philharmonie de Berlin, les questions concernant la coloration (intimité, chaleur, vivacité et brillance) comportaient une phrase explicative sur leurs relations avec les facteurs perceptifs liés à la balance spectrale (réverbérance et puissance sonore des graves et des aiguës):

COLORATION

manque d’intimité assez intime intime (réverbérance des graves)
 <----- 1 ----- 2 ----- 3 ----->

creux(manque de chaleur) assez chaud chaud (puissance sonore des graves)
 <----- 1 ----- 2 ----- 3 ----->

sec assez vivant vivant (réverbérance des aiguës)
 <----- 1 ----- 2 ----- 3 ----->

pauvre assez brillant brillant (puissance sonore des aiguës)
 <----- 1 ----- 2 ----- 3 ----->

Cette double explication (connotation sémantique des mots, liens avec la perception de la balance spectrale) a paru conduire à des ambiguïtés sémantiques, notamment sur la question d’intimité, pour laquelle la majorité des sujets n’a pas trouvé évident le lien avec la réverbérance des graves.

On a donc décidé de *séparer* les deux interprétations. L’interprétation sémantiques des mots “intime”, “chaud”, “vivant” et “brillant” a été entièrement laissée aux auditeurs, aucune interprétation n’ayant été imposée et aucune explication des termes utilisés donnée. Le but était d’étudier et de vérifier *a posteriori* l’interprétation de ces termes par les sujets:

COLORATION

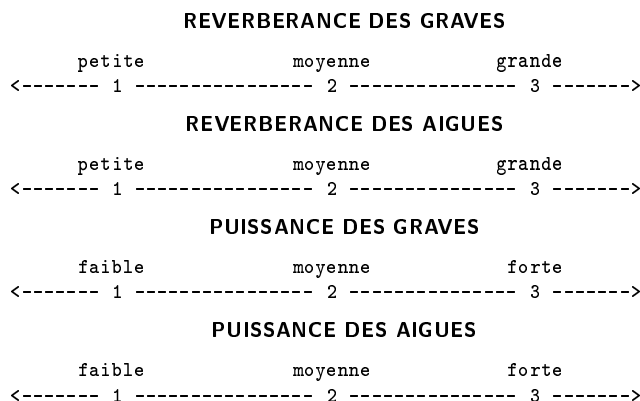
manque d’intimité assez intime intime
 <----- 1 ----- 2 ----- 3 ----->

creux(manque de chaleur) assez chaud chaud
 <----- 1 ----- 2 ----- 3 ----->

sec assez vivant vivant
 <----- 1 ----- 2 ----- 3 ----->

pauvre assez brillant brillant
 <----- 1 ----- 2 ----- 3 ----->

Sur une autre page, des questions sur la réverbérance des graves et des aiguës ainsi que sur la puissance sonore des graves et des aiguës ont été posées :



L'avantage de cette procédure est double : d'une part, les relations entre les questions sur les colorations et d'autres questions — notamment les questions sur la réverbérance et sur la puissance des graves et des aiguës — peuvent être étudiées. D'autre part, la fiabilité des sujets sur des questions relativement "objectives", comme la réverbération et la puissance dans les différentes bandes fréquentielles, peut être vérifiée.

Les questions ont été réparties sur 5 pages, chacune concernant une catégorie spécifique de questions. La première page réunit les questions liées à *la perception de la salle* : puissance sonore, dynamique, réverbérance, dimension subjective de la salle, enveloppement sonore, colorations (intimité, chaleur, vivacité et brillance) et défauts (pâteux, lourd, agressif, acide, dur). La deuxième page réunit les questions liées, de manière générale, à *la perception des sources sonores* : distance subjective, localisation et présence des instruments, précision d'écoute, définition des attaques, fluidité et équilibre entre soliste(s) et orchestre. La troisième page réitère les questions de la page précédente, concernant *la perception des sources sonores* mais, cette fois-ci, détaillées par pupitres (violons/altos, violoncelles, contrebasses, bois, cuivres, percussions, soliste(s), chœur) : distance subjective, localisation et présence des instruments, précision d'écoute, définition des attaques, fluidité. La quatrième page est dédiée aux questions concernant la *balance spectrale*, cf. la discussion ci-dessus : réverbérance des graves, réverbérance des aiguës, puissance sonore des graves et puissance sonore des aiguës, tandis que la cinquième et dernière page est consacrée aux questions de préférence subjective et d'appréciation personnelle ainsi qu'aux commentaires libres : impression générale sur l'acoustique de la salle, balance et homogénéité générale, adaptation de l'œuvre musicale à la salle, interprétation, appréciation de l'œuvre musicale et plage d'expression libre.

Le tableau 4.4 donne un résumé du questionnaire, en indiquant les différentes questions posées, les adjectifs explicatifs, l'échelle proposée (en unités perceptives) par question et les abréviations utilisées dans ce document, notamment dans les graphiques et les discussions autour des résultats d'analyses statistiques.

4.5 Les tests d'écoute structurés

Dans chaque salle, des tests d'écoute perceptifs structurés ont été organisés. Après consultation du programme proposée, un minimum de deux concerts, les plus rapprochés possible (un ou deux jours d'intervalle), a été choisi, avec une programmation habituelle et/ou adaptée à la salle. Lorsque cela était possible, des concerts "doublés", c.-à-d. deux concerts avec le même programme, étaient préférés.

Avant le concert, une présentation orale du questionnaire était donnée aux auditeurs, surtout pour expliquer le caractère *perceptif* du questionnaire, c.-à-d. qu'il étaient demandés, à

question	adjectifs explicatifs	échelle proposée (unités perceptives)	abréviation
puissance sonore	faible — fort	6	puiss
dynamique	faible — fort	6	dyn
réverbérance	petite — grande	6	rev
dimension subjective de la salle	petite — grande	4	dim sub
enveloppement sonore	faible — fort	4	env son
intimité	manque d'intimité — intime	3	int
chaleur	creux — chaud	3	chal
vivacité	sec — vivant	3	vie
brillance	pauvre — brillant	3	brill
pâteux	oui/non	0/1	pat
lourd	oui/non	0/1	lourd
acide	oui/non	0/1	ac
agressif	oui/non	0/1	agr
dur	oui/non	0/1	dur
distance subjective	loin — proche	6	dist s
localisation des instruments	diffuse — précise	2	loc
présence des instruments	faible — fort	2	pres
précision d'écoute	brouillé — net	6	prec d'ec
contraste	plat — contrasté	4	contr
fluidité	heurté — coulant	4	fluid
équilibre soliste/orchestre	masquage partiel/équilibré	5	equil
réverbérance des graves	petite — grande	3	rgrav
réverbérance des aiguës	petite — grande	3	rgaig
puissance des graves	faible — fort	3	rgrav
puissance des aiguës	faible — fort	3	raig
impression générale sur l'acoustique	mauvaise — bonne	5	IMGAL
balance, homogénéité générale	mauvaise — bonne	5	bal gal
adaptation de l'œuvre musicale	mauvaise — bonne	5	adapt
interprétation	mauvaise — bonne	5	interp
appréciation de l'œuvre musicale	mauvaise — bonne	5	appr

TAB. 4.4 - Les questions du questionnaires, leurs noms, les adjectifs explicatifs proposés, leur taille d'échelle proposée, en unités perceptives, ainsi que l'abréviation utilisée dans le texte et dans les graphiques représentant les résultats des analyses statistiques.

l'exception de la dernière page, des jugements *descriptifs* ne portant aucune connotation de préférence subjective sur les aspects individuels considérés dans les différentes questions.

Le sujets remplissaient un questionnaire *pendant*, et toute de suite après, le déroulement de l'œuvre écoutée. Lorsqu'il était donnée plus d'une œuvre pendant une moitié de concert, les sujets remplissaient un questionnaire *par œuvre*. A chaque entracte, et entre les concerts, les sujets changeaient de place, d'après un protocole de déplacement établi au préalable: ce protocole assurait que tous les sujets aient l'occasion d'écouter des *zones d'écoute* très différentes à l'intérieur de la salle — même s'ils n'avaient pas l'occasion d'écouter la totalité des places.

De manière générale, environ une dizaine d'auditeurs participait à chaque test d'écoute. Mais, compte tenu des disponibilités des auditeurs et du fait que la campagne s'étalait sur environ deux ans, chaque salle a été testée par un groupe d'auditeurs légèrement différent. Il existait néanmoins, dans ce groupe d'auditeurs, un noyau stable d'environ une dizaine de personnes. Chacun de ces dix sujets "privilegiés" a participé à au moins cinq tests sur les dix effectués et, dans chaque salle, ce noyau stable constituait la majorité des auditeurs. Le noyau stable ne comprenait que des sujets avertis: des acousticiens, des musiciens professionnels ou, du moins, des sujets avec une expérience régulière des concerts. Les autres personnes étaient invitées pour l'occasion, mais il s'agissait en générale de musiciens ou d'habitues des concerts.

En fonction de la disponibilité des places, et avec le souci de couvrir au moins toutes les zones d'écoute d'une salle, 6 à 12 emplacements étaient choisis. Ces places correspondaient exactement (à une ou deux places près) aux emplacement du récepteur lors des mesures objectives. Compte tenu du nombre de concerts (au moins deux) et du changement de place à l'entracte, chaque

auditeur écoutait au moins quatre places différentes, et chaque place retenue à été écoutée par au moins quatre auditeurs — mais généralement avec des œuvres différentes. Il s'est avéré qu'une normalisation des réponses des auditeurs ainsi qu'une procédure de minimisation de l'influence de l'œuvre a été nécessaire. Ces procédures de normalisation seront décrites dans le chapitre suivant.

4.6 Les œuvres écoutées et leurs forces sonores

Lors des tests d'écoute un large éventail d'œuvres différentes, employant des effectifs très variés, a été écouté, reflétant la variabilité de partis architecturaux considérés (grandes salles de concerts, opéras et auditoriums). Les extrêmes étaient un piano seul, duo violoncelle et piano ou quatuor à cordes, d'un côté; une symphonie de Bruckner ou les pièces d'orchestre d'Alban Berg, de l'autre côté. Le tableau suivant donne la liste des œuvres écoutées ainsi que les effectifs employés. Les effectifs sont donnés dans la nomenclature standardisée des partitions de musique, légèrement étendue pour prendre en compte le piano et les chanteurs solistes: nombre total de violons, altos, violoncelles, contrebasses, flûtes, hautbois, clarinettes, bassons, cors, trompettes, trombones, tubas, timbales, percussions, piano, chanteurs solistes et choristes. Les “//” séparent les différents groupes de l'orchestre. Le tableau indique également les puissances totales des effectifs employés, à droite en caractère gras.⁴ Ces résultats seront expliqués et utilisés dans le chapitre 10.

Concertgebouw Amsterdam :

Benjamin Britten, *War Requiem*

(30/12/10/6//4/4/4/4//6/4/3/1//1/1//0/3/60) : **116 dB**

Orchestre de l'Université d'Amsterdam, Jean Marie ten Velden

W. A. Mozart, Concerto pour piano et orchestre en do mineur KV 491

(20/8/7/5//1/2/2/2//2/2/0/0//1/0//1/0/0) : **111 dB**

A. Bruckner : Symphonie N° 5

(36/12/10/8//3/3/3/3//6/4/3/1//1/1//0/0/0) : **115 dB**

Koninklijk Concertgebouworkest, Riccardo Chailly

Philharmonie de Berlin :

J. Brahms : Concerto N° 1 pour piano et orchestre en re mineur op.15

(30/12/10/8//2/2/2/2//4/2/0/0//1/0//1/0/0) : **113 dB**

F. Schubert : *Rosamunde*, musique de ballet

(24/10/8/6//2/2/2/2//2/2/0/0//1/0//0/1/0) : **111 dB**

A. Berg : 3 pièces pour orchestre op. 6

(36/13/11/10//4/4/4/4//6/4/4/1//2/2//0/0/0) : **115 dB**

Berliner Philharmoniker, Claudio Abbado, Daniel Barenboïm, piano

Théâtre des Champs-Élysées :

G. Verdi : *Falstaff* (1893)

(26/10/9/6//4/3/2/2//4/3/3/1//1/2//0/4/16) : **115 dB**

Bournemouth Symphony Orchestra, Richard Armstrong

Opéra Palais Garnier :

F. Mendelssohn : *Le songe d'une nuit d'été* (ballet)

(24/9/8/6//2/2/2/2//2/2/3/1//1/0//0/0/0) : **112 dB**

Orchestre National de l'Opéra de Paris, Ballet de l'Opéra Palais Garnier, John Neumeier

W. A. Mozart : *La Betulia Liberata*

(14/4/3/2//2/2/2/2//2/2/0/0//1/0//0/4/30) : **112 dB**

La Grande Ecurie et la Chambre du Roy, J.-C. Malgoire

Auditorium du Louvre :

Beethoven (Variations), Schumann (*Phantasiestücke*), Bloch (*Shelomo*), Martinu (Sonate)

(1 Vc, 1 piano) : **102 dB**

Steven Isserlis, violoncelle; Pascal Devoyon, piano

J.J. Rousseau : *Pygmalion*

(5/1/1/1//0/2/0/0//1/0/0/0//0/0//0/1/0) : **99 dB**

4. Pour le calcul de la force sonore totale, une addition linéaire a été effectuée, équivalente à supposer que pour la force sonore totale tous les instruments jouent en même temps.

- A. Benda : *Médée*, Mélodrame
(12/3/3/2//2/2/0/2//1/1/0/0//1/0//0/1/0) : **108 dB**
Ensemble Mosaïques, Christophe Coin
- Teatro della Scala Milano :**
G. Verdi : *Attila* (1846)
(26/10/9/6//3/3/2/2//4/2/1/0//1/1//0/4/60) : **115 dB**
L'Orchestra del Teatro della Scala, Riccardo Muti
- Auditorium du Musée d'Orsay :**
H. Wolf : *Sérénade* pour Quatuor à cordes
(2/1/1) : **95 dB**
J. Brahms : Quintette op. en fa mineur, version pour quintette à cordes
(2/1/2) : **96 dB**
R. Schumann : *Carnaval*
(1 piano) : **102 dB**
J. Brahms : Quintette op. en fa mineur, piano et quatuor à cordes
(2/1/1//1 piano) : **100 dB**
Michael Levinas, piano; Quatuor Ravel
- Salle Pleyel :**
Dutilleul : Symphonie N° 2
(26/10/9/7//3/3/3/3//2/3/3/1//1/3//0/0/0) : **113 dB**
L. v. Beethoven : Symphonie N° 3 Eroïca
(32/12/10/8//2/2/2/2//3/2/0/0//1/0//0/0/0) : **112 dB**
G. Rossini : Ouverture
(32/12/10/8//3/3/3/2//3/2/0/0//1/0//0/0/0) : **112 dB**
W. A. Mozart : Concerto pour piano et Orchestre en do mineur KV 491
(20/8/7/5//1/2/2/2//2/2/0/0//1/0//1/0/0) : **111 dB**
S. Prokofiev : *Cinderella*, Suite
(34/12/10/9//3/3/3/3//4/3/3/1//1/3//0/0/0) : **114 dB**
Orchestre de Paris, Semyon Bychkov
- Musikvereinssaal Wien :**
J. S. Bach : *Weihnachtsoratorium*
(8/3/2/2//0/2/0/2//0/2/0/0//1/0//0/4/16) : **109 dB**
Kammerorchester C. P. E. Bach, Peter Schreier
L. v. Beethoven : Concerto N° 3 en do mineur pour piano et orchestre
(26/10/8/6//2/2/2/2//2/2/0/0//1/0//1/0/0) : **111 dB**
L. v. Beethoven : Symphonie N° 6 (*Pastorale*)
(32/12/11/10//3/2/2/2//3/2/3/0//1/0//0/0/0) : **113 dB**
Wiener Philharmoniker, Daniel Barenboïm
- Grande Salle de la Villette, Paris :**
W. A. Mozart : Symphonie N° 39
(12/4/3/2//1/0/2/2//2/2/0/0//1/0//0/0/0) : **110 dB**
Orchestre du Conservatoire Nationale Supérieur de Paris, Scott Sandmeier
F. Poulenc : trio à cuivres
(0/0/0/0//0/0/0/0//1/1/1/0//0/0/0/0/0) : **106 dB**
C. Debussy : *Etudes* pour piano seul
(0/0/0/0//0/0/0/0//0/0/0/0//0/0//1/0/0) : **102 dB**
B. Bartók : *Sonate* pour deux pianos et percussions
(0/0/0/0//0/0/0/0//0/0/0/0//0/2//2/0/0) : **107 dB**
Solistes de l'Ensemble InterContemporain
M. A. Charpentier : *Te Deum*
(0/4/4/1//2/2/0/2//0/2/0/0//1/0//0/2/24) : **109 dB**
Les Arts Florissants, William Christie
E. Varèse : *Intégrales*
(0/0/0/0//4/1/2/0//1/2/3/0//0/4//0/0/0) : **111 dB**
E. Varèse : *Offrandes*
(2/1/1/1//2/1/1/1//1/1/1/0//0/5//0/0/0) : **110 dB**
I. Stravinski : *Histoire d'un soldat*
(2/1/1/1//2/1/0/2//1/1/1/0//0/1//0/0/0) : **108 dB**
Ensemble InterContemporain, Pierre Boulez

Chapitre 5

Les différentes influences sur les réponses aux questionnaires

Les différentes études décrites et discutées dans le chapitre 2, sur l'étude bibliographique, et le chapitre 3, sur les travaux antérieurs de l'équipe d'acoustique des salles de l'Ircam, ont montré que :

- la méthodologie du test ainsi que la méthode d'analyse des résultats peuvent fortement influencer l'interprétation des résultats ;
- avec les méthodes traditionnelles de méthodologie comme d'analyse, le nombre de facteurs indépendants révélés par un seul test est limité à trois ou quatre au maximum ;
- ce nombre de trois à quatre facteurs (résultats des tests isolés en laboratoire) est en contradiction avec les listes de facteurs établies à partir des écoutes en situations de concert ; mais les méthodes d'analyse employées pour ces études manquent pour la plupart de rigueur scientifique (cf. [Ber62] ou la discussion de [HD71] dans [LT83]). De nombreux articles de "review", comme [Ber92], [Gri93], [Bar93], énoncent également un nombre supérieur de facteurs ;
- avec une méthodologie adaptée, il est possible de dépasser ces limites en utilisant une série de tests composée de plusieurs sous-tests. Cette série de tests, effectuée à l'Ircam ([Lav89], [Jul92]), confirme que le nombre de facteurs indépendants de la qualité acoustique est bien supérieur à trois ou quatre, le nombre de facteurs perceptifs finalement retenus étant de 9 ;
- les tests en laboratoire ne parviennent pas à établir l'importance respective des différents facteurs, leurs résultats étant extrêmement dépendants de la mise en œuvre du test : signal sonore utilisé (y compris la méthode d'enregistrement), diffusion, type de question utilisé.

Les résultats obtenus en situations réelles, à l'aide des questionnaires remplis pendant le déroulement d'un concert par des sujets avertis, sont donc d'une importance primordiale. Outre qu'ils fournissent des résultats valables en eux-mêmes, les tests en situation réelle peuvent apporter des informations sur l'importance relative des facteurs indépendants trouvés par des tests en laboratoire.

5.1 Conditions pour un test "idéal"

Les tests en situation réelle soulèvent des problématiques bien spécifiques en raison de contraintes pratiques : contrairement aux tests en laboratoire, les conditions ne sont plus contrô-

lables dans le détail et les différents paramètres ne peuvent plus être maniés indépendamment.¹
Commençons en évoquant les caractéristiques d'un test "idéal" hypothétique :

sujets : afin de garantir une bonne statistique, un nombre élevé de sujets, expérimentés et entraînés préalablement, est requis. (environ 15 à 20 ; si l'on veut étudier l'appartenance des sujets à différentes classes, un nombre d'environ 50 serait plus adapté) Il est préférable que chaque sujet écoute plusieurs fois à la même place et, mieux encore, plusieurs fois le même stimulus (c.-à-d. la même œuvre ou suite d'œuvres) à la même place. On peut ainsi calculer la constance des réponses des sujets et calculer un écart-type par sujet, pour un stimulus constant ;

intégralité de la matrice : chaque sujet écoute la totalité des stimuli, c.-à-d. la totalité des œuvres sur la totalité des places et des salles testées. Ceci permet de calculer des intervalles de confiance et des variances pour chaque variable du test (sujets, salle, places et œuvres) par des formules simples ;

constance d'œuvres : pour présenter un stimulus constant, les mêmes œuvres (ou extraits d'œuvres) sont jouées dans chaque salle ;²

nombre d'œuvres : la qualité acoustique d'une salle, ou d'une place à l'intérieur d'une salle, dépend très fortement de l'œuvre jouée. Si on limite le nombre d'œuvres (donc le nombre de stimuli différents), on ne testera plus la qualité acoustique d'une salle, mais l'adaptation de l'acoustique à l'œuvre ou au type d'œuvre écoutée. On verra plus loin à quel degré une œuvre spécifique peut changer la perception de la qualité acoustique d'un champ sonore, dans le sens neutre des facteurs perceptifs comme dans le sens de la préférence subjective. Il est alors primordial d'inclure un nombre élevé d'œuvres couvrant le répertoire habituel.

Par contre, une étude approfondie sur les effets des œuvres est intéressante en soi, afin de prédire l'effet d'une œuvre sur la perception de la qualité acoustique d'une salle : on pourrait ainsi choisir la programmation des œuvres afin d'optimiser l'utilisation d'une salle et de sa qualité acoustique.

laps de temps entre les tests : des comparaisons instantanées sont impossibles par la nature même de ce type de tests. On pourrait par contre égaliser le laps de temps entre les tests, sinon les rapprocher. Reste à savoir si le temps écoulé entre les tests de différentes places à l'intérieur d'une salle et le temps entre les tests dans différentes salles doivent être semblables. Habituellement, le premier est nettement plus court que le second.

Il paraît évident que ce test "idéal" est et restera impossible à réaliser. Si l'on se limitait à dix sujets, dix places par salle (c.-à-d. nombre de sujets égal au nombre de places par salle), dix salles et quatre œuvres (de types très différents, mais dans un seul concert), le test nécessiterait cent concerts (de préférence à intervalles réguliers) et monopoliserait non seulement les dix sujets, mais tout un orchestre, avec pour impératif qu'aucun changement parmi les sujets ne puisse se produire. Même en réduisant à cinq salles et cinq places par salle, le nombre de concerts est de 25. On devine aisément que, même si l'on suivait un orchestre en tournée (à condition que le programme des concerts reste inchangé), on serait toujours loin de ces conditions de test idéales évoquées ci-dessus.

1. On s'attend surtout à ce que des corrélations (parfois très fortes) entre les différents critères objectifs apparaissent dans les salles réelles.

2. Même en suivant cette méthodologie rigoureuse, des questions théoriques se posent sur la reproductibilité du stimulus. L'équipe de Berlin a effectué une étude systématique de la reproductibilité de l'interprétation d'un orchestre et a trouvé une très bonne constance (cf. chapitre 2.8, [WK78]), mais pour des répétitions à court terme et dans une même salle. Cette constance risque de diminuer fortement lorsqu'il s'agit de concerts à plusieurs journées d'intervalle, et surtout quand il s'agit d'interpréter la même œuvre dans des salles différentes : l'orchestre adaptera son jeu à des salles différentes et donc à des situations acoustiques différentes. De plus, on peut se demander si une bonne salle ne permettrait pas une adaptation plus facile du jeu orchestral à la nouvelle donne acoustique. Il reste qu'une salle dans laquelle jouerait un orchestre très familiarisé au lieu obtiendrait plus facilement la faveur des auditeurs.

Dans ce document, le but de la procédure employée pour l'analyse des tests décrits est de se rapprocher le plus possible des résultats que l'on obtiendrait avec la procédure du test idéal. Il ne s'agit pas de s'en rapprocher de fait, mais d'adapter les analyses afin d'obtenir des *résultats* équivalents à ceux que l'on pourrait espérer avec un test idéal.

5.2 Considérations théoriques

Bien évidemment, les conditions de notre test étaient loin des conditions idéales. Dans chaque situation, les sujets et leur nombre ont varié. Néanmoins, un noyau relativement stable de dix personnes s'est formé (cf. le chapitre 4.5). Dans chaque salle, le nombre de sujets a été d'environ 8 à 10, dont la majorité provenait de ce noyau stable. Chacun de ces dix sujets "privilegiés" a participé à au moins cinq tests sur les dix effectués. Pour chaque salle, au moins deux concerts ont été écoutés. Dans les salles qui le permettaient, l'orchestre résident a été écouté (c.-à-d. l'orchestre du Concertgebouw au Concertgebouw Amsterdam, l'orchestre Philharmonique de Berlin à la Philharmonie de Berlin, l'orchestre de la Scala à la Scala de Milan, l'orchestre Philharmonique de Vienne au Musikvereinsaal, l'orchestre de Paris à la Salle Pleyel et l'orchestre de l'opéra de Paris à l'Opéra Palais Garnier). A Berlin, Milan, Vienne et au Théâtre des Champs-Élysées, des concerts doublés, c.-à-d. deux concerts avec un programme identique, ont été écoutés.

Par salle, entre six et douze places ont été testées. Se déplaçant à chaque entracte, chaque sujet écoutait donc au moins quatre places différentes — mais généralement avec des œuvres différentes.

De plus, les œuvres variaient entre les différentes salles testées — la seule contrainte ayant été que le programme soit constitué d'œuvres typiques, tenant compte de la salle et de son utilisation habituelle. Enfin, les laps de temps écoulés entre les tests étaient très variables : pour une même salle, le changement de place avait lieu à l'entracte ou entre deux concerts rapprochés (habituellement le lendemain ou le surlendemain) ; l'intervalle entre les tests des différentes salles allait de quelques semaines à quelques mois.

Chaque questionnaire, rempli par un sujet s_j pour une œuvre o_m donnée et une place p_k donnée (dans une salle donnée), contient les réponses aux différentes questions q_i .

On note alors que, pour chaque question q_i ,³ la réponse est une fonction compliquée des variables *sujet*, *œuvre* et *place* :

$$q = \mathcal{FUN}(s_j, o_m, p_k). \quad (5.1)$$

Ce qui nous intéresse finalement, c'est la dépendance des réponses q_i à l'acoustique :

$$q = \mathcal{F}(p_k), \quad (5.2)$$

où l'acoustique à une place donnée doit encore être exprimée sous forme d'un jeu de critères objectifs c^l , $q = \mathcal{F}(p_k) \approx q = \mathcal{F}'(c_k^l)$. On s'intéressera aussi à la dépendance des réponses à d'autres facteurs :

$$q = \mathcal{G}(o_m) \quad (5.3)$$

et

$$q = \mathcal{H}(s_j). \quad (5.4)$$

Chaque fois, le but est de s'affranchir le plus possible des influences autres que celle que l'on étudie. Une première approche consisterait à factoriser l'équation 5.1 :

3. Dans toutes les équations suivantes, l'indice i n'apparaît ni à gauche ni à droite de l'équation afin de garantir une meilleure lisibilité des formules mathématiques. Il va de soi qu'il existe une relation indépendante pour chaque question q_i . Aussi, la question sera toujours notée q_i , sans donner les dépendances, c.-à-d. $q_i(s, o, p)$ ou, pour être plus exact, $q_i(s, o, p, r)$, où r désignerait toute influence supplémentaire non contenue dans les termes relatifs au sujet s , à l'œuvre o ou à l'acoustique p .

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_k). \quad (5.5)$$

Le signe + suppose la linéarité des relations individuelles ; la factorisation suppose qu'il n'y a pas d'interdépendance entre les influences acoustique, œuvre et sujet. Mais ceci voudrait dire que l'effet de l'œuvre est une constante, indépendante de l'acoustique et de la place testée.

La condition de linéarité est encore à peu près satisfaite, bine que les notions de seuil (comme pour la présence et la précision d'écoute) ou de saturation ne respectent pas la linéarité.⁴ Par contre, l'indépendance des influences ne l'est pas du tout : pour ne donner qu'un exemple extrême, prenons la différence entre un instrument omnidirectionnel (un orchestre symphonique peut être considéré comme étant assez omnidirectionnel, cf. chapitre sur l'optimisation des directions de l'enceinte de mesure) et un instrument directif, comme le piano. Dans une salle comme la Philharmonie de Berlin où le public entoure les musiciens sur scène, la directivité de l'instrument aura des effets très différents sur les places devant l'orchestre, sur les côtés ou sur l'arrière.

Prenant en compte toute influence possible, l'équation 5.5 peut être réécrite comme

$$q = \mathcal{H}(s_{j,m,k}) + \mathcal{G}(o_{m,j,k}) + \mathcal{F}(p_{k,j,m}), \quad (5.6)$$

ou, en redistribuant les influences

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_{m,j}) + \mathcal{F}(p_{k,j,m}). \quad (5.7)$$

Ici, la fonction \mathcal{H} ne contient que l'influence moyenne (un biais global) de chaque sujet s_j , la fonction \mathcal{G} l'influence moyenne de chaque œuvre o_m , mais différenciée pour chaque sujet s_j , et la fonction \mathcal{F} contient, outre la description de la qualité acoustique, p_k — avec une description en termes de critères objectifs mesurables, c_k^l —, l'influence individuelle de l'œuvre o_m sur chaque place (résidu de la fonction \mathcal{G}), spécifique pour chaque sujet. Le dernier point soulève une question : l'interaction œuvre/place, c.-à-d. l'influence individuelle de l'œuvre o_m sur chaque place, doit-elle faire partie de la fonction \mathcal{F} , plus spécifiquement liée à la place, donc à l'acoustique, ou, au contraire, doit-elle être imputée dans la fonction \mathcal{G} , plus spécifiquement liée à l'œuvre ? Pour l'instant on laissera la question ouverte.

On note alors qu'il y a deux versions *équivalentes* de l'équation 5.7 — ainsi que des formules suivantes —, dépendantes si on impute les termes à influence double (k, m) , à la fonction \mathcal{F} ou à la fonction \mathcal{G} :

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_{m,j}) + \mathcal{F}(p_{k,j,m}), \quad (5.8)$$

ou

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_{k,m,j}) + \mathcal{F}(p_{k,j}). \quad (5.9)$$

Rappelons que les équations 5.8 et 5.9 sont encore aussi complètes que l'équation 5.1.

5.3 Approximations

Avec les données disponibles, il est quasiment impossible d'obtenir — et d'estimer quantitativement — l'influence moyenne de chaque œuvre différenciée *par sujet* ou, plus encore, l'influence individuelle de l'œuvre o_m sur chaque place perçu par *chaque sujet*. Chaque sujet n'écoutait chaque œuvre qu'une ou deux fois, avec un changement de place entre les deux.⁵ Il est alors presque impossible de démêler les appréciations *individuelles* dues aux changements d'œuvre et de place. On est amené à simplifier l'équation 5.7 (ou l'équation 5.9, en fonction de l'imputation de l'interaction œuvre/place), et on écrira :

4. Cf. aussi le chapitre?? sur la nature de l'échelle du questionnaire

5. Chaque changement d'œuvre a été accompagné par un changement de place, sauf dans les cas exceptionnels où deux œuvres différentes ont été jouées dans une même partie de concert.

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_{k,m}). \quad (5.10)$$

La fonction \mathcal{G} ne décrit plus que l'influence moyenne de l'œuvre, moyennée sur toutes les places et tous les sujets; dans la fonction \mathcal{F} , la dépendance de l'œuvre o_m contiendra aussi l'influence spécifique des sujets ayant écouté l'œuvre o_m à la place p_k (car il ne s'agit que d'un à deux sujets).

Il convient de discuter un peu plus en détail la signification de la simplification effectuée dans l'équation 5.10. L'équation 5.7 tentait encore de décrire *exactement* les réponses au questionnaire. Mais, sachant que chaque réponse est affectée par une certaine incertitude — un certain niveau de bruit — le but est, non pas de prédire les réponses des sujets (avec leur bruit), mais de prédire la moyenne d'un ensemble hypothétique infini.⁶ La simplification ajoute du bruit — au bruit déjà contenu dans les données. Et la question demeure de savoir si la réaction individuelle d'un sujet à l'influence d'une œuvre, ou d'une œuvre sur une place spécifique, doit être considérée comme bruit ou comme structure inhérente. Si on la considère comme structure, la simplification de l'équation 5.10 ajoute du bruit; le bruit mesuré devient la somme du bruit inhérent dans les réponses des sujets et de la structure ainsi négligée. Sinon, l'équation 5.10 permet justement de diminuer et de s'affranchir le plus possible du bruit introduit par les sujets — en ne considérant plus la réponse *d'un sujet* à une question, mais une “réponse moyenne” pour un ensemble de sujets, pour une œuvre et/ou une place donnés. Pour être plus rigoureuse, on peut réécrire l'équation 5.7 en ajoutant le terme \mathcal{R} incluant le bruit (\mathcal{R} pour résidu ou résiduel), et, comme pour les équations 5.8 et 5.9, on donnera les deux versions, intégrant l'interaction œuvre/place soit dans la fonction \mathcal{F} , soit dans la fonction \mathcal{G} :

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_{k,m}) + \mathcal{R}, \quad (5.11)$$

ou

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_{m,k}) + \mathcal{F}(p_k) + \mathcal{R}. \quad (5.12)$$

Afin d'étudier séparément les différentes influences sur les réponses aux questionnaires, il s'avère encore plus utile de *séparer* totalement les différentes influences et d'introduire un terme supplémentaire, $\mathcal{I}(i_{m,k})$, décrivant spécifiquement l'interaction œuvre/place. L'équation finale s'écrit alors :

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}. \quad (5.13)$$

L'équation 5.13 est la base des développements suivants, et l'on se souviendra qu'elle contient une partie de bruit. Plusieurs questions persistent :

- peut-on mesurer ce bruit — et peut-on calculer des intervalles de confiance, même dans un cas éloigné de celui du cas idéal décrit ci-dessus?
- quelle est l'importance respective de chaque influence, y a-t-il des influences négligeables?
- comment peut-on séparer les différentes influences afin d'étudier chaque partie isolément?

Les paragraphes suivants approfondissent ces questions, en essayant d'apporter au moins des réponses préliminaires.

6. Savoir à partir de quel moment on commence à prédire le bruit des données, plutôt que de révéler plus de détails sur la structure sous-jacente, est une question primordiale en statistique appliquée. On parle de “overfitting” et de nombreux procédures de choix ont été proposés pour des analyses statistiques “classiques” comme pour les réseaux neuroniques, cf. [WC89] ou [WG93].

5.4 Elimination du terme $\mathcal{H}(s_j)$

Dans l'équation 5.10, le terme $\mathcal{H}(s_j)$ ne présente qu'un biais global de chaque sujet, pour chaque question. Il traduit le fait que chaque sujet, pour chaque question, répond à partir d'une échelle de valeurs qui lui est personnelle. Il ne s'agit donc que d'un "offset" linéaire de chaque sujet pour chaque question q_i .

Peut-on, et ne faudrait-il pas, enlever ce biais personnel? Car, ce qui nous intéresse finalement, c'est comment les sujets interprètent les *différences* de la qualité acoustique, et non pas où est située leur échelle de valeur personnelle. Même en ce qui concerne la préférence subjective, les sujets sont plus ou moins sévères: il y a ceux pour lesquels une acoustique "bonne" indique qu'ils sont déjà très satisfaits, et ceux pour qui l'adjectif "bonne" signifie "pas très bonne". Il est donc préférable de travailler avec des valeurs *relatives* plutôt qu'*absolues*.

Dans notre cas, l'élimination du biais personnel devient primordiale: chaque place étant écoutée par un sous-ensemble de sujets différent, on ne peut plus comparer les moyennes des places sans prendre en compte les biais des sujets — ou, plus exactement, la moyenne des biais des sujets ayant écouté une place spécifique.

Comment retirer le terme $\mathcal{H}(s_j)$? Revenons à notre test idéal hypothétique, où tous les sujets écoutent à toutes les places. Dans ce cas, le biais est égal à la moyenne de chaque sujet par question, moins la moyenne de tous les questionnaires:

$$\mathcal{H}(s_j) = \bar{q}_j - \bar{q}. \quad (5.14)$$

Dans notre cas, la situation est plus complexe, car la moyenne de tous les questionnaires d'un sujet peut être influencée autant par le biais global du sujet que par le sous-ensemble particulier de places que ce sujet a occupé. Il ne faut plus comparer la moyenne de tous les questionnaires du sujet par rapport à celle de tous les questionnaires, mais par rapport à la moyenne de tous les questionnaires de tous les sujets pour *les places spécifiques que le sujet a occupé*. L'équation devient alors:⁷

$$\mathcal{H}(s_j) = \bar{q}_j - \overline{q_{k \in \{k_j\}}}, \quad (5.15)$$

où $\{k_j\}$ désigne le sous-ensemble de places écoutées par le sujet s_j .

Il existe une autre différence entre le cas idéal, où chaque sujet écoute à toutes les places, et notre cas réel où chaque sujet n'écoute qu'un sous-ensemble de places: chaque place n'a été occupée que par un sous-ensemble de sujets. Dans le cas idéal, le biais des sujets n'influence pas la moyenne à la droite de l'équation 5.15, la moyenne des biais par place étant toujours égale à 0. Dans notre cas, où chaque place a été écoutée par très peu de sujets (habituellement quatre sujets par place, mais souvent un seul sujet par place pour une œuvre spécifique), il faut enlever les biais $\mathcal{H}(s_j)$ des sujets ayant occupé ces places:⁸

$$\mathcal{H}(s_{j_i}) = \bar{q}_{j_i} - \overline{(q_{j_i} - \mathcal{H}(s_{j_i}))_{k \in \{k_{j_i}\}}}, \quad (5.16)$$

où i est l'indice courant pour tous les sujets et l le sujet spécifique $j_i := j_l$. Comme l'équation 5.16 contient aussi des termes en $j_i := j_l$, elle devient circulaire et doit être résolue par un processus d'itération. L'équation circulaire finale s'écrit:

$$\mathcal{H}^{n+1}(s_{j_i}) = \bar{q}_{j_i} - \overline{(q_{j_i} - \mathcal{H}^n(s_{j_i}))_{k \in \{k_{j_i}\}}}. \quad (5.17)$$

La plupart du temps, la convergence étant rapide, le processus peut être arrêté après quelques itérations. Aucun cas de divergence n'a été rencontré dans l'analyse des données incluses dans ce document.⁹ Mais plusieurs cas de convergences très lentes ont été rencontrés, avec des résultats

7. L'équation suppose encore que le sujet ait écouté toutes les œuvres o_m , au moins pour une salle considérée. Sans cette hypothèse, les équations deviennent très embrouillées et compliquent énormément l'analyse, sans apporter beaucoup d'information supplémentaire.

8. Notamment parce que l'influence du sujet s_j même sur cette moyenne n'est pas négligeable.

9. En principe, rien n'assure la convergence de la formule 5.17 et le processus peut diverger, soit pour toute une matrice, soit pour une question spécifique.

finals parfois très éloignés des données brutes. Chaque fois, cela indiquait un très fort niveau de bruit — bruit ajouté par, soit un nombre élevé de sujets non-expérimentés,¹⁰ soit une très forte variabilité des œuvres écoutées. La convergence rapide du processus d'itération peut donc servir d'indicateur de la fiabilité des valeurs finales.

5.4.1 Imputation de $\mathcal{H}(s_j)$ dans le terme $q_i(k)$

Dans le paragraphe précédent, la discussion a mis en évidence un autre problème: dans notre cas, où chaque place n'a été occupée que par un sous-ensemble de sujets, le terme p_k (ou $p_{k,m}$), dans l'équation 5.10, n'est pas égal à la moyenne des données brutes observées pour cette place, mais à la moyenne des données brutes moins la moyenne des biais des sujets ayant occupé cette place. En inversant les deux côtés de l'équation 5.10, on peut formuler les relations suivantes :

$$\mathcal{F}(p_{k,m}) = \overline{q_{k,m}} - \mathcal{G}(o_m) - \overline{\mathcal{H}(s_j)_{j \in \{j_{k,m}\}}}, \quad (5.18)$$

$$\mathcal{F}(p_k) = \overline{q_k} - \overline{\mathcal{G}(o_m)_{m \in \{m_k\}}} - \overline{\mathcal{H}(s_j)_{j \in \{j_k\}}}, \quad (5.19)$$

Sachant que pour la plupart des tests, le nombre de sujets ayant écouté une place ($j \in \{j_k\}$) est inférieur ou égal à quatre, et le nombre de sujets ayant écouté une place pour une œuvre spécifique ($j \in \{j_{k,m}\}$) est habituellement compris entre un et deux, la moyenne des \mathcal{H} , à droite des équations 5.18 et 5.19, peut être significativement différente de zéro. Comme on n'est pas (ou peu) intéressé par les biais individuels des sujets (ces biais peuvent être calculés à partir de l'équation 5.17), il convient de procéder à une transformation des réponses aux questionnaires q_i pour un jeu de nouvelles réponses corrigées q'_i , intégrant les biais individuels:¹¹

$$q_i(j, k, m) \implies q'_i(k, m) = q_i(j, k, m) - \mathcal{H}_i(s_j), \quad (5.20)$$

ou, en notation abrégée,

$$q_i \implies q'_i = q_i - \mathcal{H}_i(s_j). \quad (5.21)$$

On soulignera que les q'_i ne dépendent plus des sujets j . En redéfinissant $q_i := q'_i$, c.-à-d. en remplaçant q_i par q'_i l'équation 5.13 peut être réécrite :

$$q = \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R} \quad (5.22)$$

ou, en enlevant le terme du bruit résiduel, \mathcal{R} :

$$q = \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{m,k}). \quad (5.23)$$

Ainsi, la signification du terme résiduel \mathcal{R} intégrant le bruit se comprend davantage: l'équation 5.22 peut être considérée comme une relation mathématiquement exacte, le terme $\mathcal{R} = \mathcal{R}(j, k, m)$ incluant toute influence non contenue dans les fonctions \mathcal{F} , \mathcal{G} et \mathcal{I} . L'équation 5.23 doit être considérée comme relation *statistique*, mais rigoureusement correcte uniquement pour des moyennes d'échantillons suffisamment grands.¹² Mais l'équation 5.22 peut également être interprétée comme relation statistique: dans ce cas, la fonction \mathcal{R} fournit les informations sur les distributions statistiques (distribution gaussienne ou autre, écart-types) en fonction des variables places et œuvres.

10. Ceci a été l'une des raisons principales pour lesquelles la plupart des analyses ont été concentrées sur le noyau stable des dix sujets ayant participé à des tests dans plusieurs salles, cf. le chapitre 5.1 précédent et le chapitre 5.6.1 sur les intervalles de confiance.

11. Dans l'équation suivante, l'indice i des questions q_i est spécifié, soulignant que la transformation doit être effectuée individuellement *par question*.

12. Il reste encore une différence entre la moyenne de l'échantillon testé et la "vra" moyenne qui reste inconnue. On essaie de trouver la relation 5.22 ou 5.23 pour l'ensemble infini de tous les sujets possibles à partir des données recueillies pour notre échantillon de sujets.

5.4.2 Discussion sur le processus d'itération

Pour la plus grande partie qui suivra dans notre document on utilisera les nouvelles données $q_i := q'_i$, les biais individuels des sujets ayant été enlevés. Ceci signifie donc que les analyses sont basées sur les *différences* entre les jugements des sujets dans différentes situations plutôt que sur des jugements directs. En termes mathématiques, on dira que l'on ne considère que les différences entre (p_k, o_m) et $(p_{k'}, o_{m'})$, ou encore, que l'on travaille sur des matrices *centrées*.

Nous avons aussi pu observer, dans des études antérieures, que le fait de retirer ou non le biais individuel des sujets (c.-à-d. de travailler sur des matrices centrées ou non-centrées) a tendance à influencer la cohérence des jugements observés. Wilkens ([Wil75], [WP75]) et le groupe de Berlin ont observé une grande stabilité des facteurs perceptifs parmi leurs sujets (tout en observant des différences individuelles prononcées pour la préférence subjective). Ils ont travaillé sur des matrices centrées, en partant d'une matrice complète (matrice intégrale sans valeurs manquantes, cf. la discussion du test idéal) et en utilisant une analyse factorielle. Le groupe de Dresde ([RL81], [AA73]), dans une étude utilisant des questionnaires dans des salles, a trouvé une variabilité inter-individuelle non négligeable également pour les réponses aux questions portant sur les facteurs perceptifs. Leur étude ne prenaient pas en compte les biais individuels des sujets et la variabilité observée est en fait une variabilité des réponses absolues.

Le paragraphe 5.5.2 de ce chapitre montrera que le processus de normalisation des réponses des sujets est primordial si l'on veut réduire la variabilité inter-individuelle, donc le niveau de bruit apparent dans les réponses aux questionnaires.

On peut se demander s'il faudrait aussi *normaliser* les matrices, c.-à-d. imposer non seulement une moyenne de zéro mais aussi une variance de 1, identique pour chaque sujet (ou, encore, une variance pondérée par le sous-échantillon des places occupées par le sujet). Nous avons décidé de conserver les variances des sujets : premièrement, parce qu'une grande variance d'un sujet sur une question spécifique peut indiquer que ce sujet est particulièrement sensible à des variations influençant ce facteur perceptif.¹³ Deuxièmement, en normalisant les variances, on risque de créer des instabilités dans le processus d'itération quand on rencontre une variance très faible (voire inexistante) pour les réponses d'un sujet sur une question spécifique.

On se demandera également si ce procédé de normalisation par itération doit être effectué pour la totalité des places dans la totalité des salles, ou indépendamment par salle. Des arguments existent défendant les deux possibilités. Finalement, nous avons décidé d'effectuer la normalisation indépendamment *par salle*, qui reflète mieux le déroulement pratique des tests : pour les déplacements à l'intérieur d'une même salle, les intervalles entre les tests étaient très courts (changement à l'entracte ou le lendemain) et les sujets répondaient par rapport à la place précédente occupée. En revanche, les intervalles entre plusieurs tests étaient plutôt de l'ordre d'un à quelques mois et les sujets répondaient plutôt en absolu ; on peut alors supposer que la stabilité du groupe dans sa totalité est plus grande que la stabilité de chaque sujet individuellement. Le tableau 5.1 suivant donne les $\mathcal{H}(s_j)$ *par salle* et par sujet, pour les sujets appartenant au noyau stable des tests d'écoute de la campagne européenne. Nous prendrons comme exemple la question sur la puissance sonore.

On observe dans ce tableau que :

- des sujets avec un biais individuel positif ou négatif, de manière cohérente pour toutes les salles ;
- une variation par salle et/ou par *type* de salle se superpose à ce biais individuel “général” — reflétant le déroulement pratique des tests, ainsi que la possibilité d'une appréciation individuelle de différents types d'œuvres (musique symphonique, opéra, musique de chambre) par les sujets.

Il a donc été décidé d'effectuer le processus de normalisation séparément *par salle*.

13. La théorie des facteurs perceptifs repose justement sur le fait que la structuration de la perception est identique pour tout le monde, mais le poids attribué à chaque facteur peut varier selon les individus. Le programme INDSCAL utilisé à l'Ircam pour les tests en laboratoire [Lav89] reflète bien cette structuration.

salle :	A	B	C	G	L	M	O	P	V
AB	-0.31	0.40	-0.03	0.44		0.01	-1.16	0.54	0.08
AD	-0.52		0.20	0.68	0.34	0.39	0.08	-0.10	
DOM		-1.07	-1.00	-0.56		-0.43	-0.02	-0.30	-0.59
EK	-0.67	0.2	0.03	-0.24	-0.16	0.01	-0.18	-0.32	-0.13
GB	0.65	0.68	0.54	-0.19		0.2	0.20	0.40	0.46
JPJ	0.18	-0.04	-0.03	-0.32	0.24	-0.05	-0.82	-0.36	-0.06
OW		0.07	0.43	0.06	0.45	0.34	0.65	0.37	0.75
PD	0.97			-0.27	-0.30			-0.35	
RD	-0.29	-0.01	0.13	0.13	0.10	-0.08	0.97	0.13	-0.17
SW		-0.23	-0.31		-0.75	-0.39			

TAB. 5.1 - *Biais individuels (en unités perceptives), par sujet et par salle, pour la question de la puissance sonore subjective, pour les salles incluses dans la campagne européenne et les sujets appartenant au noyau stable.*

5.5 Séparation des différents paramètres

Revenons à l'équation 5.13 :

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}. \quad (5.24)$$

Est-il possible de séparer les contributions individuelles — et surtout de quantifier leur importance? Le terme $\mathcal{H}(s_j)$ a déjà été enlevé avec le processus d'itération, décrit dans les paragraphes précédents. Néanmoins, il est intéressant de comparer *quantitativement* son influence à celle des autres termes.

Dans le cadre des tests d'écoute perceptifs effectués dans la Salle de Concert à La Villette, il a été possible de mieux séparer et contrôler les différentes influences de l'*acoustique* (variation de la place à l'intérieur de la salle), de l'*œuvre* et des *sujets*. Pendant les quatre tests d'écoute, effectués entre avril et juin 1994, une dizaine des places a été testée en écoutant huit œuvres extrêmement variées (cf. la liste des œuvres dans le chapitre 4.6) dans des situations acoustiques semblables.¹⁴

Le premier test d'écoute effectué à la Villette présentait la possibilité de quantifier l'influence des sujets : l'orchestre du Conservatoire national supérieur de musique de Paris, dirigé par Scott Sandmeier, jouait cinq fois les deux premiers mouvements de la symphonie N° 39 de W.A. Mozart. 21 sujets participaient à ce test, dont 7 du “noyau stable” de la campagne européenne. Les sujets se déplaçaient après chaque répétition de l'extrait musical.

L'acoustique de la salle a été très légèrement modifiée pour les deux dernières écoutes, mais on a pu observer une différence significative seulement sur la question de la réverbérance. Par contre, pendant la troisième écoute, l'orchestre était dirigé par David Robertson (directeur musical de l'Ensemble InterContemporain), ce qui a conduit à des différences très significatives par rapport aux autres écoutes. On a donc décidé de supprimer cette écoute pour l'étude de l'importance respective des différentes influences sur les réponses aux questionnaires.¹⁵

14. Certaines variations de l'acoustique variable de cette salle, de l'emplacement exact de la scène, et l'ajout de panneaux réflecteurs suspendus ont eu lieu pendant le déroulement de cette série de tests d'écoute. Les différentes acoustiques peuvent néanmoins être considérées comme étant assez proches, surtout par rapport aux différences dues aux changements d'œuvres. De plus, l'importance des variations respectives peut être contrôlée sur des sous-ensembles de tests où soit l'acoustique, soit l'œuvre restaient inchangées.

15. Le fait même qu'un changement de chef d'orchestre peut conduire à des différences fortement significatives sur des questions portant sur la perception de l'acoustique *de la salle* donne un aperçu de la complexité des jugements demandés — et on peut, par réciprocité, imaginer l'influence de l'acoustique sur la perception de l'interprétation et de l'œuvre musicale.

5.5.1 Calcul des $\mathcal{H}(s_j)$

Les $\mathcal{H}(s_j)$ peuvent être calculés en utilisant la formule 5.17 du chapitre 5.4. Le tableau 5.2 suivant donne la moyenne absolue des biais individuels des sujets, $\mathcal{H}(s_j)$, pour les tests d'écoute de la campagne européenne ainsi que pour le premier test d'écoute à la Villette, séparément pour tous les sujets ayant participé à ce test et les sujets ayant aussi participé à la campagne des tests d'écoute dans les salles européennes.

$\mathcal{H}(s_j)$	puiss	dyn	rev	dim sub	env son	int	chal	vie
campagne	0.32	0.44	0.50	0.39	0.38	0.33	0.32	0.33
VIL1: tous sujets	0.40	0.43	0.59	0.26	0.23	0.21	0.27	0.27
VIL1: sujets "IRCAM"	0.44	0.59	0.64	0.16	0.38	0.20	0.29	0.29
$\mathcal{H}(s_j)$	brill	pat	lourd	ac	agr	dur	prec d'ec	contr
campagne	0.30	0.15	0.11	0.06	0.10	0.08	0.46	0.36
VIL1: tous sujets	0.30	0.15	0.13	0.08	0.12	0.09	0.47	0.27
VIL1: sujets "IRCAM"	0.35	0.10	0.21	0.06	0.05	0	0.43	0.25
$\mathcal{H}(s_j)$	rgrav	raig	pgrav	paig	IMGAL	bal gal	adapt	$\mathcal{H}_i(s_j)$
campagne	0.27	0.28	0.25	0.29	0.44	0.43	0.48	0.31
VIL1: tous sujets	0.42	0.36	0.33	0.21	0.28	0.27	0.24	0.28
VIL1: sujets "IRCAM"	0.39	0.32	0.23	0.20	0.29	0.27	0.24	0.28

TAB. 5.2 - Moyenne des $\mathcal{H}(s_j)$ (en absolu), par question. La première ligne ("campagne") correspond à la campagne européenne de tests d'écoute, les deux lignes suivantes au premier test d'écoute à la Villette, portant sur quatre répétitions d'un extrait musical identique. La deuxième ligne (VIL1: tous sujets) correspond aux 21 sujets ayant participé au test, la troisième (VIL1: sujets "IRCAM") aux 7 sujets ayant participé à la campagne de tests d'écoute dans les salles européennes.¹⁶

Premièrement, on note l'importance des biais individuels, qui atteignent, notamment pour les questions ayant une échelle de valeurs importante (cf. le tableau 4.4 dans le chapitre 4.4), une demi unité perceptive.

L'importance de ces valeurs est encore difficile à évaluer. A titre de comparaison, la figure 5.1 donne un histogramme des réponses sur la puissance sonore. L'histogramme peut être interprété comme une classification des places en différentes catégories, d'après les jugements recueillis pour chaque place. Les résultats suggèrent que l'on classe les différentes places testées, pour ce qui concerne leur puissance subjective, soit en *cinq* catégories (en réprenant les attributs proposés sur le questionnaire: faible, assez faible, assez forte, forte et très forte), soit, en faisant une distinction plus fine, en *neuf* catégories, comme sur la figure 5.1. Sur cette dernière, on remarque que les sujets avaient des difficultés pour utiliser la totalité de l'échelle proposée, particulièrement vers le bas. Les différences absolues restent donc assez faibles. Mais, en même temps, la fiabilité des réponses était telle que même des différences relativement petites ont été fortement significatives. Une demi unité perceptive correspond finalement (pour des réponses utilisant les données q' , donc avec les biais individuels enlevés) à des différences très perceptibles. La moyenne absolue des biais individuels étant de 0,31, et le maximum rencontré étant de 1,2, on s'aperçoit que des changements de catégorie (au moins pour la structuration fine) sont courants, soulignant l'importance de la correction des données brutes par l'enlèvement des biais individuels.

¹⁶ La notion d'une moyenne, comme donnée dans la dernière colonne du tableau, n'est pas rigoureuse, compte tenu de la variabilité de l'échelle proposée pour les différentes questions. La moyenne est donnée à titre indicatif afin de faciliter une vue directe d'ensemble, ainsi que pour faciliter la comparaison de l'importance respective des différentes influences. Cette moyenne doit être considérée comme ayant des unités arbitraires. Pour le cas des tests à la Villette, uniquement les réponses lors du *premier* tests sont considérées. Un nombre insuffisant de sujets appartenant au noyau stable de la campagne européenne a participé aux autres tests, rendant la comparaison des réponses des deux groupes "tous sujets" et "sujets IRCAM" impossible. Le tableau indique uniquement les $\mathcal{H}(s_j)$ pour les questions du questionnaire qui n'étaient pas changées entre les tests de la campagne et les tests à la Villette.

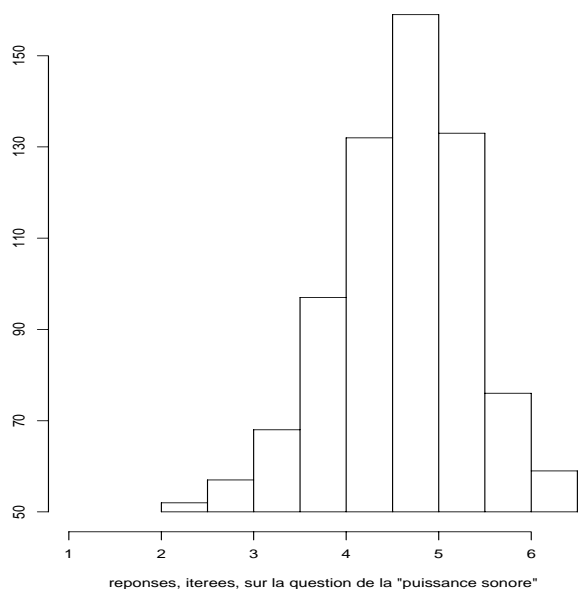


FIG. 5.1 - *Histogramme des réponses sur la question de “puissance sonore”, pour la totalité de 383 jugements recueillis lors de la campagne européenne. On remarque surtout que le bas de l’échelle (le point 1 de l’échelle correspond à une puissance subjective très faible) n’est pas utilisé par les sujets, le centre de la distribution se trouve entre le point 4 (“assez forte”) et 5 (“forte”), et non pas au milieu de l’échelle, entre 3 (“assez faible”) et 4 (“assez forte”).*

Deuxièmement, en ce qui concerne le biais individuels, on observe dans le tableau 5.2 qu’il n’y a pas de différences significatives entre les sujets IRCAM et les autres sujets, . On peut donc en conclure que le fait que chaque sujet ait une échelle (ou, plus précisément, un ancrage de l’échelle) qui lui est propre, ne dépend pas de l’expérience d’écoutes structurées. On verra plus loin que ceci n’est plus vrai en ce qui concerne la *discrimination* des situations acoustiques, donc la fiabilité des *différences* notées.

5.5.2 Vérification de l’efficacité du processus d’élimination du terme $\mathcal{H}(s_j)$; estimation du terme \mathcal{R}

Le premier test d’écoute dans la salle de concert à la Villette portait sur la répétition d’un même extrait musical (deux premiers mouvements de la symphonie N° 39 de W.A. Mozart).¹⁷ En étudiant chaque place isolément, les influences de l’acoustique ($\mathcal{F}(p_k)$), de l’œuvre ($\mathcal{G}(o_m)$) ainsi que de l’interaction acoustique/œuvre ($\mathcal{I}(i_{m,k})$) sont éliminées. Pour chaque place (et pour chaque question), l’*écart-type* (racine carrée de la variance) autour de la réponse moyenne pour la place a été calculé pour la totalité des 21 sujets ayant participé à ce test ainsi que pour les 7 sujets appartenant au noyau stable de la campagne européenne des tests d’écoute. L’écart-type a été calculé pour les *réponses brutes*, q_i , ainsi que pour les réponses avec le biais individuels enlevés, q'_i — ces dernières, que l’on appellera désormais *réponses itérées*, reflétant le processus d’itération nécessaire afin de résoudre l’équation 5.17. En effectuant une moyenne sur toutes les places, on peut donner l’importance quantitative du terme \mathcal{R} ainsi que de la somme des termes $\mathcal{H}(s_j)$ et \mathcal{R} . Les tableaux 5.3 et 5.4 suivants donnent l’écart-type (en unités

17. Un changement de chef d’orchestre, intervenu pour la troisième écoute, conduisait à des variations significatives dans les réponses. Les réponses à propos de cette écoute ne sont pas incluses dans l’analyse du terme \mathcal{R} .

perceptives), pour les réponses brutes ainsi que pour les données itérées. La diminution de la variance (en pourcentage) est également indiquée dans les tableaux suivants.¹⁸

tous sujets	puiss	rev	dim sub	env son	int	chal	vie	brill	pat	lourd
éc-type, $\mathcal{R} + \mathcal{H}(s_j)$	0.62	0.83	0.51	0.64	0.46	0.53	0.48	0.57	0.28	0.32
éc-type, \mathcal{R}	0.42	0.50	0.36	0.55	0.37	0.37	0.35	0.37	0.20	0.26
diminution	53%	64%	50%	27%	33%	50%	48%	56%	50%	30%
tous sujets	ac	agr	dur	heurte	pres	coher	dyn	larg	prec d'ec	contr
éc-type, $\mathcal{R} + \mathcal{H}(s_j)$	0.24	0.24	0.24	0.28	0.72	0.30	0.67	0.81	0.77	0.62
éc-type, \mathcal{R}	0.20	0.20	0.20	0.24	0.57	0.26	0.41	0.61	0.56	0.51
diminution	33%	33%	33%	25%	37%	22%	62%	43%	48%	32%
tous sujets	rgrav	raig	pgrav	paig	IMGAL	bal gal	adapt	appr	moyenne	
éc-type, $\mathcal{R} + \mathcal{H}(s_j)$	0.61	0.56	0.55	0.41	0.50	0.66	0.44	0.47	0.54	
éc-type, \mathcal{R}	0.30	0.32	0.26	0.33	0.37	0.55	0.28	0.24	0.39	
diminution	76%	68%	77%	35%	44%	30%	58%	73%	48%	

TAB. 5.3 - *Ecart-type (en unités perceptives) des réponses par question pour des places identiques, pour les 21 sujets ayant participé au premier test à la Vilette, portant sur quatre répétitions de deux mouvements de la symphonie N° 39 de Mozart. Première ligne : réponses brutes ; deuxième ligne : réponses itérées, c.-à-d. après enlèvement des biais individuels ; troisième ligne : diminution de la variance quadratique (en pourcentage).*

On s'aperçoit que la réduction de la variance, donc du bruit résiduel, due au processus d'itération, est considérable. En moyenne, la variance est diminuée environ de moitié, ce qui prouve l'efficacité du processus d'élimination du terme $\mathcal{H}(s_j)$.

sujets IRCAM	puiss	rev	dim sub	env son	int	chal	vie	brill	pat	lourd
éc-type $\mathcal{R} + \mathcal{H}(s_j)$	0.51	0.89	0.40	0.64	0.41	0.51	0.47	0.57	0.24	0.36
éc-type \mathcal{R}	0.33	0.28	0.26	0.49	0.35	0.32	0.17	0.35	0.20	0.24
diminution	58%	90%	56%	41%	29%	62%	86%	62%	33%	54%
sujets IRCAM	ac	agr	dur	heurte	pres	coher	dyn	larg	prec d'ec	contr
éc-type $\mathcal{R} + \mathcal{H}(s_j)$	0.00	0.00	0.00	0.32	0.62	0.17	0.79	0.66	0.90	0.62
éc-type \mathcal{R}	0.10	0.10	0.00	0.30	0.49	0.10	0.33	0.42	0.45	0.37
diminution	0%	0%	0%	10%	37%	67%	83%	59%	75%	64%
sujets IRCAM	rgrav	raig	pgrav	paig	IMGAL	bal gal	adapt	appr	moyenne	
éc-type $\mathcal{R} + \mathcal{H}(s_j)$	0.54	0.48	0.39	0.39	0.45	0.49	0.39	0.36	0.50	
éc-type \mathcal{R}	0.17	0.17	0.26	0.28	0.30	0.48	0.14	0.17	0.30	
diminution	90%	87%	53%	47%	55%	4%	87%	77%	64%	

TAB. 5.4 - *Ecart-type (en unités perceptives) des réponses par question pour des places identiques, pour les sujets dits IRCAM, c.-à-d. les sujets ayant appartenus au noyau stable de la campagne européenne de tests d'écoute, pour le premier test à la Vilette, portant sur quatre répétitions de deux mouvements de la symphonie N° 39 de Mozart. Première ligne : réponses brutes ; deuxième ligne : réponses itérées, c.-à-d. après enlèvement des biais individuels ; troisième ligne : diminution de la variance quadratique (en pourcentage).*

De plus, en comparant les tableaux 5.3 et 5.4, on observe que non seulement la variance initiale des données est légèrement plus petite pour les sujets ayant participé à la campagne européenne de tests d'écoute, mais surtout que la diminution de la variance due au processus d'itération est nettement plus importante pour ces sujets. Pour le groupe comprenant la totalité des sujets, la diminution de la variance par le processus d'itération égale environ la moitié de la variance initiale, alors que cette diminution est d'environ deux tiers pour les sujets ayant

18. La diminution du bruit résiduel par le processus d'itération doit être exprimée en termes de variance et non pas d'écart-type, l'additivité étant valable uniquement pour la variance. Il est rappelé que le terme \mathcal{R} contient les influences de la place et de l'œuvre *spécifiques par sujet* : $\mathcal{F}(p_{(k,m)_j})$ et $\mathcal{G}(o_{m_j})$, cf. l'équation 5.8.

fait partie du noyau stable de la campagne européenne. On avait vu, dans le dernier paragraphe sur le calcul des $\mathcal{H}(s_j)$, que l'importance des biais individuels ne semble pas dépendre de l'expérience des sujets. Par contre, les faibles valeurs de la variance après itération, pour les personnes entraînés, montrent très clairement que la *cohérence* des jugements, donc la *fiabilité*, est nettement plus grande pour des sujets entraînés.

On peut en conclure qu'une expérience accrue dans les tests perceptifs augmente la fiabilité des jugements. Suite à ce résultat, a donc décidé, pour le dépouillement des tests d'écoute de la campagne européenne, de garder *seulement* les jugements des auditeurs *appartenant au noyau stable* d'auditeurs, donc les sujets ayant une bonne expérience de ces tests. La fiabilité finale des jugements de ces auditeurs, après enlèvement des biais individuels, semble être la meilleure que l'on puisse obtenir.¹⁹

Il a été évoqué plus haut que, lors de ce test, et pour une cinquième écoute, la direction de l'orchestre par un autre chef a conduit à des changements notables. La *pertinence* statistique de ces changements a été vérifiée pour les différents ensembles de données considérés plus haut : réponses brutes vs. réponses itérées, réponses de la totalité des sujets vs. réponses uniquement des sujets expérimentés.

Les résultats seront brièvement décrites ci-après :

- la significane statistique est nettement plus grande pour les réponses itérées, c.-à-d. après enlèvement des $\mathcal{H}(s_j)$, pour les deux groupes de sujets considérés ;
- la significane statistique est plus grande pour le groupe restreint de sujets expérimentés.

On en conclura que le processus d'itération est *primordial* pour réduire le niveau de bruit apparent contenu dans les réponses aux questionnaires, et que la fiabilité des réponses est largement accrue pour des sujets expérimentés.

5.5.3 Influence de l'œuvre, $\mathcal{G}(o_m)$

On peut estimer l'importance du terme $\mathcal{G}(o_m)$ en calculant la différence des réponses moyennes par œuvre, pour des changements d'œuvres à l'intérieur d'une même salle.²⁰ Seuls les salles dans lesquelles des œuvres différentes ont été écoutées sont prises en compte : il s'agit du Concertgebouw Amsterdam, de la Philharmonie de Berlin, du Musikvereinsaal à Vienne, de la Salle Pleyel et de l'opéra Palais Garnier à Paris. Le tableau 5.5 donne l'écart-type, dû à la variation de l'œuvre dans les tests d'écoute.

œuvre	puiss	dyn	rev	dim sub	env son	int	chal	vie	brill
éc-type	0.43	0.35	0.22	0.13	0.33	0.20	0.20	0.16	0.21
œuvre	pat	lourd	ac	agr	dur	dist s	loc	pres	prec d'ec
éc-type	0.09	0.05	0.04	0.06	0.05	0.43	0.12	0.10	0.31
œuvre	contr	fluid	IMGAL	bal gal	adapt	interp	appr	$\mathcal{G}(o_m)$	
éc-type	0.19	0.25	0.27	0.32	0.37	0.30	0.25	0.22	

TAB. 5.5 - *Ecart-type des réponses dû à la variation de l'œuvre $\mathcal{G}(o_m)$. L'influence moyenne de l'œuvre est considérée, pour des changements d'œuvre dans une même salle. Les salles considérées sont Amsterdam, Berlin, Vienne, Salle Pleyel et l'opéra Garnier.*

19. Une autre raison de ne garder que les sujets du noyau stable a été qu'un certain nombre d'auditeurs invités pour l'occasion n'ont pu écouter qu'un sous-ensemble d'œuvres, ce qui déstabilise le processus d'itération .

20. Seuls des ensembles de places *strictement identiques* sont considérés. Des places qui n'ont été écoutées que pour un sous-ensemble d'œuvres ne sont pas considérées. En comparant les réponses pour les différentes œuvres dans une même salle et en se limitant aux sous-ensembles strictement identiques, toute influence de l'acoustique est éliminée. Les réponses de toutes les places du sous-ensemble sont moyennées. Les intervalles de confiance sont ainsi très fortement diminués et l'influence résiduelle du terme \mathcal{R} devient négligeable.

Pour un changement d'œuvre, les réponses dans des salles différentes ne peuvent pas être considérées, les influences de l'œuvre et de l'acoustique (au moins l'acoustique moyenne d'une salle) étant dans ce cas forcément mêlées.

5.5.4 Influence de l'acoustique, $\mathcal{F}(p_k)$

Pour étudier l'influence de l'acoustique, ce sont les variations à l'intérieur d'une même salle ("intra-salles") ainsi que les variations à travers les salles ("inter-salles") qui seront considérées. Premièrement, afin d'être directement comparable avec les autres termes, l'importance du terme $\mathcal{F}(p_k)$ sera estimée en utilisant une méthode identique à celle employée pour l'estimation du terme $\mathcal{G}(o_m)$. On utilise les variations des réponses à l'intérieur d'une même salle et on considère les mêmes salles et sous-ensembles de places que pour l'estimation du terme $\mathcal{G}(o_m)$. On moyenne d'abord les réponses pour les différentes œuvres par place, puis on calcule la variance et l'écart-type de la distribution. Deuxièmement, l'écart-type des réponses est calculé pour *toutes* les places dans la totalité des salles testées. Dans ce cas, ce sont les réponses par place (en écoutant les différentes œuvres) qui sont moyennées. L'hypothèse est que, en moyennant sur les œuvres, leur influence devient négligeable. Le tableau 5.6 donne les écart-types pour des changements de place à l'intérieur d'une même salle ("inter-salle") et pour toutes les places dans la totalité des salles testées ("intra-salles").

acoustique	puiss	dyn	rev	dim sub	env son	int	chal	vie	brill
$\mathcal{F}_{intra-salles}(p_k)$	0.54	0.71	0.40	0.38	0.49	0.38	0.36	0.36	0.32
$\mathcal{F}_{inter-salles}(p_k)$	0.54	0.75	0.70	0.49	0.56	0.42	0.45	0.40	0.37
acoustique	pat	lourd	ac	agr	dur	dist s	loc	pres	prec d'ec
$\mathcal{F}_{intra-salles}(p_k)$	0.19	0.19	0.11	0.14	0.15	0.85	0.27	0.21	0.80
$\mathcal{F}_{inter-salles}(p_k)$	0.17	0.17	0.14	0.13	0.13	0.80	0.25	0.19	0.63
acoustique	contr	fluid	IMGAL	bal gal	adapt	interp	appr	$\mathcal{F}(p_k)$	
$\mathcal{F}_{intra-salles}(p_k)$	0.53	0.52	0.61	0.55	0.60	0.50	0.38	0.42	
$\mathcal{F}_{inter-salles}(p_k)$	0.44	0.48	0.62	0.56	0.56	0.54	0.53	0.44	

TAB. 5.6 - *Ecart-type des réponses, dû à la variation de l'acoustique $\mathcal{F}(p_k)$. Dans la première ligne, $\mathcal{F}_{intra-salles}(p_k)$, on considère les changements de place à l'intérieur d'une même salle, pour les mêmes salles que pour le calcul de l'influence moyenne de l'œuvre, $\mathcal{G}(o_m)$, dans le tableau précédent. Dans la deuxième ligne, $\mathcal{F}_{inter-salles}(p_k)$, on considère la distribution des réponses pour les moyennes par place, négligeant l'influence résiduelle de l'œuvre.*

En étudiant le tableau 5.6, on s'aperçoit que :

- la variabilité des réponses est sensiblement identique lorsqu'on compare les réponses à l'intérieur d'une même salle et celles sur toutes les places dans les neuf salles de la campagne européenne — à l'exception de la question sur la réverbérance subjective ;²¹
- pour les tests de la campagne européenne, la variabilité des réponses due à l'acoustique, en moyenne de 0,42 unités perceptives, est supérieure à celle due aux changements d'œuvre, en moyenne de 0,22 unités perceptives, cf. tableau 5.5.

21. Pour les variations à l'intérieur d'une même salle on considère les salles pour lesquelles des changements importants d'œuvres musicales ont eu lieu. Toutes ces salles sont de grande dimension, avec une variabilité assez importante de la qualité acoustique en fonction de l'emplacement. Pour les salles de musique de chambre, cette variabilité en fonction de l'emplacement est moins grande. Néanmoins, on est surpris de ne pas observer d'augmentation nette de la variabilité des réponses lorsque l'on considère toutes les places dans toutes les salles confondues.

5.5.5 Comparaison des influences de l'acoustique et de l'œuvre dans le cas des tests d'écoute à La Villette

Dans les deux précédents paragraphes, on a considéré les données de la campagne européenne. Dans ce paragraphe, on comparera l'importance respective de l'acoustique et de l'œuvre pour les tests effectués dans la salle de La Villette, à Paris. Comme nous l'avons déjà signalé, une dizaine de places a été testée dans cette salle en écoutant huit œuvres différentes.

On peut alors :

- estimer la variation des réponses due à l'œuvre ;
- estimer la variation des réponses due aux changements de places, donc de l'acoustique, sachant que les variations acoustiques à l'intérieur d'une même salle sont généralement du même ordre de grandeur que les variations entre salles ;
- comparer quantitativement les variations dues à l'œuvre et à l'acoustique.

Les réponses moyennes, moyennées sur tous les sujets, ont été calculées pour chaque couple place/œuvre. La variance due à l'œuvre a d'abord été calculée pour chaque place individuellement puis moyennée *a posteriori*.

question	puiss	rev	dim sub	env son	int	chal	vie	brill	pat	lourd
œuvre	0.50	0.43	0.25	0.30	0.26	0.26	0.24	0.26	0.13	0.12
acoustique	0.40	0.34	0.26	0.31	0.30	0.25	0.23	0.23	0.14	0.12
question	ac	agr	dur	heurte	pres	coher	dyn	larg	prec d'ec	contr
œuvre	0.14	0.17	0.16	0.13	0.44	0.21	0.42	0.39	0.46	0.31
acoustique	0.13	0.13	0.15	0.11	0.49	0.21	0.36	0.35	0.48	0.33
question	rgrav	raig	pgrav	paig	IMGAL	bal gal	adapt	appr	MEAN	
œuvre	0.24	0.24	0.23	0.28	0.33	0.36	0.36	0.35	0.28	
acoustique	0.25	0.21	0.24	0.20	0.33	0.37	0.35	0.24	0.27	

TAB. 5.7 - *Ecart-type (racine carrée de la variance) dû à la variation de l'œuvre écoutée (première ligne) et à la variation de l'emplacement dans la salle (deuxième ligne), pour les huit œuvres écoutées pendant les quatre tests d'écoute à La Villette.*

En étudiant le tableau 5.7, on s'aperçoit que, pour le cas des tests d'écoute à La Villette, la variation des réponses due aux changements d'œuvres est *sensiblement identique sinon supérieure* à la variation des réponses due aux changements de place, à l'intérieur d'une salle.²²

La perception de la qualité acoustique d'une salle — ou d'une place spécifique à l'intérieur d'une salle — est influencée autant par l'acoustique à la place donnée que par l'œuvre écoutée. La variance exacte, due aux deux paramètres, sera déterminée par la variation réelle des deux paramètres, mais on peut déjà avancer que l'influence de l'œuvre est presque du même ordre de grandeur que l'influence des paramètres proprement acoustiques.

22. On pourrait objecter que ce résultat est dû à une variation de l'œuvre trop importante et/ou une variation de la qualité acoustique insuffisante, par rapport aux cas habituellement rencontrés dans d'autres salles de concerts. La salle de concert à la Villette compte environ 1000 places, prévue pour une programmation très variable, allant de la musique de chambre jusqu'à la musique symphonique (par exemple pour l'orchestre d'étudiants du Conservatoire National Supérieur de Musique). Une consultation de la liste des œuvres écoutées lors des tests d'écoute révèle que, au moins par rapport à la programmation prévue, la variation d'œuvres reste modérée : outre le piano seul, seuls des œuvres pour musique de chambre (avec une instrumentation assez fournie, par exemple la sonate de Bartok pour deux pianos et deux percussionnistes) et pour orchestre de chambre ont été écoutées. Aucune œuvre de type symphonique n'a été incluse dans les tests d'écoute. Une étude sur l'inhomogénéité de la qualité acoustique entre les différentes places, ou les différentes zones d'écoute, a démontré que la variabilité entre les places n'est pas excessivement grande, mais pas particulièrement petite non plus. Une partie du conseil acoustique effectué lors de cette série de tests d'écoutes était d'ailleurs de donner des consignes sur la manière de diminuer la variabilité de l'écoute entre les différentes places.

On est alors amené à conclure que la variabilité des œuvres écoutées et des places à l'intérieur de la salle de La Villette reste dans les limites habituelles rencontrées dans des salles de concert.

5.5.6 Influence de l'interaction acoustique/œuvre, $\mathcal{I}(i_{m,k})$

L'influence quantitative du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$ n'est pas directement accessible, par la nature même de ce terme: ce terme décrit l'influence *spécifique* de l'œuvre musicale sur une place donnée. Pour une œuvre spécifique, il n'existe qu'un seul jugement par place (ou deux, pour le cas des concert doublés), et il est donc impossible d'effectuer des moyennes. Par contre, une méthode indirecte peut être appliquée. La somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} peut être calculée comme l'écart-type des réponses, après que la moyenne par place, $\mathcal{F}(p_k)$, et la moyenne de l'œuvre, $\mathcal{G}(o_m)$, soient enlevées. L'importance du terme \mathcal{R} a été calculée dans le paragraphe 5.5.2, pour le premier test d'écoute à La Villette. L'importance du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$ peut donc être estimée par la différence entre la variance de la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$ et la variance du terme \mathcal{R} seul.

On calcule d'abord la variance (ou l'écart-type, la racine carrée de la variance) de la somme $\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$, séparément pour la campagne européenne et les tests à La Villette, cf. tableau 5.8. On part de la supposition que les termes \mathcal{G} et \mathcal{F} sont parfaitement estimés par les *moyennes* des jugements recueillis, et on calcule la variance résiduelle (pour chaque question). Cette hypothèse est certainement optimiste, au moins pour les tests de la campagne européenne: en effet, chaque place n'était écoutée que par quatre auditeurs et chaque œuvre par une petite dizaine d'auditeurs. La variance finale est donc sous-estimée, mais on peut quantifier l'erreur: pour 4 questionnaires par place, il faut multiplier la variance par 4/3 (donc l'écart-type par $\sqrt{4/3}$). A la Villette, 400 jugements ont été recueillis pour dix places et huit œuvres et l'on peut supposer que les moyennes sont correctement estimées.

$\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$	puiss	dyn	rev	dim sub	env son	int	chal	vie	brill	pat
campagne	0.37	0.52	0.55	0.41	0.49	0.37	0.33	0.35	0.34	0.22
Villette	0.51	0.53	0.50	0.38	0.51	0.41	0.38	0.39	0.38	0.23
$\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$	lourd	ac	agr	dur	prec d'ec	contr	IMGAL	bal gal	adapt	$\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$
campagne	0.19	0.14	0.17	0.17	0.58	0.44	0.45	0.54	0.51	0.38
Villette	0.21	0.21	0.26	0.26	0.65	0.51	0.50	0.55	0.48	0.41

TAB. 5.8 - *Ecart-type dû à la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} , pour les tests d'écoute de la campagne européenne (première ligne) et les tests à La Villette (deuxième ligne). Les valeurs pour la campagne sont multipliées par une constante afin d'intégrer l'erreur sur les moyennes, due au nombre réduit des réponses par place.*

Pour la variance du terme \mathcal{R} il faut prendre des valeurs différentes pour les deux cas: pour les tests de la campagne européenne, les sujets étaient "expérimentés", il faut alors prendre les valeurs établies pour les sujets dits "IRCAM". Par contre, pour les tests à La Villette il faut considérer les valeurs calculées sur la totalité des sujets. L'écart-type des réponses, dû à l'influence du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$ seul, est calculé par la différence entre les variances du terme $\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$ et du terme \mathcal{R} seul, en considérant les valeurs appropriées.²³ Le tableau 5.9 donne l'estimation finale de l'influence du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$, séparément pour les tests de la campagne et les tests à La Villette.

5.6 Comparaison quantitative des différentes influences

Dans les derniers paragraphes, l'importance des différents termes de l'équation 5.13:

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R} \quad (5.25)$$

23. Dans les tableaux 5.8 et 5.9 seules les questions n'ayant pas changé entre les deux séries de tests d'écoute sont reproduites. L'estimation du terme \mathcal{R} a eu lieu lors des tests d'écoute à La Villette et donc avec le nouveau questionnaire. Il va de soi qu'il ne peut s'agir que d'une *estimation* approximative de l'importance du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$.

$\mathcal{I}(i_{m,k})$	puiss	dyn	rev	dim sub	env son	int	chal	vie	brill	pat
campagne	0.16	0.40	0.47	0.31	0.01	0.13	0.09	0.30	-	0.09
Villette	0.28	0.33	0.00	0.12	-	0.17	0.07	0.18	0.07	0.11
$\mathcal{I}(i_{m,k})$	lourd	ac	agr	dur	prec d'ec	contr	IMGAL	bal gal	adapt	$\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$
campagne	-	0.10	0.14	0.17	0.37	0.23	0.34	0.25	0.49	0.26
Villette	-	0.06	0.17	0.17	0.34	0.01	0.33	0.05	0.39	0.17

TAB. 5.9 - *Ecart-type dû au terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$, pour les tests d'écoute de la campagne européenne (première ligne) et les tests à La Villette (deuxième ligne). Les valeurs sont calculées en comparant les variances de la somme $\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$ (tableau 5.8) et de \mathcal{R} (tableaux 5.3 et 5.4). Les “-” indiquent des valeurs manquantes. En effet, pour ces questions la variance de $\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$ était inférieure à la variance de \mathcal{R} , estimée à partir du premier test d'écoute à La Villette.*

a été calculée, par question, et séparément pour les tests de la campagne européenne et les tests à La Villette. Afin de permettre une vue globale, on reproduira un tableau récapitulatif, tiré de l'article [KJ95]. Pour ce tableau, les tests de la campagne ainsi que ceux de La Villette ont été considérés, et les valeurs ont été moyennées sur l'ensemble des questions identiques pour les deux séries de tests (un ensemble de 19 questions). Par rapport à l'article [KJ95], l'importance du terme $\mathcal{I}(o_{m,k})$ a été recalculée, afin d'intégrer l'erreur dans l'évaluation des réponses moyennes (due au fait que, pour la campagne, il y a en moyenne seulement quatre réponses par place).

influence	$\mathcal{H}(s_j)$	$\mathcal{G}(o_m)$	$\mathcal{F}_{intra-salles}(p_k)$	$\mathcal{F}_{inter-salles}(p_k)$	$\mathcal{I}(i_{m,k})$	\mathcal{R}
écart-type (unités arbitraires)	0.41	0.22	0.36	0.44	0.22	0.28

TAB. 5.10 - *Tableau récapitulatif des écart-types dus aux différentes influences sur les réponses aux questionnaires, moyennés sur toutes les questions. Les différentes influences sont les biais des sujets : $\mathcal{H}(s_j)$, l'influence moyenne de l'œuvre musicale : $\mathcal{G}(o_m)$, l'acoustique (pour les changements d'emplacement à l'intérieur d'une même salle) : $\mathcal{F}_{intra-salles}(p_k)$, l'acoustique (en considérant toutes les places dans toutes les salles testées) : $\mathcal{F}_{inter-salles}(p_k)$, l'interaction acoustique/œuvre musicale : $\mathcal{I}(i_{m,k})$, et le bruit résiduel : \mathcal{R} .*

5.6.1 Calcul des intervalles de confiance

L'estimation du terme \mathcal{R} , effectuée dans le paragraphe 5.5.2, permet de calculer des intervalles de confiance sur les réponses aux questionnaires, et de calculer des bornes théoriques supérieures pour les corrélations de la correspondance objectif/perceptif.

En statistique, on considère habituellement les intervalles de confiance à 95% (pour des cas symétriques, “two-tailed”). Afin de calculer des intervalles de confiance, la différence entre une distribution gaussienne (avec un nombre infini de degrés de liberté) et une variation de STUDENT (distribution de t), intégrant le nombre réel des degrés de liberté, doit encore être prise en compte. En considérant une distribution gaussienne, le tableau 5.11 suivant indique les facteurs multiplicatifs servant à transformer les écart-types — donnés dans les tableaux 5.3 et 5.4 — en intervalles de confiance.

Pour le cas de la puissance sonore, en utilisant les écart-types donnés dans les tableaux 5.4 et 5.8, les intervalles de confiance deviennent :

En comparant les valeurs des intervalles de confiance, données dans le tableau 5.12, à l'histogramme des réponses recueillies sur la question de la puissance (figure 5.1), on remarque que ces intervalles de confiance sont extrêmement larges et que, en gardant toute rigueur statistique, très peu de résultats sur les données brutes (même après itération) auront une véritable signification statistique. Cette observation entraîne deux conséquences :

- il convient de ne pas étudier de données individuelles, par exemple les jugements pour une

nombre de jugements pour un cas identique	1	2	4	6	10
facteur multiplicatif	2	1,41	1	0,82	0,63

TAB. 5.11 - *Facteurs multiplicatifs, par rapport aux écart-types donnés dans les tableaux 5.3 et 5.4, afin de calculer les intervalles de confiance à 95%, pour différents nombres de jugements sur une situation identique (coupleplace/œuvre ou, en négligeant l'interaction acoustique/œuvre, place ou œuvre).*

nombre de jugements	1	2	4	6	10
int_de_conf (95%), \mathcal{R}	0,66	0,47	0,33	0,27	0,21
int_de_conf (95%), $\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$	0,74	0,52	0,37	0,30	0,23

TAB. 5.12 - *Intervalles de confiance pour la question de la puissance sonore, en fonction du nombre de jugements pour un cas identique, pour la campagne européenne (bruit résiduel calculé pour les sujets du noyau stable de la campagne). La première ligne décrit les cas où l'interaction acoustique/œuvre est prise en compte, la deuxième ligne les cas où cette interaction est négligée.*

place spécifique ou pour une œuvre spécifique. On préférera étudier, le plus possible, les données dans leur totalité ou, sinon, des sous-ensembles suffisamment larges. Les valeurs des corrélations, et surtout les *variations* des valeurs de corrélations, sur *la totalité* des données, gardent un sens et restent interprétables;

- l'analyse de ce corps de données doit conserver un caractère *exploratoire*. La validité des résultats obtenus étant impossible à prouver avec une rigueur statistique, on peut toujours recueillir des éléments permettant de vérifier (ou infirmer) des hypothèses, notamment celles issues des tests en laboratoire. De plus, de *nouvelles pistes* peuvent être dégagées — qui doivent ensuite faire l'objet d'une étude approfondie en laboratoire.

5.6.2 Calcul des bornes théoriques des corrélations objectif/perceptif

La connaissance quantitative du bruit résiduel (dû soit au terme \mathcal{R} seul, soit à la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$) permet également de calculer des bornes théoriques des taux de corrélations de la correspondance objectif/perceptif. Le bruit (par définition décorréolé de la structure des données) s'ajoute à la variance "utile" des réponses aux questionnaires. La borne supérieure des taux de corrélations (considérant une correspondance *parfaite* entre les données objectives et les réponses aux questionnaires) est donnée par la comparaison de la variance "utile" des données (variance totale moins bruit résiduel) avec le bruit résiduel. Pour donner un exemple, la borne supérieure du taux de corrélations pour un cas où la variance utile et la variance dû au bruit résiduel sont identiques, est de 0,707 ($1/2 * \sqrt{2}$). Cette estimation de la borne supérieure des taux de corrélations sera utilisée dans le chapitre 9.

5.7 Etude sémantique

Dans les paragraphes précédents, on a démontré que les données recueillies lors des tests d'écoute contiennent un bruit résiduel assez élevé. Ce bruit est-il dû uniquement à l'incertitude des jugements des auditeurs, ou, au contraire, au moins partiellement induit par des problèmes d'interprétation sémantique des questions et des explications fournies. Contrairement aux études en laboratoire permettant des jugements non-verbaux, les tests *in situ* avec l'utilisation d'un questionnaire, même structuré, sont sujets à des problèmes d'interprétation sémantique par les différents auditeurs participant aux tests.

La reproductibilité des jugements d'un auditeur unique peut, en principe, être étudiée, en recueillant *plusieurs* jugements du même auditeur pour une situation *identique* (cf. la discussion dans le chapitre 5.1, ou l'étude sur la simulation d'un orgue à l'abbatiale du Mont Saint-Michel,

[Gir90], [CFB⁺91]).²⁴ Aucune répétition des cas strictement identiques n'a eu lieu dans cette campagne de tests d'écoute — l'importance du terme \mathcal{R} était calculée sur la répétition d'une même œuvre musicale et pour des places identiques, mais pour des *sujets* différents. Une autre méthode, pour estimer l'incertitude des jugements, consiste à considérer les échelles proposées dans le questionnaire structuré. Pour chaque question individuelle, l'échelle a été fixée afin de correspondre à la sensibilité perceptive sur ce facteur, précédemment établie lors des tests en laboratoire. En principe, une unité d'échelle correspond à une unité perceptive, qui correspond au seuil de différenciation (JND, "just noticeable difference"). Par contre, il s'est avéré que les sujets n'employaient pas la totalité de l'échelle proposée (cf. la figure 5.1), ce qui a conduit à une pertinence de différenciations plus fines qu'une unité perceptive. On peut néanmoins s'attendre à ce que les sujets peuvent difficilement noter des différences plus fines qu'une demi-unité perceptive. Par rapport à cette estimation, l'écart-type des réponses (dû à l'incertitude des sujets), calculé dans les tableaux 5.3 et 5.4, avec une moyenne d'environ 0,3 unités perceptives paraît faible et il pourrait s'expliquer seul avec l'effet du seuil de différenciation décrit ci-dessus.

Avant chaque test d'écoute, tous les sujets participant aux tests recevraient une explication identique (orale et écrite) sur le déroulement du test et sur les termes utilisés dans le questionnaire. Afin de faire apparaître tous les différences d'interprétation sémantique des questions (ainsi que des explications proposées), il serait intéressant d'effectuer, *a posteriori*, des interviews avec les sujets, demandant à chacun sa stratégie pour répondre aux questions individuelles. Ces interviews *structurés* avec la totalité des auditeurs n'ont pas été effectués, mais de longues discussions informelles ont eu lieu avec plusieurs auditeurs, révélant certaines différences d'approche pour aborder les différentes questions proposées. Dans le futur, il pourrait s'avérer utile de procéder à des tels interviews structurés, afin d'optimiser la terminologie employée dans le questionnaire.

Par ailleurs, par une étude de corrélations entre les réponses fournies par les sujets, on peut quantifier le degré de cohérence des sujets pour les questions individuelles.

Ici, nous proposons une méthode globale d'identification des questions posant des problèmes d'interprétation sémantique. Dans le chapitre 5.5.2, l'efficacité du processus d'itération a pu être démontrée. De plus, le tableau 5.4 indiquait que l'efficacité du processus variait selon les questions. Serait-il possible d'utiliser la convergence des réponses, pour des situations strictement identiques, comme il a été étudié dans le chapitre 5.5.2, afin de déterminer les questions du questionnaire qui posent des *problèmes de sémantique* particuliers? Le tableau 5.13 suivant est identique au tableau 5.4, sinon qu'une représentation des variances (en unités perceptives au carré) a été préférée aux écart-types. Les questions pour lesquelles la diminution de la variance est inférieure à 50% et/ou la variance finale reste égale ou supérieure à 0,20 unités perceptives au carré sont indiquées en caractères gras soulignés.

Comment faut-il interpréter les problèmes de convergence sur les questions indiquées dans le tableau 5.13? S'agit-il réellement des problèmes d'interprétation sémantique, ou y a-t-il d'autres influences possibles? On étudiera les différentes questions cas par cas.

enveloppement sonore : il semble s'agir d'un problème sémantique. Différents sujets interprètent cette questions comme étant liée soit à un effet du champ tardif de la salle (la réverbération tardive arrivant de toutes directions), soit à un effet des réflexions précoces (augmentation de l'enveloppement par de fortes réflexions latérales). Le même phénomène a été observé par M. Barron lors des tests d'écoute dans des salles britanniques ([Bar88]) ;

intimité : le problème sémantique associé à ce terme est bien connu dans la littérature. Il s'agit de la confusion entre un effet plus visuel ou géométrique ("intimité" interprétée comme proximité avec les sources sonore) et un effet purement acoustique. De plus, l'effet acoustique peut être influencé autant par la structure fine de la réponse impulsionnelle que par l'équilibre fréquentielle de cette réponse. L'ambiguïté est déjà apparue dans l'étude de Beranek, [Ber62], et également dans l'étude de M. Barron, [Bar88] ;

²⁴. On parle de *gestion totale de la qualité*, et un tel procédé peut également être utilisé pour évaluer la performance du questionnaire lui-même.

sujets IRCAM	puiss	rev	dim sub	<u>env son</u>	<u>int</u>	chal	vie	brill	pat	lourd
var brute	0.26	0.80	0.16	0.41	0.17	0.26	0.22	0.32	0.06	0.13
var itérée	0.11	0.08	0.07	<u>0.24</u>	0.12	0.10	0.03	0.12	0.04	0.06
diminution	58%	90%	56%	<u>41%</u>	<u>29%</u>	62%	86%	62%	<u>33%</u>	54%
sujets IRCAM	ac	agr	dur	<u>heurte</u>	<u>pres</u>	coher	dyn	larg	<u>prec d'ec</u>	contr
var brute	0	0	0	0.10	0.38	0.03	0.63	0.44	0.81	0.39
var itérée	0.01	0.01	0	0.09	<u>0.24</u>	0.01	0.11	0.18	<u>0.20</u>	0.14
diminution	0%	0%	0%	<u>10%</u>	<u>37%</u>	67%	83%	59%	75%	64%
sujets IRCAM	rgrav	raig	pgrav	<u>paig</u>	IMGAL	<u>bal gal</u>	adapt	appr	MEAN	
var brute	0.29	0.23	0.15	0.15	0.20	0.24	0.15	0.13	0.25	
var itérée	0.03	0.03	0.07	0.08	0.09	<u>0.23</u>	0.02	0.03	0.09	
diminution	90%	87%	53%	<u>47%</u>	55%	<u>4%</u>	87%	77%	64%	

TAB. 5.13 - Variance des réponses pour des places identiques, par question, pour le premier test à la Villette, portant sur quatre répétitions de deux mouvements de la symphonie N° 39 de Mozart, pour les sujets dits IRCAM, c.-à-d. les sujets ayant appartenu au noyau stable de la campagne européenne de tests d'écoute. Les questions pour lesquelles la diminution de la variance est inférieure à 50% et/ou la variance finale reste égale ou supérieure à 0,20 sont indiquées en caractères gras et soulignés.

pâteux et heurté : pour ces deux questions, la faiblesse de diminution de la variance paraît plus liée à la nature de l'effet concerné (des *défauts*, les sujets le remarquent ou non) ainsi qu'à l'échelle proposée (échelle adaptée aux défauts, avec le choix binaire de 0 pour "pas d'apparition du défaut" et 1 pour "apparition") ;

présence : la question sur la présence comporte également une certaine ambiguïté entre l'effet de proximité par rapport aux sources (amenant une puissance sonore plus grande, particulièrement du son direct, donc du son précoce) et l'évaluation de la puissance acoustique *par rapport* à la distance géométrique. Il s'agit alors surtout de la différence d'une évaluation en absolu ou d'une évaluation en relatif par rapport à la distance objective ;

précision d'écoute : malgré une très forte diminution de la variance lors du processus d'itération, la variance finale reste relativement élevée. Il est difficile de déterminer la raison de cette importance de la variance finale. L'une des raisons est certainement la variance initiale très grande, une autre la complexité du jugement nécessaire pour répondre à cette question (la question sur la précision d'écoute est forcément liée à l'intelligibilité du discours musical, laquelle ne dépend pas uniquement des paramètres acoustiques). Deux autres raisons peuvent être évoquées ; d'une part l'ambiguïté entre une "bonne" intelligibilité et une intelligibilité "aisée", d'autre part un éventuel effet de non-linéarité : le haut de l'échelle est-il atteint avec une précision d'écoute "suffisante", ou plutôt avec une précision "exagérée" ?

puissance des aiguës : pour la question de puissance dans les aiguës et les graves, il paraît s'agir d'un effet similaire à celui de la présence : il existe une ambiguïté d'évaluer ces deux questions soit en absolu (c.-à-d. une augmentation de la puissance mène à une augmentation également de la puissance dans les aiguës comme dans les graves), soit en relatif par rapport à la puissance globale ;

balance générale : deux éléments peuvent contribuer à la forte variance finale sur cette question. Premièrement, il s'agit de l'ambiguïté contenue dans la question sur l'évaluation de la balance *spatiale* et de la balance *spectrale*. Deuxièmement, le faible taux de la diminution de la variance semble indiquer que les effets de — et l'adaptation à — l'orientation par rapport aux sources orchestrales sont très personnelles et irréductibles.

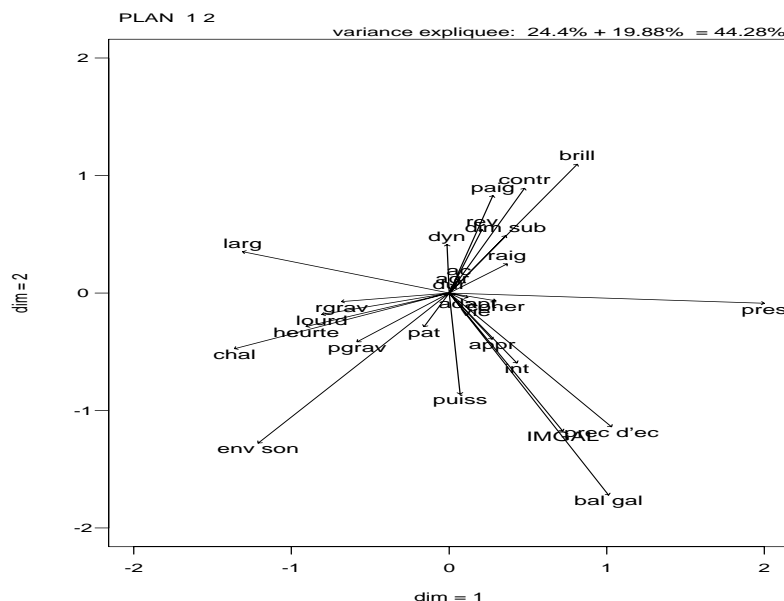


FIG. 5.2 - Plan 1/2 de l'ACP des réponses des sujets ayant appartenu au noyau stable de la campagne européenne de tests d'écoute, pour le premier test à la Vilette, portant sur quatre répétitions de deux mouvements de la symphonie N° 39 de Mozart. Les moyennes des places étant enlevées, il s'agit uniquement du bruit restant contenu dans les réponses aux questionnaires, donc du terme \mathcal{R} .

Analyse de la structure contenue dans le bruit résiduel

Les figures 5.2 et 5.3 suivantes donnent une représentation graphique de la structure du bruit résiduel. Il s'agit du résultat d'une analyse multidimensionnelle (analyse en composantes principales, ACP) effectuée sur le bruit résiduel des réponses aux questionnaires lors du premier test d'écoute effectué à La Vilette. L'œuvre musicale, donc le stimulus des tests, est restée strictement identique. Il s'agit de quatre répétitions des deux premiers mouvements de la symphonie N° 39 de W.A. Mozart, jouée par l'orchestre du Conservatoire National Supérieure de Musique à Paris, sous la direction de Scott Sandmeier.²⁵ Seuls les sujets ayant appartenu au noyau stable des sujets de la campagne européenne des tests d'écoute sont inclus dans l'analyse, permettant une meilleure stabilité des réponses (cf. discussion dans les paragraphes précédents). L'analyse est effectuée sur les réponses *itérées*, c.-à-d. après que les biais individuels soient enlevés. Les moyennes des différentes places (changement de l'acoustique par un changement de l'emplacement dans la salle) ont également été enlevées.

On remarque que, malgré que toute variation du stimulus et de l'acoustique soit enlevée, des corrélations (donc une cohérence) persistent entre certaines questions. Cela indique que le *bruit* sur certaines questions reste corrélé (pour le modèle de correspondances entre les questions du questionnaire, menant à un modèle de réduction du nombre des questions et des variables d'entrée cf. le chapitre 7). Il semble que les corrélations entre les questions peuvent être induites par deux types d'influence sous-jacents :

proximité sémantique : pour certaines questions, ou couples de questions, une proximité sémantique peut amener à une confusion sémantique, donc une corrélation des réponses aux questions. Ce type de lien est très fort, par exemple pour les questions de la puissance

25. Une cinquième écoute, sous la baguette de David Robertson, n'a pas été prise en compte, car le changement de chef d'orchestre a provoqué des différences significatives sur les réponses.

Chapitre 6

Analyse des questionnaires seuls

Dans ce chapitre on analysera les relations entre les différentes réponses aux questionnaires. Le prochain chapitre sera réservé à l'analyse des mesures objectives effectuées dans les salles, avant d'étudier les *correspondances* entre les réponses aux questionnaires et les mesures objectives, dans le chapitre 9.

6.1 L'exemple d'une salle : le Concertgebouw Amsterdam

Au Concertgebouw Amsterdam, deux concerts différents ont été écoutés : un concert avec l'orchestre et le chœur de l'Université d'Amsterdam interprétant le *War Requiem* de Benjamin Britten, l'autre avec l'orchestre du Concertgebouw interprétant le concerto pour piano et orchestre KV 421 de Mozart et la symphonie n° 5 d'Anton Bruckner. 9 places ont été testées, dont 2 seulement pendant un concert (la place "U5" derrière la scène n'était disponible que pour le deuxième concert) par 8 auditeurs, dont 7 du noyau stable de la campagne européenne. Chaque auditeur a ainsi écouté quatre places différentes, et chaque place a été écoutée par deux à quatre sujets, mais avec des œuvres différentes.

Le but principal est d'étudier l'influence de l'acoustique, et donc de la place écoutée, sur les réponses aux questionnaires. On considère d'abord les *moyennes* par place. Les deux figures suivantes (6.2 et 6.3) montrent le résultat d'une analyse multidimensionnelle effectuée sur ces moyennes par place. Le plan de la salle, indiquant les emplacements et les codes des places écoutées est donné dans la figure 6.1. Quelques détails sur l'analyse en composantes principales (ACP) ont été donnés dans le chapitre 3.1. Ici on donnera quelques explications supplémentaires, surtout comment il faut lire et analyser des plans issues d'une telle analyse :

Une analyse en composantes principales donne un résumé des traits les plus significatifs d'un espace multidimensionnel - multidimensionnel car on analyse les réponses de plusieurs questions (ou les variations de plusieurs critères objectifs), a priori indépendantes. L'analyse orthogonalise cet espace multidimensionnel tout en l'hierarchisant. Les premiers axes du nouvel espace contiennent alors la quasi-totalité de l'information contenu dans l'ensemble des réponses aux questions et peuvent être visualisés graphiquement sous forme des plans. Ces plans peuvent être lus et interprétés de deux manières complémentaires : La distance euclidienne des points sur la graphique (c.-à-d. les points d'écoute) est représentative de leur distance perceptive, comme exprimée dans les réponses des auditeurs. Les points sont éloignés l'un de l'autre plus la distance perceptive est importante. Les flèches sont les projections des questions dans le plan des points et permettent alors de voir quelles questions ont entraîné la différenciation des points d'écoute. Enfin, une collinéarité de deux flèches indique une forte corrélation des réponses pour les deux questions correspondantes.

Dans cette thèse, le but n'est pas de donner une description exhaustive du comportement de chaque salle, mais de révéler, à travers des exemples précis, les relations entre la perception de la qualité acoustique, exprimée par les réponses aux questionnaires, et les paramètres objectifs

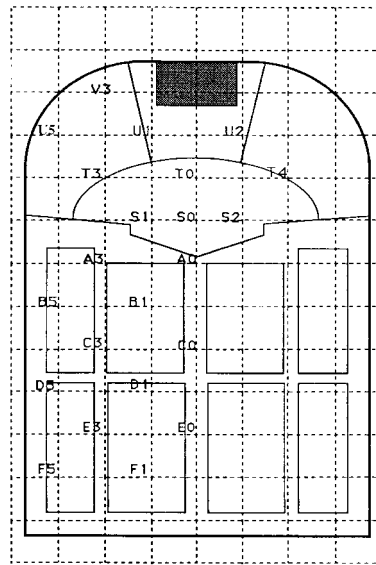


FIG. 6.1 - Plan du Concertgebouw Amsterdam, avec la grille régulière superposée et les codes des emplacements des sources et des récepteurs.

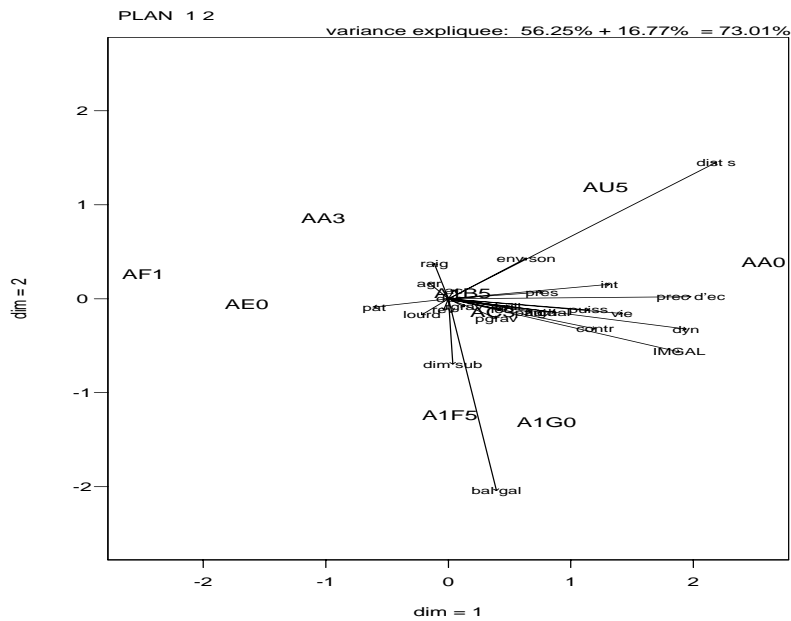


FIG. 6.2 - Plan 1/2 de l'analyse en composantes principales (ACP) des réponses aux questionnaires, pour le Concertgebouw Amsterdam. Les questions d'appréciation et de l'interprétation ont été enlevées.

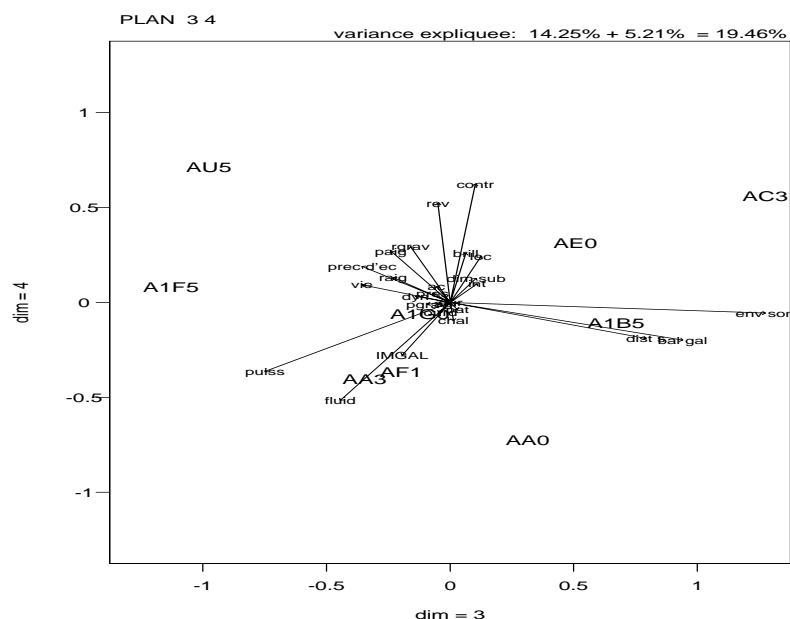


FIG. 6.3- Plan 3/4 de l'analyse en composantes principales (ACP) des réponses aux questionnaires, pour le Concertgebouw Amsterdam. Les questions d'appréciation et de l'interprétation ont été enlevées.

qui influencent ces jugements.

Le premier axe de l'ACP (6.2) différencie surtout la place centrale proche de la scène (AA0, à quatre mètres derrière le chef d'orchestre) et les places lointaines *au parterre* (places AEO et AF1). L'axe est bien corrélé avec la notion de "distance subjective", ce qui pourrait amener à une "lecture géométrique" du plan de l'ACP. Mais on remarque aussi des incohérences par rapport à une telle lecture "géométrique" : les places A1G0 et A1F5, lointaines mais sur le balcon (indiqué par le préfix 1), sont perceptivement très différenciées des places situées au fond du parterre. La place AA3, proche de la scène mais excentrée, se retrouve "reléguée" et perceptivement proche des places au fond du parterre. Le premier axe étant également très bien corrélé avec les questions de "précision d'écoute", de "dynamique" et de préférence subjective ("IMGAL"), l'ACP indique que les places au fond du parterre ont été moins appréciées (à cause d'une diminution de la précision d'écoute et de la dynamique perçues), et le premier axe est formé par le *consensus* sur l'évaluation de ces trois questions ainsi que sur l'évaluation de la question de la distance subjective. En revenant sur l'interprétation géométrique, on peut dire que ce premier axe transcrit les effets *auditifs* d'un éloignement par rapport aux sources sonores — mais cet éloignement n'étant pas uniquement déterminé par la distance par rapport aux sources : un écartement de l'axe central de la salle peut conduire à un effet proche de celui d'un éloignement, et les places au balcon paraissent "rapprochées" par rapport à leur distance géométrique.

Le deuxième axe est très bien corrélé avec les réponses à la question de la "balance générale". La question de la distance subjective est partiellement corrélée avec ce deuxième axe, indiquant que la balance et l'homogénéité sont généralement perçues comme étant meilleurs pour les places *lointaines*. On peut aussi dire qu'un emplacement *central*, c.-à-d. dans l'axe de la salle, devient d'autant plus critique qu'on est proche de la scène. La différenciation sur ce deuxième axe — axe de la balance générale — oppose surtout la place AU5, derrière la scène sur une siège de choriste et A1G0, place lointaine, sur le balcon de face. L'emplacement derrière l'orchestre, ainsi qu'un emplacement désaxé (pour la place AA3), introduit un malus sur la question de la

balance; par contre, l'emplacement en hauteur, sur le balcon, semble apporter un bonus sur cette question.

Le troisième axe (cf. figure 6.3) est légèrement plus difficile à interpréter. Il s'agit, en fait, de la somme de trois effets superposés: premièrement, l'axe est lié à la perception de l'enveloppement sonore (le vecteur "env son" se trouve collinéaire à ce troisième axe); deuxièmement, il s'agit de la composante *opposée* du couple distance subjective / puissance (les deux questions ont été collinéaires sur le premier axe), différenciant la perception de la distance subjective et de la puissance sonore; troisièmement, il s'agit de la composante collinéaire du couple distance subjective / balance, couple opposé sur le deuxième axe. En étudiant les places, on s'aperçoit que la place A1F5 (place dans un coin, loin de la scène et sur le balcon) a une valeur fortement négative sur ce troisième axe. On lui a trouvé une assez grande distance subjective (ce qui correspond à son emplacement géométrique), mais avec une forte puissance sonore.

Le quatrième axe fait apparaître la question de la réverbérance ainsi que la composante opposée du couple contraste / fluidité (la question du contraste a déjà été bien projetée sur le premier axe). En étudiant la question de la réverbérance subjective, on peut observer qu'elle est perçue comme moins grande pour les places proches de la scène (places AA0 et AA3) ainsi que pour la place légèrement couverte par le balcon (AF1), et perçue comme plus grande pour les places lointaines ainsi que pour la place derrière l'orchestre (AU5). Ceci indique déjà que la réverbérance subjective n'est pas identique dans les différentes zones d'écoutes d'une salle et qu'elle est influencée par l'importance du son direct (masquage du champ tardif par le son direct étendu), autant par une diminution du son direct, par l'accroissement de la distance entre les sources et l'auditeur, que par la directivité des instruments d'orchestre.

Si l'on regarde les pourcentages de la variance, expliqués par les différents axes, on se rend compte que plus de la moitié de la variance totale contenue dans les réponses aux questionnaires est expliquée par le premier axe. Les trois premiers axes de l'ACP expliquent déjà 87% de la variance, et plus de 90% de la variance sont expliqués par les quatre premiers axes. En fait, le quatrième axe n'expliquant que 5% de la variance totale, il est discutable si cette axe puisse encore être interprété.

A ce point, on peut déjà faire un résumé des premiers résultats de l'analyse multidimensionnelle effectuée sur les données recueillies dans le Concertgebouw Amsterdam :

nombre d'axes : trois ou quatre axes suffisent pour expliquer la quasi-totalité de la variance contenue dans les réponses aux questionnaires. On se trouve alors dans un cas beaucoup moins "riche" que le cas de la série de tests effectués en laboratoire à l'Ircam ([Lav89]) — le nombre de 3 ou 4 rappelle les résultats similaires obtenus dans beaucoup d'autres études (cf. le chapitre 2 sur l'étude bibliographique). Mais on verra dans le chapitre 8 que la raison principale de cette réduction du nombre d'axes effectif de l'analyse se trouve dans la *corrélation objective* des différents critères acoustiques pour les différents emplacements à l'intérieur de la salle;

identification des axes : le premier axe est fortement lié à la préférence subjective. L'axe traduit surtout les effets d'un éloignement auditif, sur la perception de la précision d'écoute, de la dynamique, mais aussi sur le contraste et les questions de coloration. Le deuxième axe est lié à la perception de la balance générale, le troisième à la perception de l'enveloppement sonore et à la composante opposée du couple distance subjective / puissance. Enfin, le quatrième axe fait apparaître la réverbérance ainsi que le couple opposé contraste / fluidité;

hiérarchisation des axes : le premier axe explique plus de la moitié de la variance totale et traduit les effets les plus significatifs des déplacements à l'intérieur de la salle. La question de la balance générale apparaît déjà sur le deuxième axe — collinéaire avec une composante de la préférence subjective — indiquant que la balance figure très tôt dans la hiérarchie des facteurs perceptifs. Ce résultat est d'autant plus important que la balance est un facteur qui n'a pas été étudié lors des tests en laboratoire effectués à l'Ircam, [Lav89]

[JKWW92] ; pour ces tests uniquement une écoute frontale, dans l'axe des instruments, a été simulée.

6.1.1 Influence des sujets et de l'œuvre

Après l'influence de l'acoustique sur les réponses aux questionnaires, on analysera l'influence des sujets et de l'œuvre écoutée, dans le cas du Concertgebouw Amsterdam. Dans la section précédente, ont été prises en compte les *moyennes*, pour les différentes œuvres, des réponses par place. Maintenant on prend en compte *chaque* questionnaire rempli par un sujet du noyau stable. Pour chaque place, on a donc un questionnaire pour chacune des œuvres écoutées, mais remplis par des sujets différents.

La figure 6.4 suivante montre le plan des deux premiers axes (plan 1/2) de l'ACP sur la matrice correspondante. Les codes s'expliquent de la manière suivante : le code de la place est suivi par un code pour l'œuvre écoutée : B1 pour la première moitié du *War Requiem* de Britten, B2 pour la deuxième moitié du *War Requiem* de Britten, M pour le concerto de piano de Mozart et U pour la symphonie de Bruckner.

On voit que la structure globale du plan de l'ACP est conservée : le premier axe est formé par les composantes collinéaires de la plupart des questions et est fortement corrélé à la préférence subjective ; le deuxième axe est surtout formé par le couple opposé de la balance générale et de la distance subjective. Mais des différences apparaissent aussi. Par exemple, le vecteur de la balance générale a une forte composante collinéaire avec le *premier* axe. En fait, la matrice des réponses individuelles peut s'interpréter avec cinq, sinon six, axes pertinents. Mais, au lieu de rentrer dans les détails sur les changements d'interprétation par rapport aux réponses moyennes par place, on continuera en étudiant la *dispersion* des réponses par place. On remarque que l'ensemble des réponses pour une place (pour différentes œuvres écoutées, et donc pour différents auditeurs) est parfois étonnamment similaire (par exemple les quatre réponses pour la place AA0, à droite de la figure). Compte tenu des intervalles de confiance de chaque questionnaire, calculés dans le dernier chapitre, la cohérence des réponses semble globalement très bonne. On remarque également des exceptions, comme la place AA3 (avec un losange comme sigle). La perception de la qualité acoustique à cette place excentrée semble être très variable, soit à cause d'une influence particulière de l'œuvre, soit à cause des différences d'interprétation des différents auditeurs.

Autrement on remarque l'absence des questionnaires pour la symphonie de Bruckner à gauche de la figure (c.-à-d. faibles valeurs sur le premier axe, lié à la dynamique et à la puissance), avec une accumulation des réponses pour cette œuvre à droite de la figure, indiquant que cette œuvre entraîne des changements dans la perception de la qualité acoustique de la salle.

On conclura que la cohésion des réponses pour différentes œuvres, et pour les différents sujets, est relativement bonne, surtout compte tenu des intervalles de confiance des questionnaires préalablement calculées. Mais des indices d'une forte influence de l'œuvre sont apparues, soit en tant que biais global (pour la symphonie de Bruckner), soit pour des places particulières comme la place AA3, proche de la scène mais excentrée.

6.2 Un autre exemple : la Musikvereinssaal à Vienne - biais global dû à l'œuvre

A la Musikvereinssaal à Vienne, deux concerts *identiques* ont été choisis pour effectuer les tests d'écoute. L'orchestre philharmonique de Vienne interprétait, sous la direction de Daniel Barenboïm, le concerto n° 3 pour piano et orchestre (avec Daniel Barenboïm qui dirigeait à partir du piano) ainsi que la symphonie *Pastorale* de Beethoven. Outre ces deux concerts, on a eu l'occasion d'assister à un concert avec l'*Oratorio de Noël* de Jean-Sébastien Bach, interprété par un orchestre de chambre à effectif orchestral très réduit. Sur place, les auditeurs ont été surpris de constater combien la perception de la qualité acoustique d'une salle peut être transformée par un changement d'œuvre musicale, et doutaient qu'on puisse mélanger des

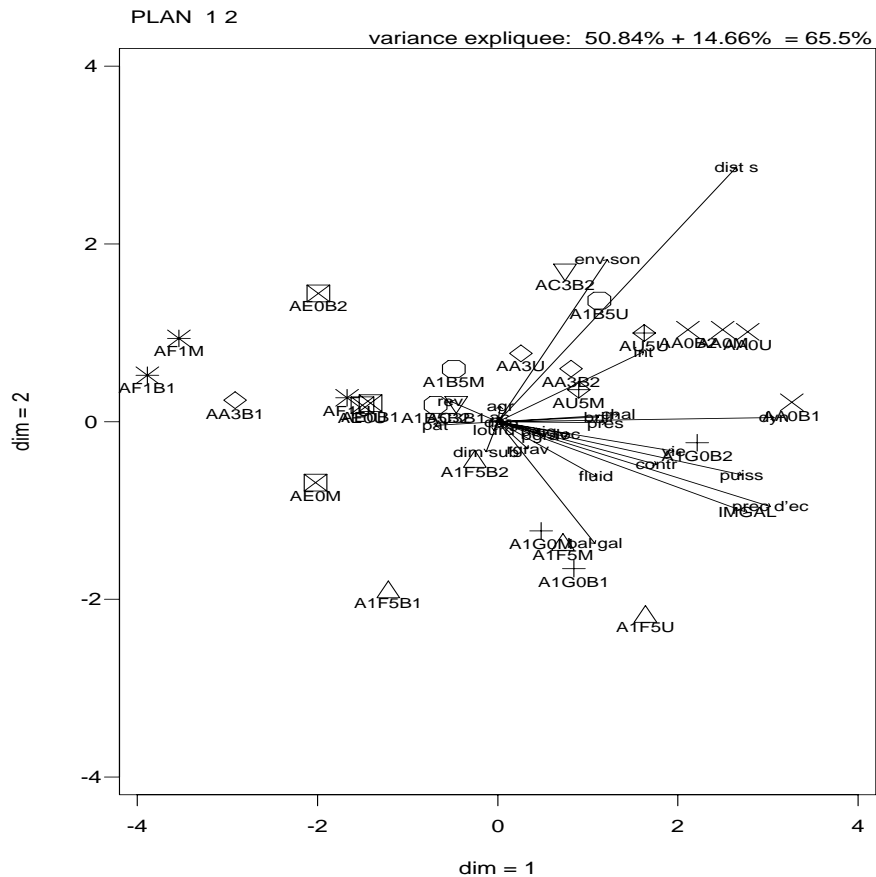


FIG. 6.4 - Plan 1/2 de l'ACP sur les réponses aux questionnaires au Concertgebouw Amsterdam. Les questionnaires correspondants aux places identiques sont marqués par un sigle graphique identique. Le code des questionnaires s'explique de la manière suivante: le code de la place est suivi par un code pour l'œuvre écoutée, B1 pour la première moitié du War Requiem de Britten, B2 pour la deuxième moitié du War Requiem de Britten, M pour le concerto de piano de Mozart et U pour la symphonie de Bruckner.

réponses recueillies par l'écouter d'œuvres différentes. La figure 6.5 montre le plan 1/2 de l'ACP de toutes les places écoutées au Musikvereinssaal de Vienne, séparées pour chaque œuvre. Les codes s'expliquent de manière similaire que dans le cas du Concertgebouw Amsterdam (paragraphe précédent), le code de la place étant suivi par un code pour l'œuvre: B pour Bach, C pour le concerto de piano et P pour la symphonie *Pastorale*. Par contre, les sigles graphique cette fois-ci indiquent les œuvres. Chaque point est la moyenne de deux questionnaires remplis par deux sujets différents (pour la symphonie et le concerto il s'agit de deux concerts identiques, pour Bach il s'agit des deux moitiés du concert).

On notera que les différentes œuvres introduisent un *biais global*, une sorte d'offset général. Les différences introduites par les œuvres sont si importantes qu'il ne reste presque plus de recouvrement entre les places, jugées pendant l'écoute de l'*Oratorio de Noël* de Bach, et les mêmes places, jugées en écoutant la symphonie *Pastorale* de Beethoven. On ne peut certainement plus parler d'un regroupement des places individuelles à travers des œuvres différentes. Des différences perceptives importantes persistent entre le concerto pour piano et orchestre et la symphonie.

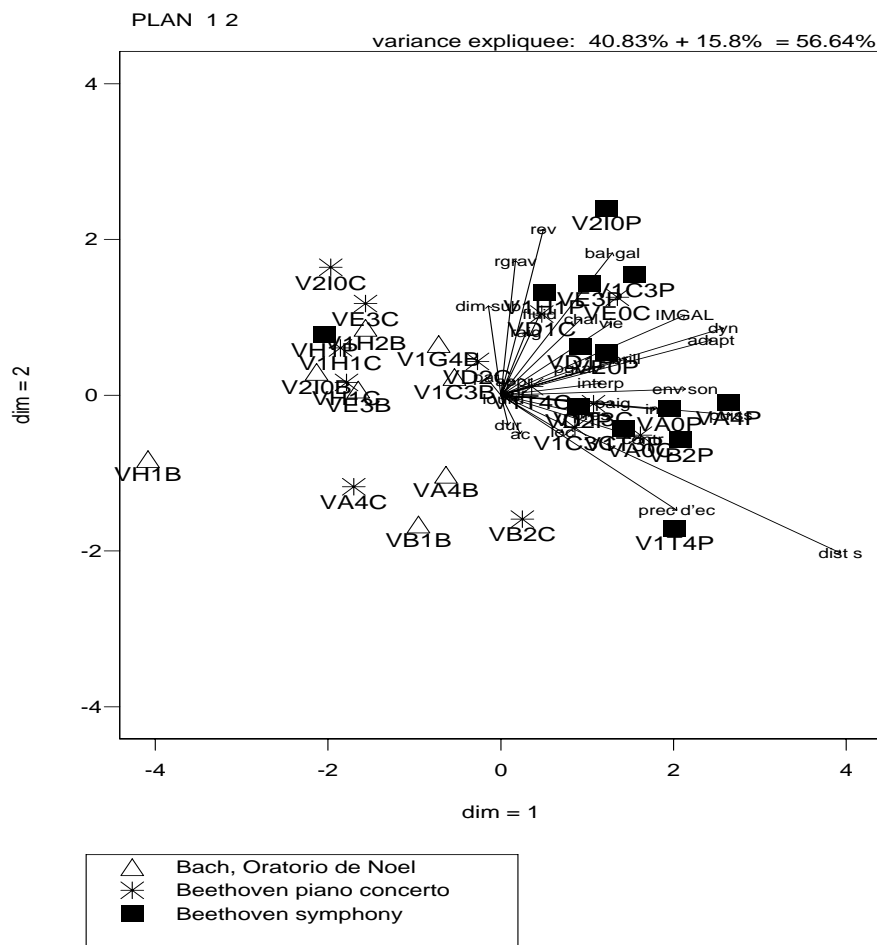


FIG. 6.5 - Plan 1/2 de l'ACP de toutes les places écoutées au Musikvereinssaal de Vienne, séparées pour chaque œuvre. Les codes s'expliquent de manière similaire que dans le cas du Concertgebouw Amsterdam (paragraphe précédent), le code de la place suivi par un code pour l'œuvre: B pour Bach, C pour le concerto de piano et P pour la symphonie Pastorale. Par contre, les sigles graphique cette fois-ci identifient les œuvres: les triangles ouverts l'Oratorio de Noël de Bach, les étoiles le concerto de piano et les carrés remplis la symphonie Pastorale.

L'ensemble des places écoutées a été légèrement différent pour l'oratorio et pour le concerto et la symphonie. Mais, sans entrer dans les détails, on avancera que l'effet principal, introduit par la variation de l'œuvre musicale, porte sur un biais global — la structure des variations à l'intérieur de la salle reste plus ou moins conservée, mais toutes les places (ou la moyenne de la salle) sont affectées, de manière similaire, par le changement de l'œuvre.

Il paraît évident que des critères objectifs doivent être introduits afin de pouvoir expliquer et prendre en compte cet effet de biais global introduit par l'œuvre musicale. On verra dans le chapitre 9 que la puissance acoustique des effectifs orchestraux sur scène — ces effectifs orchestraux constituant la source sonore pendant les tests d'écoute — doit être particulièrement prise en compte.

6.3 Influence de l'œuvre : la Philharmonie de Berlin

Dans la Philharmonie de Berlin — dessiné par l'architecte Hans Scharoun, avec Lothar Cremer pour consultant en acoustique — le public entoure l'orchestre de tous les côtés, ce qui, pour cette grande salle de concert (environ 2.400 places), diminue la distance moyenne entre les spectateurs et les musiciens. Mais cette distribution des places peut conduire (pour les places derrière l'orchestre) à des problèmes d'image orchestrale et à des problèmes liés à la directivité des différents instruments d'orchestre. Il est extrêmement intéressant de lire les comptes rendus de la collaboration entre architecte et acousticien pour ce projet de grande envergure, constituant un départ complet de tout modèle de salle existante. Dès le départ l'architecte voulait que l'orchestre soit au milieu de la salle, entouré par le public, afin de diminuer la séparation musiciens/public et de refléter les changements sociologiques de notre temps. Leur collaboration, extrêmement intense et fructueuse, a débutée dès l'avant-projet, et même les grandes lignes du projet ont été déterminées en tenant compte des exigences acoustiques, une fois que Cremer avait accepté le principe général du public entourant l'orchestre. Connaissant les problèmes de la directivité des instruments de musique, Lothar Cremer avait même étudié l'éventualité de construire des pupitres spéciaux pour chanteurs, adaptés à la situation acoustique et servant d'élément de diffusion proche de la source (pour une documentation : [Cre64, Cre65], cf. aussi [Ber92], [CM82], ou demander à la Philharmonie de Berlin).

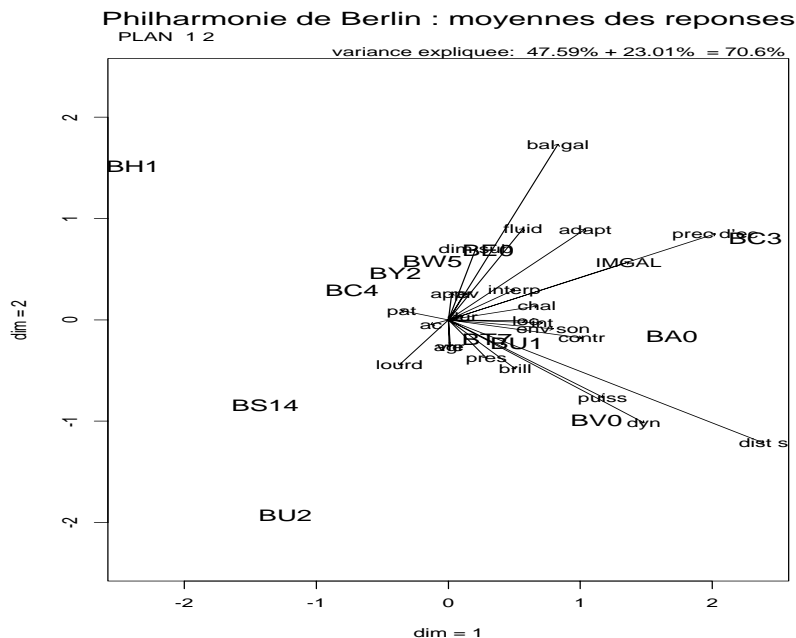


FIG. 6.6 - Plan 1/2 de l'ACP des réponses moyennes, pour la Philharmonie de Berlin. Les variables projetées dans le plan sont calculées à partir des moyennes de chaque place, c.-à-d. six questionnaires remplis pour trois œuvres différentes.

Dans cette salle, nous avons pu écouter deux fois le même concert ; le programme proposait le premier concerto pour piano et orchestre de Johannes Brahms, *Rosamunde*, une musique de ballet de Franz Schubert et les trois pièces pour grand orchestre op. 6 d'Alban Berg.

Dans les figures suivantes on utilisera la possibilité d'une double lecture, inhérente aux ACP : la position des *objets*, dans notre cas les places écoutées, est donnée par les variations des jugements perceptifs entre les places. La distance géométrique entre deux points, dans un plan de l'analyse, correspond à la distance perceptive sur les questions formant les axes de ce plan dans l'espace multidimensionnel. La direction des *flèches*, représentant les questions,

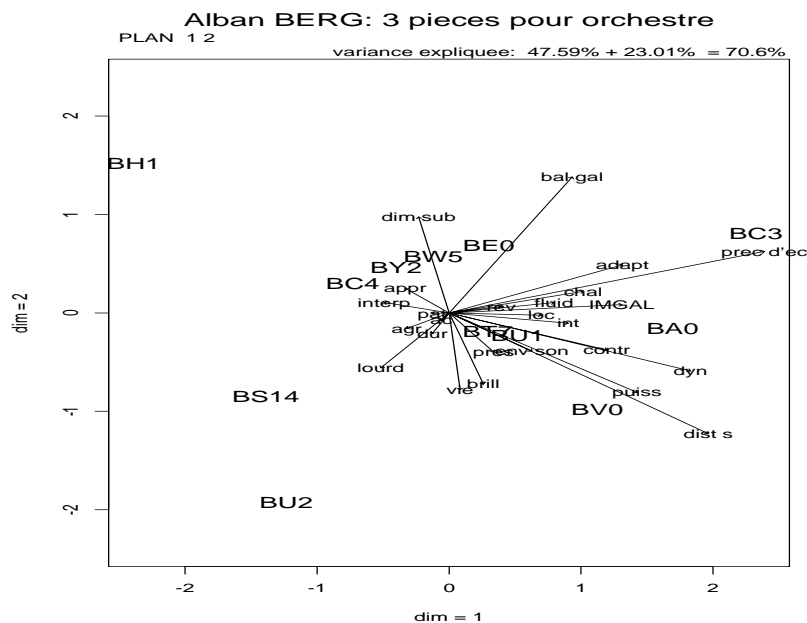


FIG. 6.7 - Plan 1/2 de l'ACP des réponses moyennes, pour la Philharmonie de Berlin (identique à la figure précédente). Par contre, ici, les variables projetées dans le plan sont calculées uniquement à partir des réponses pour les pièces d'orchestre d'Alban Berg, c.-à-d. la moyenne des deux questionnaires remplis pour cette œuvre.

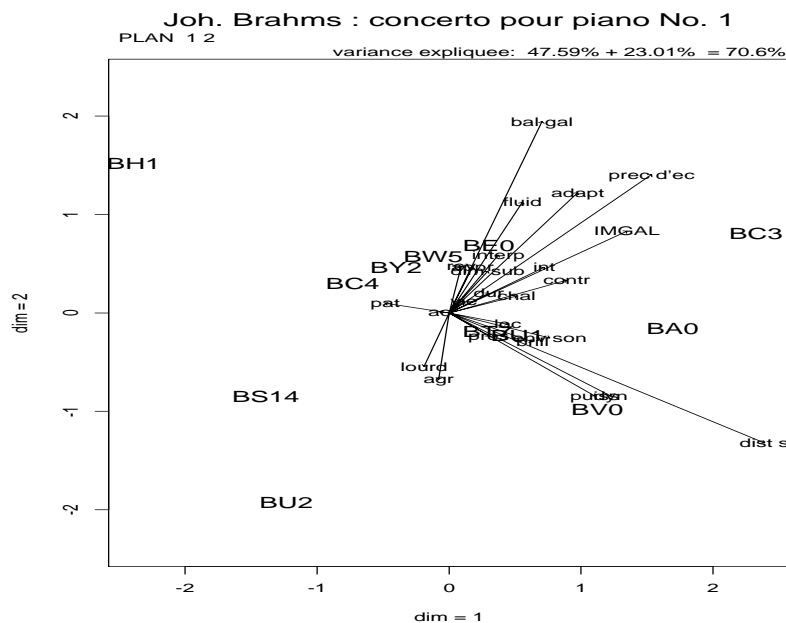


FIG. 6.8 - Plan 1/2 de l'ACP des réponses moyennes, pour la Philharmonie de Berlin (identique à la figure précédente). Par contre, ici, les variables projetées dans le plan sont calculées uniquement à partir des réponses pour le concerto pour piano et orchestre No. 1 de Johannes Brahms, c.-à-d. la moyenne des deux questionnaires remplis pour cette œuvre.

correspond au changement de la position d'un point, dans le plan représenté, par une variation de la réponse sur la question concernée. La longueur de la flèche, ou plutôt la longueur des projections de la flèche sur les axes, correspond à la covariance des réponses aux questions avec les axes du plan, donnés par l'ACP. La définition du point d'arrêt de la flèche, comme la covariance de la variable avec les axes de l'ACP, induit qu'on peut projeter différentes matrices dans l'espace obtenu préalablement par une ACP générale.¹ Pour donner un exemple, on peut projeter les variables *perceptives* dans l'espace issu de l'ACP sur la même matrice des variables perceptives. Mais on peut également projeter des variables *mesurées* dans ce même espace, issu de l'ACP sur la matrice des données perceptives. Ici, on l'utilisera de manière légèrement différente: dans les trois figures suivantes (figures 6.6 à 6.8), le même plan, le plan **1/2** de l'ACP sur les *moyennes* par place, à la Philharmonie de Berlin, est représenté.² Sur ce plan sont projetées les variables perceptives: les *moyennes* par place (figure 6.6), les réponses pour les pièces pour grand orchestre de Berg (figure 6.7) et, enfin, les réponses pour le concerto pour piano de Brahms (figure 6.8).

En étudiant la figure 6.6, calculée à partir de la totalité des jugements (c.-à-d. la moyenne de six questionnaires par place), on découvre une structure similaire à celle de l'ACP du Concertgebouw Amsterdam: le premier axe est formé par les composantes collinéaires de plusieurs questions, notamment la distance subjective et la précision d'écoute, et l'axe est assez bien corrélé avec la préférence subjective (IMGAL). Le deuxième axe est lié à la notion de balance générale, de nouveau indiquant qu'elle figure très tôt dans la hiérarchie des facteurs perceptives.

La projection des réponses aux questionnaires recueillies pour les pièces d'orchestre de Berg ressemble très fortement à la structure de la totalité des réponses. La variance sur la question de la précision d'écoute est légèrement plus grande pour cette œuvre, et la préférence subjective est presque collinéaire avec le premier axe.

Le piano, surtout quand le couvercle est ouvert, est un instrument avec une directivité très prononcée. Cette forte directivité a-t-elle engendré des changements dans la perception de la qualité acoustique? La figure 6.8 montre la projection des réponses aux questionnaires recueillies pour le concerto pour piano et orchestre de Brahms. On se rend compte qu'un certain nombre de variables sont peu affectées par ce changement: notamment la question de la distance subjective, mais aussi les questions de la puissance sonore et de la dynamique. Par contre, des changements importants apparaissent sur d'autres questions: la flèche de la balance générale a augmenté en longueur, indiquant une variance accrue sur cette question pour le cas du piano — la question devient ainsi plus importante dans les jugements des auditeurs. De plus, les vecteurs de la précision d'écoute et de la préférence subjective ont changés de direction, indiquant que ces questions sont évaluées *différemment* pour cette œuvre. Mais, en fait, il s'agit surtout d'une différence d'évaluation de ces questions *pour certaines places*: par exemple, par rapport à l'écoute de l'œuvre de Berg, la place BV0, directement derrière l'orchestre, subit une forte diminution de la précision d'écoute ainsi que de la préférence subjective pour le concerto de piano.³

1. Si l'on ne s'intéresse qu'à la direction des flèches, on peut également utiliser les corrélations au lieu des covariances. L'utilisation des covariances présente l'avantage que la longueur des flèches est représentative de l'importance relative de la variable projetée. Pour ceci il est nécessaire que la variance ait un sens, ce qui ne paraît pas évident pour les mesures objectives. Pour donner un exemple, la variance des mesures de temps de réverbération change si on le mesure en secondes ou en millisecondes. Les valeurs mesurées doivent alors être *pondérées* par la sensibilité du critère, qui doit être connue *a priori*.

2. On utilisera donc cet espace pour *forcer* la structure du plan représenté.

3. La valeur de la précision d'écoute (sur une échelle de 6 unités perceptives), pour la place BV0, est de 5,7 pour Berg et de 4,3 pour Brahms; pour la préférence subjective (échelle de 5 unités perceptives) la valeur, de 4,8, pour Berg, diminue à 3,7 pour le concerto de Brahms. L'étendue des réponses sur la question de la balance générale est de 1,7 unités perceptives pour les pièces de Berg et de 3,3 unités perceptives pour le concerto de piano de Brahms.

6.4 Conclusions préliminaires sur l'influence de l'œuvre

L'analyse des réponses au Concertgebouw Amsterdam (chapitre 6.1) a pu démontrer que la cohérence des jugements des différents auditeurs, pour des œuvres suffisamment similaires, semble, en général, plutôt bonne. Ceci confirme, *a posteriori*, l'efficacité du processus d'itération des réponses brutes et la validité du choix de départ que chaque place soit écoutée par un sous-ensemble différent d'auditeurs. Il faut néanmoins pondérer ce résultat globalement positif en signalant que la cohérence des sujets n'apparaît que *relativement* bonne, les intervalles de confiance, calculées dans le chapitre 5.6.1, restant assez importants. De plus, une influence de l'œuvre ainsi qu'une variabilité accrue de la perception de la qualité acoustique sur certaines places ont été constatées.

L'étude du cas de la Musikvereinssaal à Vienne a démontré l'importance d'un biais global qui peut être introduit par une variation de l'œuvre musicale écoutée. Outre ce biais global, l'analyse des réponses pour les différentes œuvres écoutées dans la Philharmonie de Berlin a montré que l'influence de l'œuvre peut fortement dépendre de *la place précise*. Il est donc essentiel que le biais global et cette variation de l'influence de l'œuvre en fonction de la place (respectivement les termes $\mathcal{G}(o_m)$ et $\mathcal{I}(i_{m,k})$ dans l'équation 5.13 soient inclus dans un modèle complet objectif cherchant à expliquer les réponses aux questionnaires.

6.5 Etude qualitative de l'influence de l'œuvre

Afin de préciser les influences des différentes œuvres sur les réponses aux questionnaires, une première étude a été menée en étudiant *les différences significatives* entre les réponses aux questionnaires pour les différentes œuvres dans une même salle.

Il existe deux manières d'établir les différences significatives. La première méthode consiste à considérer, pour chaque question, les *ensembles* de réponses pour les différentes œuvres comme des ensembles distincts et de calculer si les moyennes par œuvre sont différentes de manière significative (le seuil de signifiante a été mis à une probabilité de différence de plus de 95%). Cette méthode applique une contrainte très forte car les jugements aux différentes places sont considérés sans prendre en compte les variations entre ces places, dus aux changements de l'acoustique entre elles.

La deuxième méthode consiste à calculer les *différences* entre les réponses pour les différentes œuvres, pour *chaque place identique*, et de vérifier si cette différence est, en moyenne, significativement différente de zéro. En calculant les différences des jugements pour chaque place, et en se limitant aux places qui ont été écoutées pour les différentes œuvres, l'influence de l'acoustique peut être éliminée.

Cette étude qualitative va permettre d'examiner les influences de l'œuvre sur la perception de la qualité acoustique. Il s'agit, d'un côté, d'établir les questions les plus affectées par un changement de l'œuvre et, d'autre part, de rechercher des paramètres candidats afin de décrire l'influence de l'œuvre de manière objective.

On limitera cette étude aux quatre salles de concerts incluses dans la campagne européenne. Dans ces salles, les variations de l'œuvre ont été les plus importantes, tandis que dans les opéras, dans la plupart des cas, une seule œuvre a été écoutée. Les données recueillies lors des tests d'écoute dans la salle de La Villette seront utilisées dans la section suivante, afin de trouver un modèle de réduction du nombre de questions, mais également des relations *internes* entre les différentes questions du questionnaire.

6.5.1 Différences significatives d'ensemble

Pour les tests d'écoute au Concertgebouw Amsterdam, aucune différence significative n'a été observée, indiquant, ici encore, que les œuvres écoutées dans cette salle, au moins en ce qui concerne leur influence sur la perception de la qualité acoustique, ont été raisonnablement similaires. Dans la Philharmonie de Berlin, on note deux influences : premièrement, le concerto

Salle	Concertgebouw Amsterdam				Philharmonie de Berlin			Salle Pleyel					Musikvereinssaal Vienne		
	BRI1/ BRI2	BRI1/ MOZ	BRI1/ BRU	MOZ/ BRU	BRA/ BERG	BRA/ SCHU	SCH/ BERG	BEE/ MOZ	BEE/ PRO	DUT/ MOZ	MOZ/ PRO	PRO/ ROS	BACH/ BEE	BACH/ CONC	BEE/ CONC
puiss							-0.80		-0.89	1.06	-1.49	1.21	-0.92		
dyn													-1.03		
rev															
dim sub															
env son											-1.09		-0.75		
int															
chal															
vie												-0.83	-0.48		
brill													-0.43		
pat					0.24	0.22									
lourd															
ac															
agr															0.12
dur						0.11									
dist s											-1.64	1.50			
loc															
pres										0.38	-0.44		-0.24		
prec d'ec															
contr												-1.11			
fluid								0.94		0.78					
rgrav															
raig															
pgrav								0.51		0.53	-0.79		-0.34		
paig															
IMGAL													-0.8		0.47
bal gal						-0.59									
adapt												-0.98	-1.20	-0.55	0.65
interp									-0.56				-0.65	-0.81	
appr										-0.78					

TAB. 6.1 - Différences significatives entre les ensembles de réponses, recueillies par œuvre, pour des couples d'œuvres dans les différentes salles de concert.

pour piano et orchestre de J. Brahms entraîne une perception accrue du défaut de pâteux et la balance générale est jugée comme étant moins bonne; en analysant les places individuelles, on remarque que ces influences sont surtout prononcées pour les places sur des côtés et derrière l'orchestre. Deuxièmement, une différence apparaît sur la puissance sonore entre la musique de ballet *Rosamunde* de F. Schubert et les pièces pour orchestre de A. Berg, traduisant la différence importante des effectifs orchestraux employés dans les deux œuvres. Dans la Salle Pleyel, pour le concerto pour piano et orchestre de W.A. Mozart, l'acoustique de la salle est perçue comme moins fluide que pour les autres œuvres. Il semble que les attaques "dures" ou "heurtées" du piano sont particulièrement perçues dans cette salle avec des murs extrêmement lisses.⁴ Sur plusieurs couples d'œuvres, une différence significative peut être observée entre les réponses concernant la question de la puissance sonore. Et quand la différence de la perception de la puissance sonore devient trop importante, cela entraîne des différences significatives également sur d'autres questions, sur la puissance dans les graves (pgrav), sur la distance subjective et sur la présence. Les réponses à ces questions semblent fortement liées à celles sur la puissance sonore. On a pu observer le même effet pour l'œuvre de Bach dans la Musikvereinssaal de

4. Les tests d'écoute à la Salle Pleyel ont eu lieu avant l'installation des panneaux diffusants, effectuée pendant l'été 1994.

Vienne. Par ailleurs, nous avons été surpris de voir apparaître des différences très grandes sur la préférence subjective de *l'acoustique* de la salle à Vienne en fonction de l'œuvre écoutée.

6.5.2 Différences significatives pour des places identiques

Salle	Concertgebouw Amsterdam				Philharmonie de Berlin			Salle Pleyel					Musikverein Vienne	
	BRI1/ BRI2	BRI1/ MOZ	BRI1/ BRU	MOZ/ BRU	BRA/ BERG	BRA/ SCU	SCH/ BERG	BEE/ MOZ	BEE/ PRO	DUT/ MOZ	MOZ/ PRO	PRO/ ROS	BACH/ BEE	BEE/ CONC
puiss	-0.66	<u>0.59</u>	-0.46	<u>-0.78</u>	<u>-0.66</u>	0.14	<u>-0.8</u>	<u>0.81</u>	<u>-0.91</u>	<u>1.05</u>	<u>-1.46</u>	<u>1.08</u>	<u>-0.67</u>	<u>0.52</u>
dyn	-0.55	<u>0.68</u>	-0.45	<u>-0.92</u>	-0.31	-0.04	-0.26	0.44	-0.04	0.27	-0.55	0.01	<u>-1.02</u>	0.41
rev	-0.21	-0.10	-0.37	-0.31	<u>-0.56</u>	<u>-0.42</u>	-0.14	<u>1.03</u>	0.32	-0.16	-0.20	0.02	<u>-0.63</u>	0.10
dim sub	-0.19	0.34	0.09	-0.25	<u>-0.25</u>	-0.10	-0.15	0.21	0.18	-0.27	0.06	-0.03	-0.17	0.12
env son	-0.51	-0.32	<u>-0.63</u>	-0.28	<u>-0.52</u>	-0.27	-0.26	<u>0.91</u>	-0.49	0.55	<u>-1.08</u>	<u>0.58</u>	<u>-0.76</u>	0.34
int	-0.56	-0.41	<u>-0.61</u>	-0.08	-0.06	0.04	-0.10	-0.12	-0.31	-0.13	-0.31	<u>0.28</u>	<u>-0.44</u>	0.18
chal	<u>-0.28</u>	-0.25	-0.34	-0.16	-0.04	0.12	-0.16	<u>0.57</u>	-0.16	0.35	-0.43	0.27	<u>-0.46</u>	0.13
vie	-0.03	0.16	0.13	0.02	-0.25	<u>-0.23</u>	-0.02	0.35	-0.66	0.51	<u>-0.85</u>	<u>0.38</u>	<u>-0.67</u>	<u>-0.30</u>
brill	-0.32	0.00	-0.31	-0.12	<u>-0.37</u>	-0.13	-0.24	0.45	-0.26	0.31	-0.40	0.05	<u>-0.52</u>	0.18
pat	-0.10	-0.04	0.14	0.23	<u>0.24</u>	<u>0.22</u>	0.03	-0.21	0.12	-0.32	0.32	0.02	-0.01	-0.14
lourd	-0.17	-0.06	0.01	0.00	-0.02	0.06	-0.08	-0.04	0.09	-0.03	0.14	-0.05	0.03	0.04
ac	0.00	0.01	0.00	-0.05	0.01	-0.04	0.05	-0.03	0.09	-0.08	0.21	-0.01	-0.02	-0.02
agr	0.01	0.01	-0.03	-0.13	-0.13	0.07	-0.20	0.05	-0.26	0.20	<u>-0.27</u>	<u>0.28</u>	-0.01	0.12
dur	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.11	-0.05	-0.03	-0.21	0.17	-0.24	0.25	0.04	-0.04
dist s	<u>-1.11</u>	-0.35	-0.57	-0.16	-0.52	-0.40	-0.12	<u>1.15</u>	-0.61	<u>0.79</u>	<u>-1.60</u>	<u>1.53</u>	<u>-0.58</u>	<u>0.53</u>
loc	-0.06	-0.12	<u>-0.46</u>	-0.16	0.00	0.07	-0.08	-0.17	-0.31	0.08	-0.18	0.09	-0.06	0.15
pres	-0.08	0.09	-0.15	-0.15	-0.01	0.05	-0.06	0.27	-0.24	<u>0.36</u>	<u>-0.45</u>	<u>0.45</u>	<u>-0.24</u>	0.14
prec d'ec	0.42	-0.44	<u>-0.72</u>	<u>-0.29</u>	-0.24	-0.17	-0.07	0.17	-0.83	<u>0.83</u>	<u>-1.15</u>	<u>0.83</u>	-0.25	<u>0.67</u>
contr	0.00	-0.18	-0.35	-0.24	-0.17	-0.08	-0.09	0.71	-0.34	<u>0.76</u>	<u>-1.05</u>	<u>0.89</u>	<u>-0.47</u>	0.10
fluid	0.40	0.17	0.24	-0.04	0.06	-0.21	0.27	<u>0.99</u>	0.2	0.63	-0.56	0.04	-0.39	0.30
rgrav	-0.25	-0.12	-0.23	0.00	NA	NA	NA	<u>0.38</u>	-0.19	0.04	-0.28	0.35	<u>-0.58</u>	0.08
raig	<u>0.21</u>	<u>0.19</u>	0.09	-0.07	NA	NA	NA	0.14	-0.09	0.04	0.01	-0.18	<u>-0.26</u>	0.07
pgrav	-0.17	0.07	-0.16	-0.19	NA	NA	NA	<u>0.51</u>	<u>-0.50</u>	<u>0.50</u>	<u>-0.78</u>	<u>0.51</u>	-0.41	0.15
paig	-0.25	-0.07	<u>-0.37</u>	-0.26	NA	NA	NA	0.17	<u>-0.57</u>	0.37	<u>-0.54</u>	0.33	-0.25	0.14
IMGAL	0.02	-0.19	-0.42	-0.01	-0.30	-0.11	<u>-0.18</u>	0.33	-0.25	<u>0.75</u>	<u>-0.71</u>	0.22	<u>-1.25</u>	<u>0.47</u>
bal gal	0.02	-0.52	<u>-0.90</u>	0.30	<u>-0.61</u>	<u>-0.59</u>	-0.01	<u>0.73</u>	-0.19	<u>0.84</u>	<u>-0.89</u>	0.19	<u>-0.9</u>	0.49
adapt	-0.39	0.16	-0.50	-0.08	-0.49	-0.03	<u>-0.46</u>	0.26	-0.43	0.84	-0.91	0.29	<u>-1.33</u>	<u>0.65</u>
interp	-0.06	-0.66	-0.31	<u>0.49</u>	0.11	0.02	0.09	-0.40	-0.44	-0.10	0.06	0.34	<u>-0.72</u>	-0.16
appr	0.14	0.24	0.31	0.21	-0.16	0.18	-0.34	-0.21	0.79	<u>-0.93</u>	0.84	-0.17	-0.30	-0.25

TAB. 6.2 - Différences moyennes des réponses recueillies pour des couples d'œuvres. Uniquement les couples d'œuvres ayant provoqué les différences les plus significatives sont représentés. Les différences **significatives** sont indiquées en gras et soulignées. Les comparaisons sont restreintes sur les places strictement identiques sur les deux œuvres formant un couple. Les valeurs pour la balance spectrale sont manquantes (NA) pour la Philharmonie de Berlin, ces questions étant ajoutées au questionnaire après le déroulement des tests à Berlin.

Le tableau 6.2 donne la moyenne des différences entre les réponses pour quelques couples d'œuvres, écoutées dans la même salle. Dans chaque cas, les différences des réponses ont été calculées pour le sous-ensemble des places *identiques* pour les deux œuvres. Habituellement cet ensemble est plus réduit que l'ensemble des places écoutées, pour deux raisons :

- seuls les sujets appartenant au noyau stable des tests d'écoute de la campagne européenne sont inclus dans l'analyse. Si une place a été occupée par un autre sujet pour l'une des deux œuvres du couple, cette place n'est plus considérée dans le calcul de la différence moyenne ;

- dans certains cas, les ensembles de places pour les deux concerts écoutés n'étaient pas strictement identiques car certaines places n'étaient pas disponibles pour l'un des concerts. La différence moyenne est calculée uniquement sur l'ensemble des places strictement identiques.

En calculant les différences sur les places identiques, on élimine l'influence de l'acoustique. Par contre, le bruit dû aux sujets ainsi que l'influence de l'*interaction* entre l'œuvre et l'acoustique sont toujours contenus dans les différences par place. Afin d'établir la pertinence statistique de la différence moyenne, la différence est calculée *par place identique* et on vérifie si la moyenne de ces différences est statistiquement différente de 0, avec une probabilité supérieure à 95% (les différences significatives sont indiquées en gras dans le tableau 6.2). Mais, indépendamment du fait que la différence moyenne est significative, l'œuvre peut avoir une influence particulière sur certaines places, ou au moins une influence plus ou moins forte selon les places.

L'étude doit donc comporter deux volets :

- 1° une étude des différences significatives : sur quels couples d'œuvres et pour quelles questions apparaissent ces différences ? De plus, y a-t-il des liens entre des questions qui sont simultanément affectées ?
- 2° une étude des différences en fonction de l'emplacement exact, afin d'étudier les effets de l'interaction œuvre/place.

Etude des différences moyennes

Par rapport au tableau 6.1, on remarque surtout que le nombre de différences significatives est largement accru, ce qui n'est pas très surprenant et démontre uniquement l'efficacité de l'élimination de l'influence de l'acoustique.

Sur la question de la puissance sonore, on constate des différences importantes, souvent significatives. Ces variations sur la perception de la puissance sonore semblent très fortement liées à des changements de l'*effectif orchestral sur scène*.⁵

Les variations sur quelques autres questions sont très fortement liées à la variation de la puissance sonore. Il s'agit surtout des questions sur la distance subjective, sur la dynamique, la présence, la précision d'écoute et sur la préférence subjective. Si ces liens s'avèrent fiables, est-il possible de réduire le nombre des questions, et donc le nombre de paramètres libres, du questionnaire ? Le but est d'éliminer les redondances contenues dans le questionnaire de départ (ce questionnaire comprenait 29 questions, bien plus que d'autres questionnaires utilisés dans la littérature, notamment celui de Barron, cf. [Bar88] ou le chapitre 2.14.2) et de *prédire* les réponses sur la totalité des questions à partir d'un jeu réduit de questions. La question de la puissance sonore, qui montre de fortes variations et semble influencer d'autres questions, est un premier candidat pour ce jeu réduit.

Sur la question de la réverbérance, des différences significatives apparaissent pour plusieurs couples d'œuvres. Dans chacun de ces couples, il apparaissait soit un concerto pour piano et orchestre (de Brahms à la Philharmonie de Berlin, de Mozart à la Salle Pleyel) soit une œuvre avec une forte importance de la voix (*Oratorio de Noël* de Bach à Vienne). Le piano comme la voix humaine chantée sont des instruments très *directifs*. Ils alimentent donc moins efficacement le champ tardif, diminuant ainsi le niveau relatif de la réponse tardive de la salle. La même tendance (la différence n'étant pas significative à 95%) peut être constatée pour le couple concerto pour piano et orchestre de Mozart / symphonie de Bruckner dans le Concertgebouw Amsterdam. Pour le *War Requiem* de Britten, la réverbérance est au moins aussi faible, sinon plus, que pour le concerto de piano de Mozart. Cela peut s'expliquer par la présence des chanteurs solistes dans cette œuvre, mais par le fait que cette œuvre a été composée pour la Cathédrale de Coventry — un espace très fortement réverbérant. Ceci indique que la perception de la réverbérance peut aussi être influencée par l'écriture musicale. Mais, au moins pour les cas rencontrés

5. A première vue il semble y avoir une exception : la puissance sonore perçue pour les deux moitiés du *War Requiem* de Benjamin Britten, au Concertgebouw Amsterdam, est très différente. Mais une consultation de la partition de l'œuvre démontre qu'en fait les effectifs orchestraux utilisés dans les deux moitiés sont différents.

dans cette campagne de tests d'écoute, l'influence de l'écriture musicale reste inférieure à l'influence de la directivité (qui peut être objectivée par un indice de directivité, éventuellement en fonction de la fréquence) de certains instruments de l'effectif orchestral. Un cas très intéressant se présente avec le concerto pour piano et orchestre de Beethoven à la Musikvereinssaal à Vienne : en comparant la symphonie de Beethoven et le concerto de piano, on remarque que la réverbérance subjective perçue pour ces deux œuvres est sensiblement *identique*. Mais, dans ce cas, le couvercle du piano a été retiré et l'instrument tourné vers l'orchestre, afin de permettre au pianiste Daniel Barenboïm de diriger l'orchestre en même temps qu'il interprète la partie de piano solo. Dans ce cas, non seulement la directivité du piano est moins prononcée, mais le lobe principal d'émission est déplacé et orienté vers le plafond.

La question sur l'enveloppement sonore semble surtout liée à la puissance sonore, mais également à la réverbérance. Les questions sur la coloration sont surtout liées à la puissance sonore, mais également à la balance spectrale (puissance sonore et réverbérance dans les graves et dans les aigus). L'apparition de défauts (pâteux, lourd, acide, agressif et dur) semble plus liée à des œuvres spécifiques : le terme pâteux lorsqu'il s'agit du concerto pour piano et orchestre de Brahms, pour les places derrière l'orchestre dans la Philharmonie de Berlin ; le terme agressif lors de *Cinderella* de Prokofiev, avec un effectif important de cuivres et d'instruments de percussion.

Les questions sur la précision d'écoute et le contraste sont également liées à la question sur la puissance sonore. Mais ce lien n'est pas parfait : une diminution de la puissance sonore *peut* amener à une réduction de la précision d'écoute et du contraste, mais ce comportement n'est pas semblable dans tous les cas (cf. par exemple les couples Britten1/Mozart à Amsterdam et Schubert/Berg à Berlin). Il existerait donc une influence *supplémentaire* sur ces questions.

La question sur la fluidité (et l'apparition d'un son heurté pour le concerto de piano à la Salle Pleyel) a déjà été discutée dans le paragraphe précédent. Elle doit être traitée *indépendamment* des autres questions.

Les questions sur la balance spectrale (puissance et réverbérance dans les graves et les aigus) sont liées à celles sur la puissance sonore et la réverbérance, ce qui n'est pas surprenant. Mais, comme pour les questions sur la précision d'écoute et le contraste, ce lien ne semble pas couvrir toutes les influences. Notamment sur les questions concernant la puissance et la réverbérance dans les aigus, on remarque une influence des détails de l'effectif orchestral, principalement dans l'utilisation des cuivres.

La préférence subjective, ainsi que la question sur l'adaptation de l'œuvre à la salle, sont surtout liées à la puissance sonore, mais on relève, de nouveau, une influence supplémentaire d'autres paramètres.

La question sur la balance générale doit être considérée comme une question indépendante. Comme pour la question sur la réverbérance, un lien avec une forte directivité de certains instruments de l'effectif orchestral semble apparaître.

Finalement, les questions concernant l'interprétation et l'appréciation de l'œuvre musicale sont — heureusement — relativement indépendantes des autres questions et des paramètres objectifs.

On peut résumer les résultats principaux de manière globale, comme suit :

liens entre questions : de forts liens entre les variations sur certaines questions ont été identifiés. Au moins en ce qui concerne l'influence de l'œuvre musicale sur les réponses, il semble possible de procéder à la définition d'un modèle de relations entre les différentes questions du questionnaire, afin de réduire le nombre de questions et donc des variables libres. Ce modèle sera établi dans le paragraphe 7 suivant ;

liens avec des paramètres objectifs : il semble qu'un nombre réduit de paramètres peuvent suffire à expliquer les influences de l'œuvre musicale sur les réponses aux questionnaires. De plus, la plupart de ces paramètres sont plus liés à l' *orchestration* qu'à l' *écriture musicale* et donc, en principe, objectivables. Les premiers candidats pour une description objective de l'œuvre musicale sont :

- l'effectif orchestral et sa puissance acoustique ;

- la directivité moyenne de cet effectif orchestral et/ou des instruments solistes employés dans l'œuvre;
- l'utilisation d'instruments riches en harmoniques (cuivres, instruments de percussion) ou en basses fréquences (tuba, trombone, manque de basses fréquences pour les instruments baroques);
- utilisation d'instruments ayant des attaques très prononcées (piano, instruments de percussion) — la question persiste si, dans ce critère, une forte influence résiduelle de l'écriture musicale devait également apparaître.

6.6 Analyse de l'interaction entre acoustique et œuvre

Dans le dernier paragraphe, on a vu que les réponses à plusieurs questions du questionnaire sont significativement influencées par certains paramètres liés à l'œuvre musicale et, surtout, à l'effectif orchestral employé dans l'œuvre. Ces paramètres influencent-ils les différentes places à l'intérieur d'une salle de la même manière — ou cette influence, agit-elle surtout sur certaines places?

Dans le chapitre 5 sur les considérations théoriques (équations 5.11 à 5.13) on a séparé les différentes influences. Les différences moyennes, étudiées dans le dernier paragraphe, correspondent aux *biais globaux* introduits par l'œuvre musicale: $\mathcal{G}(o_m)$. Maintenant, la question est de savoir s'il suffit de considérer uniquement le biais global de l'œuvre, ou s'il faut conserver la notation d'un biais de l'œuvre dépendant de la place écoutée: $\mathcal{G}(o_{m,k})$. Dans la terminologie de l'équation 5.13, il faut comparer l'importance relative des deux contributions $\mathcal{G}(o_m)$ et $\mathcal{I}(i_{m,k})$: les deux contributions sont-elles de même ordre de grandeur ou, l'une des deux contributions est-elle négligeable par rapport à l'autre. L'étude décrite dans le dernier paragraphe a prouvé que le biais global dû à l'œuvre, $\mathcal{G}(o_m)$, n'est pas négligeable. En est-il de même pour le terme de l'interaction œuvre/place, $\mathcal{I}(i_{m,k})$?

6.6.1 Etude des différences par question, en fonction de la place

Malheureusement, il est impossible de reproduire les données nécessaires (et utilisées) pour effectuer cette étude des différences, faute de place. Pour chaque couple d'œuvres et pour chaque question, on calcule la différence entre les réponses pour les places identiques, nous avons donc une matrice par couple d'œuvres, ce qui nous donne plus d'une dizaines de matrices. Compte tenu du faible nombre de réponses par œuvre par place (soit une, soit deux, pour les concerts doublés, deux), les données sont difficilement interprétables car les intervalles de confiance deviennent très larges. On se limitera alors à la description des résultats principaux. Plus loin dans ce chapitre, des analyses en composantes principales (ACP), permettant une vue plus synthétique, seront utilisées afin de quantifier l'effet de l'interaction acoustique/œuvre par salle.

Un effet de l'importance de l'effectif orchestral peut être constaté sur *toutes* les places d'une salle. De la même manière, l'utilisation d'instruments directifs conduit à une réduction de la réverbérance subjective de la salle, pour la totalité des places. Par contre, ces effets globaux n'empêchent pas l'apparition de nombreux effets de l'interaction œuvre/place:

- dans le cas du concerto pour piano et orchestre de Brahms à la Philharmonie, de fortes influences sur les places spécifiques sont constatées: autant la diminution de la réverbérance apparaît pour toutes les places, le défaut d'un effet pâteux apparaît particulièrement pour les places derrières; ces places sont également jugées avec un enveloppement sonore plus faible et une balance générale moins bonne;
- la question de la puissance sonore est influencée non seulement par la puissance acoustique de l'effectif orchestral, mais également, pour les effectifs avec des instruments ayant une directivité prononcée, par la direction par rapport aux sources orchestrales;

- dans la salle Pleyel, une forte dépendance de l'emplacement et de la directivité des sources a été constatée: pour la symphonie de Beethoven, avec un nombre important de pupitres de cordes situés à l'avant-scène, la puissance est jugée élevée, surtout pour les places parterre; pour l'œuvre de Prokofiev, avec un nombre important de cuivres, la puissance est jugée identique aux places parterres, mais nettement plus élevée pour les places aux balcons. Cette influence sur la puissance affecte également les jugements sur la distance subjective;
- l'importance de l'effectif orchestral affecte les places proches et lointaines de manière différente, entraînant souvent des variations plus importantes pour les places lointaines.

L'importance de la plupart des effets d'interaction sus-mentionnés reste pourtant faible par rapport aux variations rencontrées pour les biais globaux. On conclura en disant que les effets locaux de l'interaction œuvre/place sont généralement moins importants que les biais globaux introduits par l'œuvre musicale et son effectif, bien que les effets de cette interaction restent non négligeables.

6.6.2 Éléments théoriques

Reprenons la notation du chapitre 5. L'équation 5.13 sépareit, le plus possible, les différentes influences sur les réponses aux questionnaires :

$$q = \mathcal{H}(s_j) + \mathcal{G}(o_m) + \mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}. \quad (6.1)$$

Dans le chapitre 5 le terme $\mathcal{H}(s_j)$ a été enlevé par le processus d'itération des réponses brutes et un changement des réponses q_i brutes pour les réponses q_i itérées. a été effectué Le terme \mathcal{R} , décrivant le bruit résiduel contenu dans les réponses, a pu être estimé et mène à des intervalles de confiance pour les réponses aux questionnaires.

Dans le dernier paragraphe sur les différences moyennes introduites par l'œuvre, le terme $\mathcal{G}(o_m)$ a pu être trouvé, mais, il a uniquement été possible de le déterminer en *relatif* sur des couples d'œuvres, et ce seulement à l'intérieur d'une même salle. Si on ne dispose pas d'une description de l'œuvre à partir des paramètres *objectifs*, il est difficile de transformer ces valeurs relatives en valeurs absolues utilisables pour toutes les salles. Une telle description, au moins partielle, ainsi que des résultats obtenus, seront fournis dans le chapitre 10 ultérieur.

Par contre, on peut enlever l'influence moyenne de l'œuvre, $\mathcal{G}(o_m)$, en utilisant les *moyennes* des réponses par œuvre: les réponses aux questionnaires sont séparés pour chaque œuvre. On obtient une matrice *par œuvre* pour les places occupées pendant son écoute (dans une salle donnée). Ensuite, chaque matrice est individuellement centrée, c.-à-d. que l'on enlève la moyenne de chaque question pour chaque œuvre et, ainsi, la moyenne devient nulle. On se focalise alors sur les différences notées à l'écoute d'une même œuvre dans une même salle, donc à des intervalles très rapprochés.⁶ Ces matrices par œuvre peuvent ensuite être raccordées afin de construire des matrices plus grandes (sur toutes les œuvres écoutées dans la totalité des salles, ou, par exemple, uniquement dans les salles de concert). On utilisera les matrices qui en résultent afin d'étudier les correspondances entre les réponses et la caractérisation objective des places, sachant que toute influence moyenne des différentes salles a également été enlevée, et que seules sont considérées les variations des réponses en fonction de la place à l'intérieur d'une même salle.

Ces matrices contiennent encore l'influence des trois termes $\mathcal{G}(o_m)$, $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} . Le terme \mathcal{R} étant irréductible, le dernier problème repose alors dans le terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$ décrivant l'interaction entre l'œuvre et l'acoustique. Dans le dernier paragraphe on a constaté que l'importance de ce terme d'interaction est, dans la plupart des cas, plus faible que celle de l'influence moyenne de l'œuvre et de son orchestration — mais que cette influence est loin d'être négligeable. On

6. On s'affranchit d'éventuelles différences d'échelle entre les changements dans une même salle (à des courts laps de temps) et ceux qui ont lieu entre différentes salles (laps de temps nettement plus grand).

s'interroge sur la nécessité d'éliminer ce terme afin d'étudier la correspondance des réponses avec les critères acoustiques.

Faute de données suffisantes, le terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$ reste impossible à déterminer avec un degré de confiance suffisant. La justification de l'estimation de ce terme doit donc être donnée *a posteriori* par une amélioration de la correspondance perception/critères acoustiques. Un autre moyen de vérification se trouve dans l'analyse de la variance contenue dans les réponses. Reprenons l'équation 6.1 et calculons la variance sur cette équation, en utilisant l'additivité de la variance:⁷

$$\text{VAR}(q) = \text{VAR}(\mathcal{H}(s_j)) + \text{VAR}(\mathcal{G}(o_m)) + \text{VAR}(\mathcal{F}(p_k)) + \text{VAR}(\mathcal{I}(i_{m,k})) + \text{VAR}(\mathcal{R}). \quad (6.2)$$

L'équation 6.2 nous donne une méthode de vérification d'un processus d'élimination du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$: pour être efficace, l'élimination de l'interaction ne doit pas seulement améliorer les correspondances perception/mesures, mais il doit également réduire la variance contenue dans les réponses.

6.6.3 Analyse quantitative de la variance du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$

En séparant les questionnaires par œuvre et en les centrant, on peut s'affranchir de l'influence *moyenne* des œuvres. Si, sur les matrices en résultant, on enlève la moyenne pour chaque *place* (pour les différentes œuvres écoutées) on s'affranchit également de l'influence du terme $\mathcal{G}(o_m)$. On peut ainsi étudier l'influence des deux termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} seuls.

Alors qu'il est impossible de calculer la variance du terme $\mathcal{I}(i_{m,k})$ par une méthode directe, on peut calculer la variance de la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} , et la comparer avec la variance du terme \mathcal{R} , calculée dans le chapitre 5.5.2. Dans ce chapitre, l'écart-type des réponses a d'abord été évalué à partir du terme \mathcal{R} seul, pour un test spécifique réalisé à La Villette. Seules les réponses concernant la répétition d'une même œuvre musicale ont été incluses dans le calcul. Ensuite, une estimation de l'écart-type a été effectuée pour les tests d'écoute de la campagne européenne. Sachant qu'aucun test équivalent, portant sur plusieurs répétitions d'une même œuvre musicale n'a été effectué lors de la campagne européenne, l'écart-type a été estimé à partir de la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} .

Les écart-types des réponses (en moyenne, de 0,27 unités perceptives pour La Villette, et de 0,32 unités perceptives pour la campagne européenne),⁸ calculés pour les deux cas, sont étonnamment proches, quand on sait la complexité de la tâche pour les sujets dans le cas de la campagne européenne : les différents changements de places à l'intérieur d'une même salle, de salles et d'œuvres musicales se trouvent mêlés, ce qui demande aux sujets une adaptation très complexe. On peut conclure en faisant remarquer que, en général, l'influence du terme de l'interaction acoustique/œuvre reste faible par rapport à l'incertitude des jugements des sujets. Exprimé en terme de variance, on constate néanmoins que la variance de la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} est environ un tiers supérieure à la variance du terme \mathcal{R} seul.⁹

6.6.4 Analyse de l'interaction acoustique/œuvre à partir d'ACPs

Dans les figures 6.9 à 6.12 suivantes, les ACPs de la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} sont reproduites pour l'ensemble des tests effectués à La Villette ainsi que pour les tests de la campagne européenne. Chaque place est considérée individuellement pour chaque œuvre, mais la *moyenne* des réponses pour chaque place et la moyenne pour chaque œuvre sont enlevées. L'analyse s'effectue sur les réponses itérées, donc le biais individuel de chaque sujet est également enlevé.

7. Cette équation suppose la linéarité et l'indépendance des différents termes.

8. Les deux cas sont calculés uniquement en prenant les réponses des sujets ayant appartenu au noyau stable de la campagne européenne.

9. En fait, les différents écart-types ne sont pas vraiment comparables car ils sont calculés à partir de cas très distincts. La comparaison des variances est alors sujette à caution.

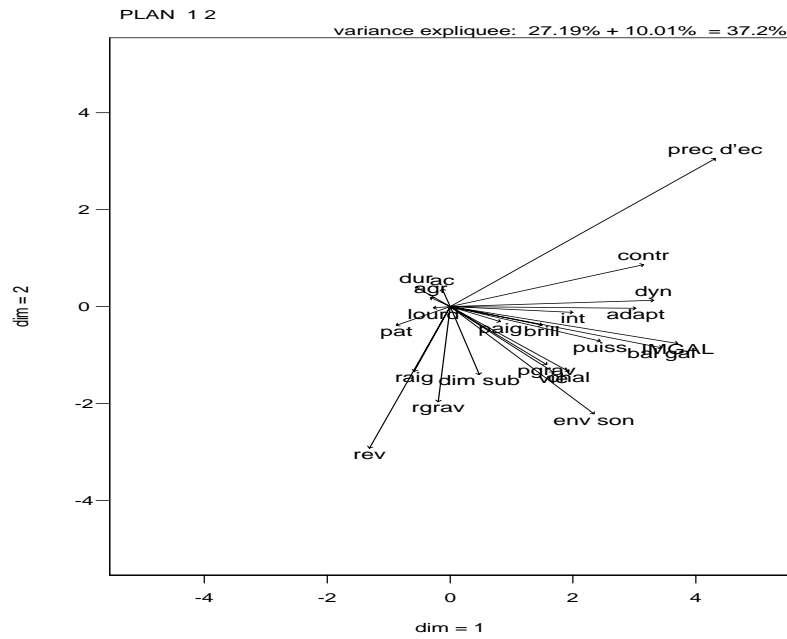


FIG. 6.9 - Plan 1/2 de l'ACP sur la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} des réponses, itérées, aux questionnaires pour les tests à La Villette. Les moyennes par place et par œuvre ont été enlevées.

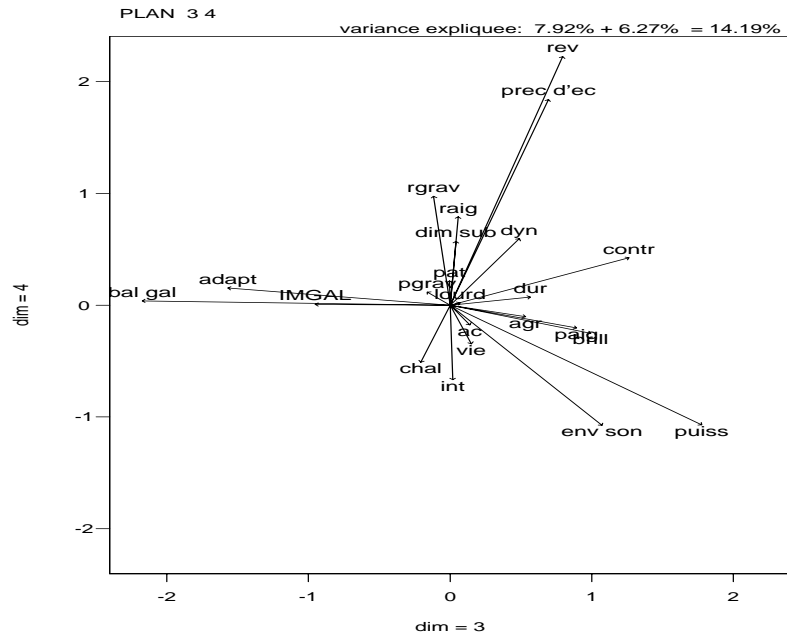


FIG. 6.10 - Plan 3/4 de l'ACP sur la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} des réponses, itérées, aux questionnaires pour les tests à La Villette. Les moyennes par place et par œuvre ont été enlevées.

En étudiant ces graphiques, on peut faire plusieurs remarques :

- la cohérence entre les plans d'analyse pour les tests à La Villette et pour les tests de la campagne européenne est extrêmement forte, indiquant l'existence d'une forte structure sous-jacente. Ce résultat démontre, de nouveau, la possibilité d'établir un modèle de réduction du nombre de questions du questionnaire. Le premier axe est formé par un ensemble de questions liées principalement à la préférence subjective, le deuxième axe à la perception de la réverbérance, et le troisième axe à la balance générale, collinéaire avec l'adaptation de l'œuvre musicale à la salle ;
- la différence entre l'analyse des tests à La Villette, portant sur la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} (figures 6.9 et 6.10), et l'analyse portant uniquement sur le terme \mathcal{R} , à partir du premier test effectué à La Villette (figures 5.2 et 5.3), est importante. Les effets de l'interaction acoustique/œuvre ont une importance suffisante pour faire apparaître la structure sous-jacente contenue dans les réponses aux questionnaires.

Il est alors évident que l'importance de l'interaction entre l'acoustique (ou l'emplacement exact dans une salle *par rapport aux sources instrumentales*) et l'œuvre est, au moins dans certains cas, non négligeable. Par contre, compte tenu de l'écart-type important des réponses aux questionnaires, une analyse par questionnaire, c.-à-d. par place et par œuvre, s'avère presque impossible. On procédera donc en effectuant des *moyennes* sur différents sous-ensembles représentatifs, en distinguant les places proches et les places lointaines, les places parterre et les places en hauteur (pour les salles ayant des balcons), les places devant et derrière l'orchestre (pour les salles concernées), et les places centrales et les places sur les côtés. Dans les derniers graphiques (figures 6.9 à 6.12), les objets (les places individuelles par œuvre) n'ont pas été représentés, sachant qu'il s'agit de plusieurs centaines d'objets. Par contre, lorsqu'on identifie les objets se trouvant à l'extérieur des figures (donc les places pour lesquels le terme $\mathcal{I}(i_{m,k}) + \mathcal{R}$ a la plus grande importance), on constate qu'il s'agit surtout de places dans *certaines salles*. L'effet de l'interaction acoustique/œuvre est donc beaucoup plus prononcé dans certaines salles. Cette importance de l'effet de l'interaction peut être induit par des œuvres particulières, mais on conclura plutôt en signalant que l'importance relative de l'effet de l'interaction (ainsi que la stabilité des jugements lors d'un changement d'œuvre) est une qualité inhérente à une salle.

On continuera en analysant les moyennes des sous-ensembles représentatifs *par salle*. Les résultats seront présentés sous la forme suivante : pour toutes les salles où des différences significatives ont pu être observées, les moyennes de sous-ensembles seront indiquées sur le plan 1/2 de l'ACP sur la campagne européenne (figure 6.11). Les questions ne seront plus projetées dans le plan de l'ACP afin de garantir une meilleure lisibilité. De plus, l'échelle des graphiques est adaptée aux différences observées sur les moyennes de sous-ensembles. Pour les places individuelles (figure 6.11) l'échelle est de -2 à +2 unités perceptives ; dans les figures indiquant les moyennes de sous-ensembles représentatifs (figures 6.13 à 6.18) l'échelle est de -1 à +1 unité perceptive, à l'exception de la Philharmonie de Berlin où des différences plus importantes sont apparues et pour laquelle on a préféré une échelle de -1,5 à +1,5 unités perceptives. Il est rappelé que le premier axe de l'ACP est surtout lié à la préférence subjective et à la notion de la balance générale, mais également à la précision d'écoute, tandis que le deuxième axe est surtout lié à la perception de la réverbérance.

Concertgebouw Amsterdam : Pour le Concertgebouw Amsterdam, aucune différence importante n'a été observée pour la distinction places proches/ places lointaines. La (seule) place derrière l'orchestre ne conduisait pas non plus à des effets d'interaction importants. Par contre, la figure 6.13 montre des différences pour la distinction places centrales/ places sur les côtés ainsi que pour la distinction places parterre/ places au balcon.¹⁰ Pour les places sur les côtés, on constate une balance générale moins bonne pour la première moitié du *War Requiem* de Britten, "B1", due à la forte importance des chanteurs solistes dans cette

10. Il est difficile de séparer les deux effets, car toutes les places sur le balcon, à l'exception de la place A1G0, sont sur les côtés.

œuvre (dans la deuxième moitié de l'œuvre, les chœurs et l'orchestre prennent une part plus importante). Il est néanmoins surprenant de ne pas constater d'*augmentation* de la réverbérance pour ces places de côté. Pour la symphonie de Bruckner, "U", on distingue également les places centrales des places sur les côtés ainsi que les places parterre des places sur les balcons, mais cette fois-ci sur le deuxième axe, celui de la réverbérance. L'utilisation importante des cuivres dans cette œuvre *diminue* la réverbérance pour les places situées dans la direction principale d'émission de ces instruments.

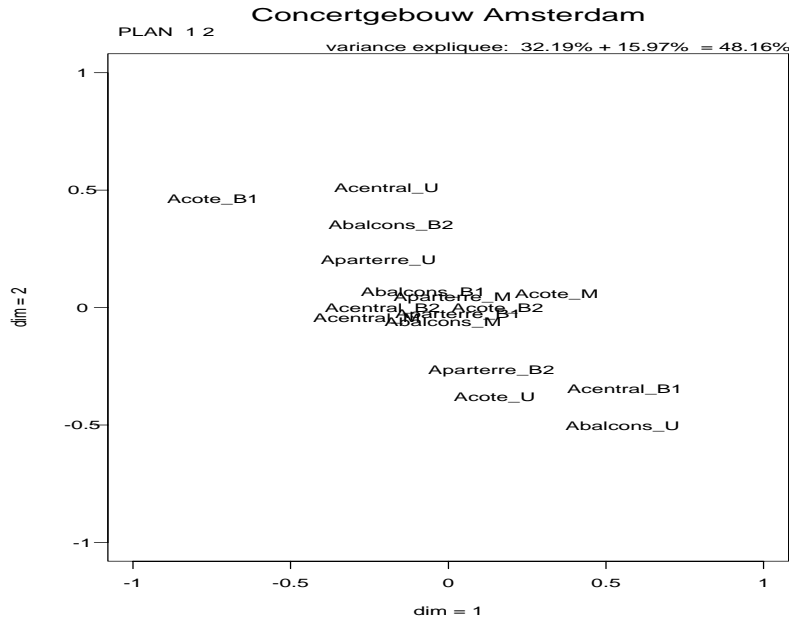


FIG. 6.13 - Concertgebouw Amsterdam : effet de l'interaction acoustique/œuvre. Les moyennes de sous-ensembles significatifs sont projetées dans l'ACP générale, figure 6.11. Les œuvres sont indiquées de la manière suivante : B1 pour la première moitié du War Requiem de Britten, B2 pour la deuxième moitié, M pour le concerto pour piano et orchestre de Mozart et U pour la symphonie de Bruckner.

Philharmonie de Berlin : L'influence de l'œuvre sur la perception de la qualité acoustique à la Philharmonie de Berlin, surtout pour les places derrière l'orchestre, a déjà été discutée dans le chapitre 6.3. En fait, lors de ce test les effets de l'interaction ont été les plus importants rencontrés dans cette campagne de tests d'écoute, ce qui s'explique par la forme de la salle ainsi que par les différentes œuvres écoutées.

La figure 6.14 indique surtout une distinction entre les places devant et les places derrière l'orchestre (un changement d'échelle a été effectué pour cette figure afin de l'adapter aux différences plus importantes rencontrées dans cette salle). Pour le concerto de piano de Brahms, "BR", les places derrière l'orchestre sont perçues avec une balance et une précision d'écoute moins bonne que les places devant. La situation s'améliore déjà pour *Rosamunde* de Schubert, "S", malgré la présence d'une chanteuse soliste (sa partie n'est pas extrêmement importante), et pour les pièces de Berg, "BE", la balance et la précision d'écoute sont perçues comme étant très bon également aux places situées derrière l'orchestre.¹¹ Sinon on remarque, pour les pièces de Berg, que les places sur les côtés se trouvent assez différenciées. Il semble que l'utilisation importante des cuivres dans cette

11. On serait tenté d'affirmer que cela indique, pour le cas des pièces de Berg la plus grande proximité par rapport aux sources instrumentales a un effet bénéfique, mais il convient de répéter que les graphiques doivent toujours être interprétés en *relatif*, toute moyenne étant enlevée.

pièce privilégie les places centrales, situées dans l'axe principal d'émission des cuivres. Pour les places sur les côtés, la balance générale est moins bonne et la perception de la réverbérance se trouve augmentée.

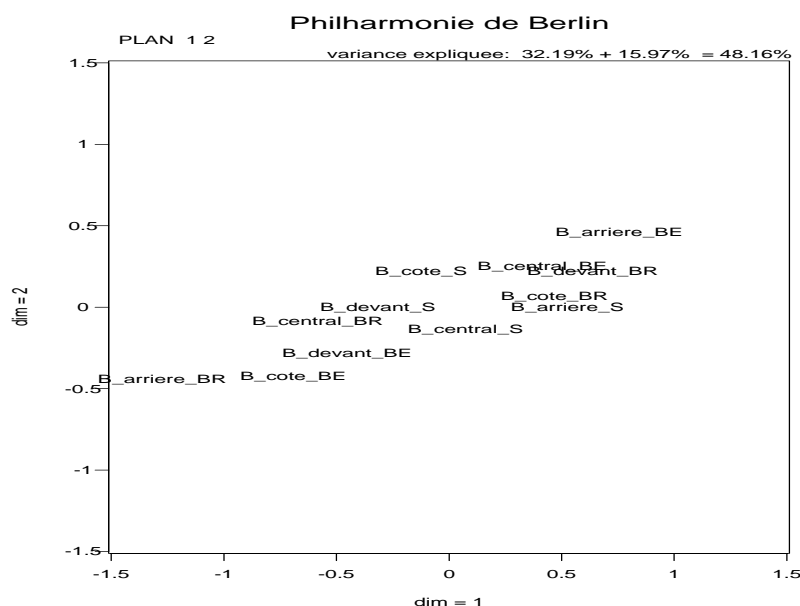


FIG. 6.14 - *Philharmonie de Berlin* : effet de l'interaction acoustique/œuvre. Les moyennes de sous-ensembles significatifs sont projetées dans l'ACP générale, figure 6.11. Les œuvres sont indiquées de la manière suivante : BR pour le concerto pour piano et orchestre de Brahms, S pour Rosamunde de Schubert et BE pour les pièces d'orchestre de Berg. L'échelle a été agrandie par rapport aux autres figures à cause de l'importance des effets d'interaction dans cette salle.

Théâtre des Champs-Élysées : Dans cette salle une seule œuvre musicale a été écoutée, *Falstaff* de Verdi. Entre les différentes parties de l'opéra, des changements assez conséquents de la scène ont eu lieu, menant à quelques variations significatives *globales*. Néanmoins, aucune influence significative de l'interaction acoustique/œuvre n'a été trouvée, sinon que les variations sont légèrement plus importantes pour les places proches.

Opéra Palais Garnier : Dans l'opéra Garnier, une représentation de ballet (d'après le "Songe d'une nuit d'été" de Mendelssohn), avec l'orchestre jouant dans la fosse d'orchestre, et un concert avec orchestre et chœurs sur scène (*Betulia liberata* de Mozart) ont été écoutés. Les résultats sont donnés dans la figure 6.15. On remarque surtout la distinction entre Mendelssohn, "ME1" et "ME2" (avec l'orchestre jouant dans la fosse), et Mozart, "MO1" et "MO2" (avec les musiciens sur scène), conduisant à une opposition entre les places parterre et les places sur les balcons.¹² On remarque surtout que la balance générale est relativement meilleure sur les balcons quand l'orchestre joue dans la fosse et, pour les places parterre, avec l'orchestre sur scène. De plus, la perception de la réverbérance est diminuée pour les places parterre quand l'orchestre joue sur scène.

Dans le cas de l'opéra Garnier, le paramètre ayant changé entre les différentes situations n'est pas la directivité des instruments, mais l'*emplacement* des instruments.

Auditorium du Louvre : Dans cette salle, un récital de violoncelle et piano a été écouté. Il est surprenant de voir apparaître une influence relativement importante de l'interaction

12. Les places sur les balcons étant toutes lointaines, il est difficile de distinguer entre l'effet de distance et l'effet de hauteur, seule la distinction parterre/balcons est indiquée dans la figure.

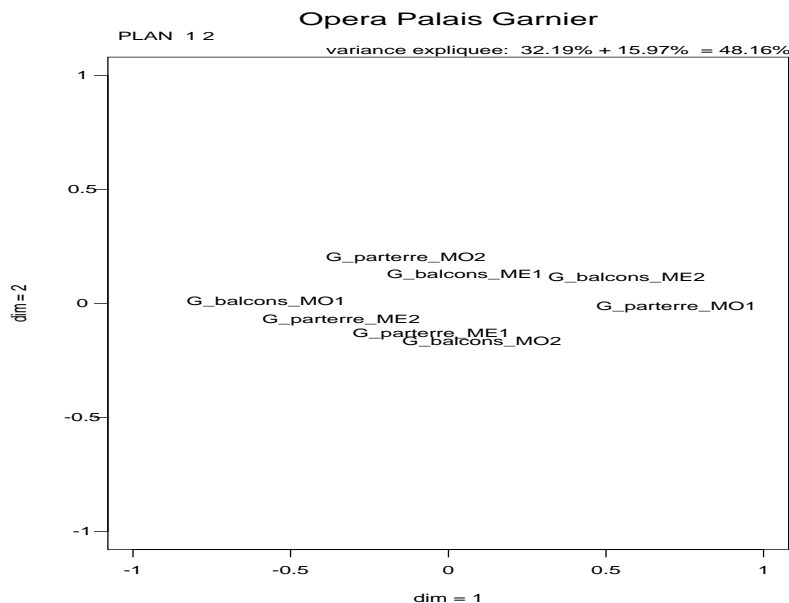


FIG. 6.15 - Opéra Palais Garnier : effet de l'interaction acoustique/œuvre. Les moyennes de sous-ensembles significatifs sont projetées dans l'ACP générale, figure 6.11. Les œuvres sont indiquées de la manière suivante: ME1 et ME2 pour les deux parties du ballet sur le Songe d'une nuit d'été de Mendelssohn, avec l'orchestre dans la fosse d'orchestre et MO1 et MO2 pour les deux parties de l'oratorio Betulia liberata de Mozart, avec l'orchestre et les chœurs situés sur scène.

acoustique/œuvre bien qu'aucun changement de l'effectif n'ait eu lieu (cf. figure 6.16). Plusieurs raisons peuvent néanmoins expliquer les différences observées, surtout pour les places sur les côtés. Premièrement, l'écriture musicale des œuvres a varié entre un style très classique (variations sur un thème de Mozart de Beethoven, "B"), les "Phantasiestücke" de Schumann, "S", et un style plus contemporain (Martinu, "M", et de Bloch, "O"). Deuxièmement, l'importance relative entre le violoncelle et le piano peut changer selon les œuvres, menant à des variations de la balance générale selon les places — surtout pour celles sur les côtés. Troisièmement, on peut accuser le fait que le violoncelliste (quittant la scène après chaque œuvre) ne va pas s'asseoir de manière strictement identique (surtout en ce qui concerne son orientation). Sinon ces résultats indiqueraient que les places sur les côtés provoquent une dispersion plus grande des jugements des auditeurs, dû au fait que l'évaluation de la qualité acoustique sur ces places s'avère plus difficile.¹³

Teatro alla Scala, Milan : Dans cette salle, un seul opéra a été écouté, *Attila* de Verdi, et aucun changement significatif des décors n'est intervenu pendant l'entracte. Il n'est donc pas surprenant de constater que, entre les deux parties, très peu d'effets globaux et aucun effet local significatif n'ont été trouvés. En harmonie avec la structure générale d'une œuvre musicale, où le climax arrive vers la fin de la pièce, la deuxième moitié a été jugée comme étant plus forte, avec une meilleure précision d'écoute et a généralement été préférée, pour toutes les places.

Auditorium du Musée d'Orsay : Dans cette petite salle de 200 places, où l'on écoutait une

13. Sur la totalité des tests, y inclus les tests à La Villette, un certain nombre de commentaires ont été exprimés, surtout par des sujets ayant relativement peu d'expérience, sur la difficulté d'évaluer les places excentrées. On peut se demander si l'habitude d'écouter des enregistrements stéréo, effectués systématiquement à partir d'un emplacement central, ne contribue pas à ce phénomène.

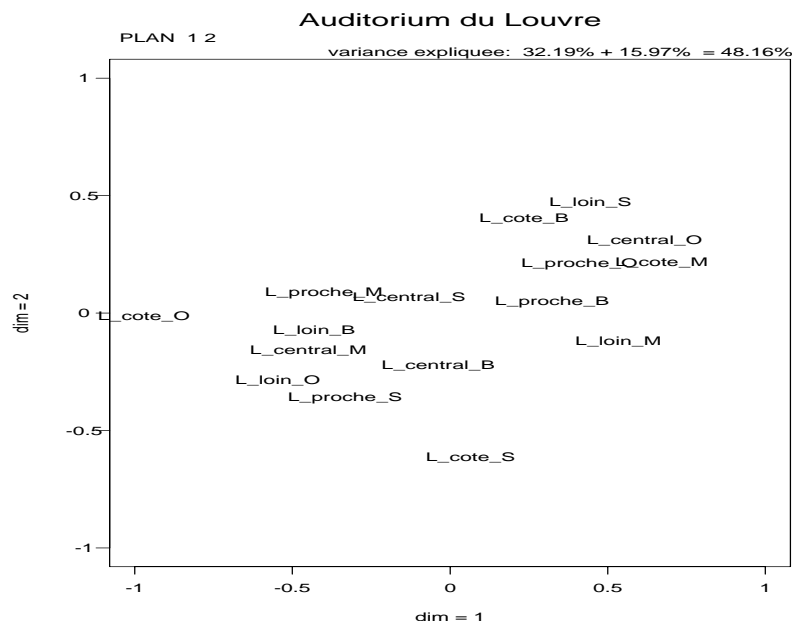


FIG. 6.16 - Auditorium du Louvre : effet de l'interaction acoustique/œuvre. Les moyennes de sous-ensembles significatifs sont projetées dans l'ACP générale, figure 6.11. Les œuvres sont indiquées de la manière suivante : B pour les variations de Beethoven, S pour Schumann, M pour Martinu et O pour Bloch.

pièce pour piano seul et de la musique de chambre, soit avec piano, soit uniquement avec des instruments à cordes, l'utilisation du piano menait à des différences *globales* parfois notables. Par contre, la faible taille de la salle empêche l'apparition de forts effets d'interaction acoustique/œuvre.

Salle Pleyel, Paris : Dans la Salle Pleyel, des effets d'interaction assez importants ont été remarqués (figure 6.17). De plus, plusieurs influences peuvent être différenciées : sur le premier axe, on remarque surtout la distinction places centrales/ places sur les côtés pour le concerto de piano de Mozart, "M". Avec le piano, situé au milieu de l'avant-scène et dirigé vers la salle, la balance est moins bonne pour les places sur les côtés. L'inverse peut être constaté pour l'ouverture de Rossini, "R". Ceci s'explique, en grande partie, *par rapport* au concerto de Mozart, mais on pourrait également accuser l'influence des cuivres, qui n'ont pas été orientés exactement dans l'axe de la salle. Pour la symphonie de Dutilleux, "D", on constate une différenciation places parterre/ places sur les balcons le long du deuxième axe, indiquant que, avec cette œuvre, la salle est perçue comme plus réverbérante pour les places parterre. La raison est l'utilisation importante d'instruments de percussion, émettant surtout vers le plafond. La salle, avec sa conque d'orchestre très prononcée, dirige ces sons vers les balcons, induisant une réduction de la réverbérance pour les places situées sur les balcons.

Par ailleurs, on remarque une inversion entre la symphonie de Beethoven, "B", et la musique de ballet *Cinderella* de Prokofiev, "P", pour le couple des places parterre/places sur les balcons. Pour les places sur les balcons, l'œuvre de Prokofiev induit une balance générale moins bonne ainsi qu'une détérioration de la balance générale. Dans ce cas, il s'agit de la forte importance des cuivres (et des instruments de percussion) dans la pièce de Prokofiev. Les cuivres, situés en arrière-scène, sont, en raison de cette conque, également envoyés davantage vers les balcons. Ayant une puissance acoustique plus forte que les

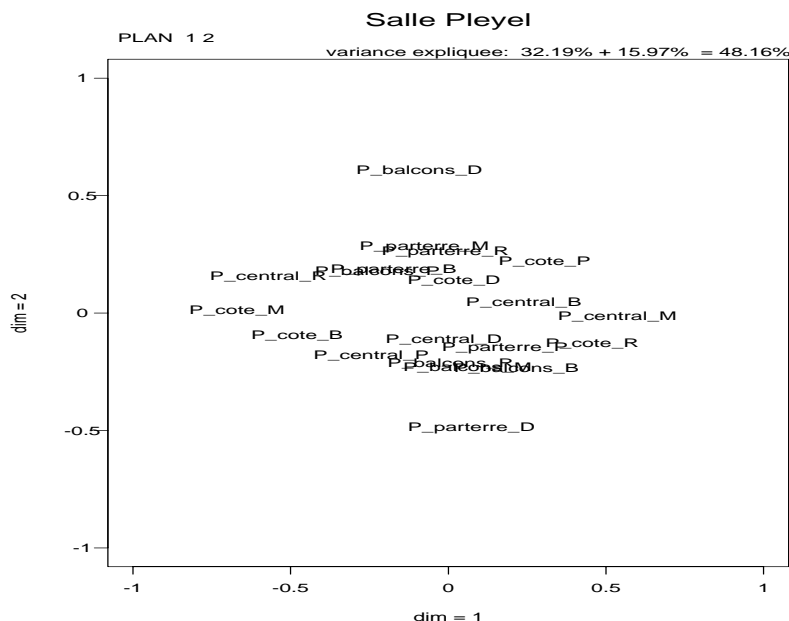


FIG. 6.17 - Salle Pleyel: effet de l'interaction acoustique/œuvre. Les moyennes de sous-ensembles significatifs sont projetées dans l'ACP générale, figure 6.11. Les œuvres sont indiquées de la manière suivante: M pour le concerto pour piano et orchestre de Mozart, B pour la symphonie de Beethoven, D pour la symphonie de Dutilleux, R pour l'ouverture de Rossini et P pour la musique de ballet de Prokofiev.

instruments à cordes et à vent, ce renforcement mène à une balance moins bonne.¹⁴

Musikvereinssaal Vienne : Malgré une variabilité assez forte des œuvres musicales écoutées (concerto de piano, "C", et symphonie *Pastorale*, "P", de Beethoven, *Oratorio de Noël* de Bach, "B") on ne remarque que de très faibles effets de l'interaction acoustique/œuvre, indiquant que cette salle rectangulaire, avec sa faible largeur, a tendance à limiter ces effets. Sur la figure 6.18, on remarque néanmoins une influence de l'œuvre de Bach, avec une forte importance de la voix chantée, menant à une diminution de la réverbérance pour les places centrales.

En effectuant des moyennes sur des sous-ensemble significatifs, il est alors possible de clairement dévoiler les effets de l'interaction œuvre/acoustique, qui étaient encore, au moins en grande partie, noyés dans le bruit élevé des questionnaires par œuvre et par place individuelle. Malgré que la variance due à cette interaction est moins grande que la variance des autres influences aux questionnaires (acoustique, influence globale de l'œuvre et le bruit), les effets sont parfois assez prononcés. De plus, ces effets peuvent autant être provoqués par une œuvre particulière que par la salle. Principalement deux influences ont pu être isolées :

- l'orientation des sources directives. Les effets de l'interaction acoustique/œuvre apparaissent surtout pour les œuvres dont l'orchestration contient des instruments très directifs (ou les œuvres pour lesquelles ces instruments ont une grande importance). Il s'agit surtout des instruments de la famille des cuivres, mais également de la voix humaine, des

14. Le déséquilibre des puissances acoustiques entre les cordes et les cuivres est la raison pour laquelle ces derniers sont placés d'habitude *derrière* les autres instruments, la distance aidant à équilibrer la balance entre les différents groupes d'instruments.

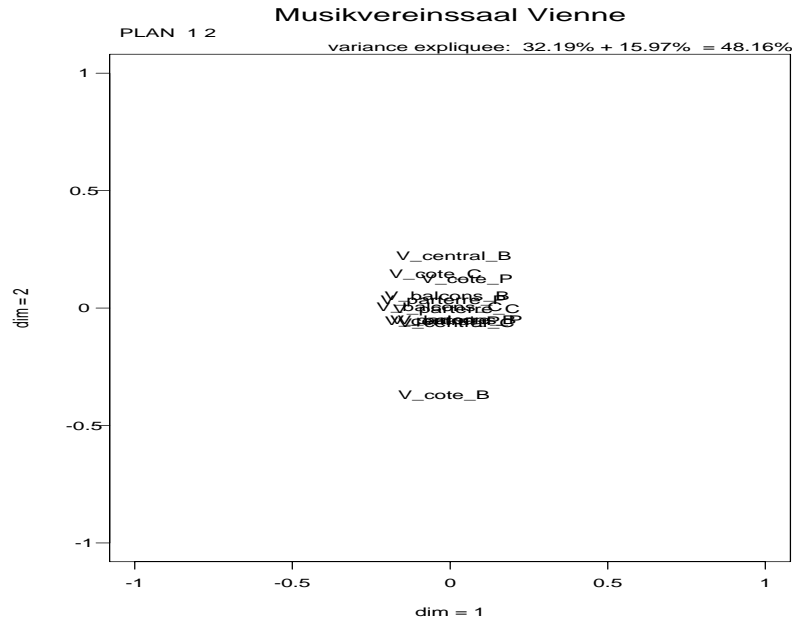


FIG. 6.18 - Musikvereinssaal Vienne: effet de l'interaction acoustique/œuvre. Les moyennes de sous-ensembles significatifs sont projetées dans l'ACP générale, figure 6.11. Les œuvres sont indiquées de la manière suivante: B pour l'oratorio de Noël de Bach, C pour le concerto pour piano et orchestre de Beethoven (avec couvercle enlevé) et P pour la symphonie Pastorale.

instruments à percussion¹⁵ et du piano;

- l'emplacement des instruments. L'influence de l'emplacement des instruments est d'autant plus grande quand l'entourage proche de la scène est hétérogène, avec des éléments architecturaux prononcés (différence de l'entourage de l'orchestre entre la fosse d'orchestre et sur scène, conque d'orchestre prononcée dans la salle Pleyel).

Il est néanmoins difficile d'éliminer l'effet d'interaction acoustique/œuvre des questionnaires. Le paragraphe suivant sur le modèle de réduction de nombre de questions du questionnaires montrera que les taux de corrélations (ou plutôt la diminution de la variance) est moins importante quand on étudie les termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$ et \mathcal{R} uniquement.

Pour les questions ne faisant pas partie des questions d'entrée de ce modèle de réduction du nombre de questions, la question se posera de toute manière s'il ne faut pas étudier le *résidu* par rapport au modèle. En éliminant l'influence des questions d'entrée sur les autres questions, une grande partie de l'effet d'interaction acoustique/œuvre ainsi qu'une partie du bruit résiduel (par les relations *internes* entre les questions) sera, de toute manière, enlevée.

15. Pour beaucoup d'instruments de percussion la production de son se fait par une vibration de plaque, conduisant à un rayonnement dipolaire.

Chapitre 7

Modèle de réduction du nombre des questions du questionnaire

Dans les derniers paragraphes (chapitre 6.1 à 6.6), la possibilité d'un modèle de réduction du nombre des questions du questionnaire a été évoquée à plusieurs reprises. Premièrement, dans toutes les analyses multidimensionnelles présentées, le nombre effectif de dimension a été nettement inférieur au nombre de questions posées. Pour le questionnaire complet, comprenant 29 questions, les différentes analyses (sur différentes salles ou sur les différentes influences sur les réponses aux questionnaires) dévoilaient entre quatre et six dimensions indépendantes. De plus, des fortes liens entre certaines questions ont apparus à plusieurs reprises.

On réitéra d'abord quelques résultats qui nous ont amenés à chercher un tel modèle et on discutera également son intérêt.

hiérarchisation :

indépendance :

stratégie de réponse :

stabilité : structure des réponses pour différents types de variation et pour différentes salles ;

corrélations objectives :

orthogonalisation :

prédiction, non élimination :

Dans les derniers paragraphes (chapitre 6.1 à 6.6), on a utilisé les données de la campagne européenne afin d'étudier les différentes influences sur les réponses aux questionnaires. Pendant les tests d'écoute perceptifs dans la salle de concert de La Villette, plusieurs œuvres ont été écoutées sur des places identiques. Ce corps de données permet une analyse approfondie des différentes influences sur les réponses aux questionnaires — permettant de choisir les questions considérées comme *variables d'entrée* du modèle de réduction, ainsi que de vérifier si le modèle reste cohérent pour les différents types de changements : de l'œuvre (pour la moyenne des places ou par place) et de l'acoustique. La salle comportant un dispositif d'acoustique variable, on a pu séparer les effets d'un changement de place (entraînant un changement de l'acoustique) des effets d'un changement de l'acoustique de la salle, pour des places identiques.¹

1. Pour les détails des matrices étudiées cf. leur description sur la page 125.

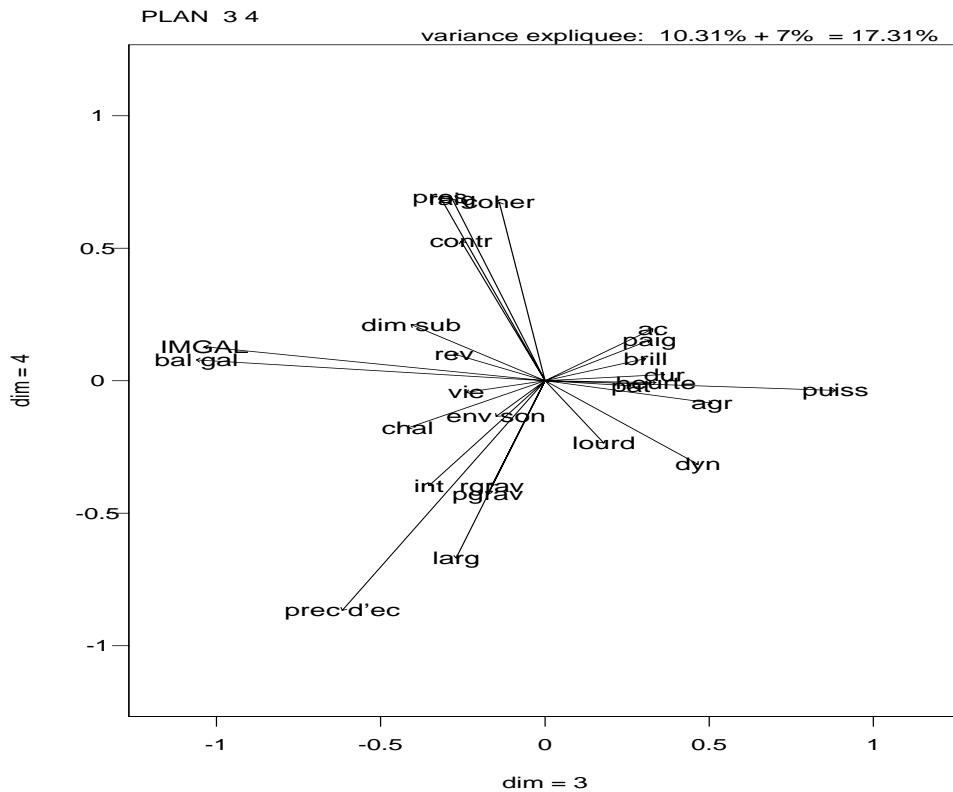


FIG. 7.2 - Plan 3/4 de l'ACP sur la matrice totale des tests d'écoute à La Villette : changements de l'œuvre, de l'acoustique et de l'emplacement dans la salle confondus. Réponses aux questionnaires uniquement.

variable d'entrée. Plusieurs éléments nous ont amené à préférer la question de la puissance sonore :

- il s'avère que la puissance n'est pas identique à la somme de la présence et de la réverbérance, la puissance est perçue en tant que telle ;
- les variations des réponses sur la présence sont les plus fortes pour un changement de la place à l'intérieur de la salle. La question peut donc être liée à une notion de distance subjective. La puissance est influencée de manière similaire par les changements de place et de l'œuvre, de manière globale comme individuellement par place (interaction œuvre/place). Cette question semble donc plus liée à une véritable notion de puissance acoustique ;
- les performances du modèle comportant la variable de la puissance sont généralement meilleures, c.-à-d. un pourcentage plus important de la variance des réponses aux questions peut être expliquée quand la puissance est choisie comme variable d'entrée au lieu de la présence ;
- la correspondance entre la question sur la puissance sonore avec la puissance acoustique de l'effectif orchestral est très bonne, nettement meilleure qu'avec la question sur la présence ;

question sur la distance subjective ; la question sur la fluidité (échelle de 4 unités perceptives, heurté — fluide) a été transformée en défaut de "heurté" (oui — non) ; une question sur la largeur apparente des sources a été ajoutée (avec une échelle de 4 unités perceptives) ; les questions sur l'interprétation et sur l'appréciation de l'œuvre musicale ont été regroupées dans une question sur l'appréciation de la performance musicale.

- la question de la présence a été modifiée entre les tests de la campagne européenne et ceux à La Villette (cf. la note de bas de page sur la page 122).

Le deuxième axe est fortement lié à la perception de la réverbérance, mais également à une composante de la précision d'écoute. Il est très intéressant d'observer que la question de la précision d'écoute, dans la quasi-totalité des plans d'analyses montrés jusqu'ici, a une composante antiparallèle à la réverbérance, mais également une composante parallèle au premier axe, axe souvent bien corrélé avec la préférence subjective et la puissance.

Le troisième axe est lié à la notion de balance générale, influençant également la préférence subjective.

Le quatrième axe est plus difficile à interpréter et plusieurs influences s'y trouvent mêlées : la question sur la largeur apparente des sources, le contraste, la précision d'écoute, mais également les couples opposés de la balance spectrale, pgrav/paig (puissance dans les graves et dans les aiguës) ainsi que rgrav/raig (réverbérance dans les graves et dans les aiguës).

L'analyse des plans de l'ACP de la matrice totale permet d'isoler les questions correspondant aux aspects *indépendants* avec les plus fortes variances, pour ce cas où toutes les influences sont mêlées.

Des études sur des variations *individuelles*, notamment l'influence de l'œuvre et de son effectif instrumental, ainsi que des études des corrélations et sur le pourcentage de la variance expliquée par un nombre réduit de variables d'entrée ont permis de dégager des questions supplémentaires qui doivent être conservées : premièrement, des questions des "défauts", avec leur échelle binaire de 0/1 (non — oui), ont une variance relativement faible et apparaissent à peine dans les plans de l'ACP. Néanmoins, les deux questions de "pâteux" et de "heurté" ne peuvent pas être expliquées par les autres variables d'entrée à un degré satisfaisant. De plus, une influence importante de ces questions sur d'autres questions, notamment sur la préférence subjective, a été constatée. Ces deux questions doivent donc également être considérées comme variables d'entrée. Deuxièmement, les études sur l'influence de l'œuvre, pour les données recueillies lors des tests d'écoute à La Villette avec leur variation importante d'œuvres musicales, ont montré que pour ce cas les *deux* questions de la puissance dans les aiguës et de la puissance dans les graves doivent être considérées afin de décrire la balance spectrale.⁵ Finalement, une certaine ambiguïté a été constatée entre les questions sur la précision d'écoute et le contraste et le choix entre les deux n'est pas évident (cf. également les résultats sur l'influence de l'œuvre à la Salle Pleyel, chapitre 6.5.2). On a décidé de conserver la variable du contraste, surtout à cause de la nature de ces deux questions : la perception de la précision d'écoute est certainement le résultat d'un jugement très complexe au niveau de système auditif et il paraît plus logique de considérer cette question comme une variable de sortie plutôt que comme une variable d'entrée.

Le choix final des questions d'entrée pour le modèle réduit du questionnaire porte donc sur les huit questions suivantes :

- 1° puissance
- 2° réverbérance
- 3° balance générale
- 4° contraste
- 5° puissance dans les graves
- 6° puissance dans les aiguës

5. Ceci est moins le cas pour les données de la campagne européenne. Pour ces données une réduction supplémentaire de nombre de questions d'entrée serait possible. On donnera plus tard les coefficients pour les autres variables d'entrée afin de décrire ces deux questions, ce qui permet d'expliquer la totalité des questions avec 6 variables d'entrée. Pour les données de la campagne, il persiste un autre problème que la question de "heurté" n'existait que sous la forme de la question de la fluidité (couple heurté — fluide, avec une échelle de quatre unités perceptives). Afin d'intégrer le changement de la question et de son échelle, l'équation suivante a été appliquée avec des bons résultats : les coefficients trouvés pour la question de "heurté" à La Villette sont traduits en coefficients pour la question de "fluidité" pour la campagne en inversant le signe et en diminuant la valeur absolu par deux.

7° pâteux

8° heurté

Ce choix de questions présente un avantage supplémentaire: ces questions peuvent être assez facilement liées à des paramètres objectifs, décrivant soit l'œuvre et son effectif orchestral, soit l'acoustique de la salle. Pour la puissance, il s'agit de la puissance acoustique de l'effectif orchestral et de l'amplification, G , de la salle; pour la réverbérance, de la directivité des instruments (mais également de l'écriture musicale) et de la réverbération de la salle (en durée et/ou en niveau du champ tardif); pour la balance générale, des effets de la directivité et des lobes de rayonnement des instruments et de l'orientation de la place par rapport aux sources instrumentales; pour le contraste, de la définition des attaques des instruments ainsi que dans la salle; pour la puissance dans les graves et dans les aiguës, des détails de l'instrumentation de l'œuvre et de la réponse spectrale de la salle; la question de pâteux traduit une définition insuffisante d'un ou de plusieurs instruments; finalement, la question de heurté traduit une sensibilité à l'écho.

Ce nombre de 8 questions d'entrée est encore relativement élevé, il s'explique par le fait que le modèle de réduction du nombre des questions doit être capable à prédire les réponses aux autres questions pour *tous* les différents cas d'un changement de l'acoustique à l'intérieur d'une salle, entre différentes salles ou bien un changement d'œuvre. Dans certains cas une réduction supplémentaire serait possible. Dans ces cas cela se traduit par une forte corrélation des variables d'entrée entre eux et certaines questions d'entrée peuvent être suffisamment bien estimées à partir des autres questions d'entrée, menant naturellement à une réduction supplémentaire du nombre des questions.

Les coefficients pour ces estimations de certaines variables d'entrée seront donnée dans le paragraphe B.1, avec les résultats détaillés du modèle de réduction. Il s'agit surtout des variables de p_{grav} et p_{aig} , qui, pour les données de la campagne européenne, peuvent être considérées comme questions *dépendantes*, car ils sont très fortement corrélées avec la question de la puissance. Autrement il est parfois possible d'estimer et d'enlever les questions de pâteux et heurté.

En utilisant ces questions d'entrée, des régressions multiples ont été effectuées sur différentes matrices (changement de l'œuvre, changement de l'acoustique et changement de la place) issues des tests à La Villette ainsi que sur des matrices de la campagne européenne.

Il s'agit des matrices suivantes, et on donnera en même temps la nomenclature utilisée dans les tableaux de coefficients et des performances. La nomenclature reprend la notation des équations décrivant de manière formelle les différentes influences aux questionnaires:

$\mathcal{F} + \mathcal{I}$: une matrice constituée à partir des matrices *centrées* par œuvre, cf. le paragraphe précédent. Pour chaque question, la moyenne par œuvre est enlevée, ce qui enlève également l'influence moyenne de la salle. On se focalise sur les variations à l'intérieur d'une même salle; l'effet de l'interaction acoustique/œuvre est toujours présent dans cette matrice;

$\overline{\mathcal{G}}$: une matrice avec les moyennes par œuvre. Toutes les réponses sur les différentes places à l'intérieur d'une salle sont moyennées. Dû au nombre limité d'œuvres pendant les tests d'écoute à La Villette (8 œuvres pour estimer 8 variables d'entrée), les coefficients de régression ne seront pas donnés pour le cas de La Villette. Par contre, les performances de prédiction sont inclus dans les tableaux par question;

$\mathcal{G}(o_{m,k})$: une matrice portant sur l'effet de l'œuvre, individuellement *par place*. La moyenne de toutes les œuvres est enlevée pour chaque place, ce qu'enlève également l'influence moyenne de l'acoustique. Cette matrice n'existe que pour les tests à La Villette;

$\mathcal{F}(p_{m,k})$: une matrice portant sur l'effet d'un changement de l'acoustique, individuellement *par place*. On compare toujours des œuvres identiques, il n'y a donc pas d'influence moyenne de l'œuvre. Cette matrice n'existe également que pour les la salle de La Villette, seul le dispositif d'acoustique variable permettant de changer l'acoustique sans changement de place à l'intérieur de la salle;

\underline{I} : une matrice portant sur l'effet de l'interaction acoustique/œuvre, cf. paragraphe 6.6. Les moyennes par œuvre et par place sont enlevées ;

\underline{R} : une matrice sur le bruit contenu dans les questionnaires, à partir du premier test d'écoute à La Villette, portant sur plusieurs répétitions d'une même œuvre. Toutes les sujets ont été inclus, non seulement les sujets ayant appartenu au noyau stable de la campagne européenne. Ce matrice n'existe que pour les tests à La Villette. Il va de soi qu'une influence (soit directe, soit résiduelle) du bruit est également contenue dans toutes les autres matrices. Son importance dépend, pour chaque matrice, du nombre des questionnaires moyennés pour chaque entrée de la matrice (cf. également la discussion plus bas) ;

$\overline{\mathcal{F}}_{\text{salle}} + \overline{\mathcal{G}}$: une matrice avec les réponses moyennes par salle, pour la campagne européenne. Dû au nombre limité de salles (9 salles pour la campagne européenne), les coefficients de régression ne seront pas donnés pour cette matrice. Par contre, les performances de prédiction sont incluses dans les tableaux par question ;

$\underline{\mathcal{F}} + \overline{\mathcal{G}}$: une matrice avec les réponses moyennes par place — en moyennant sur les différentes œuvres on essaie de s'affranchir de l'influence de l'œuvre.

On expliquera encore la nomenclature des tableaux de performances du modèle de réduction :

var init : variance initiale (en unités perceptives au carré) des réponses à la question (ou, pour le tableau récapitulatif 7.2, de toutes questions), pour la matrice considérée ;

var regr : variance restante, après orthogonalisation (donc enlèvement) par rapport aux coefficients de régression, trouvés *indépendamment par matrice considérée* ;

seuil var : borne théorique inférieure de la variance restante, calculée à partir de l'estimation du bruit, effectuée dans le chapitre 5.5.2. La différence du niveau de bruit pour les sujets du noyau stable (campagne européenne) et pour tous sujets (La Villette) est prise en compte ;

var coef : variance restante, après orthogonalisation par rapport aux coefficients de régressions *globaux*, c.-à-d. coefficients réduits et optimisés sur la totalité des matrices considérées. Pour une question donnée, il s'agit donc des mêmes coefficients pour toutes les matrices. Ces coefficients sont reproduits dans le tableau 7.1 ;

cor regr : taux de corrélation entre les réponses sur la question et les réponses estimées par la régression indépendante par matrice ;

seuil cor : seuil théorique du taux de corrélation, calculé à partir du niveau de bruit pour chaque question ;

cor coef : taux de corrélation entre les réponses sur la question et les réponses estimées par la régression *globale*, utilisant les coefficients donnés dans le tableau 7.1.

Les coefficients réduits et optimisés du modèle de réduction, par question, et les performances moyennes sont donnés dans ce paragraphe (tableaux 7.1 et 7.2). Les détails par question sont rapportés dans l'annexe.

En étudiant le tableau 7.2, on remarque que les performances du modèle de réduction sont, généralement, excellentes. La corrélation entre les prédictions des réponses, en utilisant les coefficients globaux donnés dans le tableau 7.1, et les réponses aux questionnaires, est, en moyenne, de 52%. Ce chiffre doit être comparé avec le seuil théorique de taux de corrélation, estimé à partir du bruit contenu dans les questionnaires, qui est de 50%. Ce résultat indique que le modèle de réduction est même capable de prédire une partie du bruit résiduel contenu dans les réponses sur les questionnaires. La corrélation, pour la matrice spécifique du bruit (Villette: \underline{R}), est de 19% en moyenne. Par contre, pour des cas où le bruit résiduel est réduit par des

coefs réduction	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
dyn	0.43	0.10	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.20
dim sub	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2
env son	0.20	0.15	0.00	0.20	0.10	-0.20	0.00	0.00
int	0.10	0.00	0.00	0.20	0.20	-0.49	-0.55	0.15
chal	0.20	0.12	0.00	0.50	0.00	-0.60	-0.55	0.00
vie	0.17	0.20	0.13	0.14	0.00	0.00	-0.20	0.15
brill	0.24	0.16	0.31	-0.26	0.30	0.00	-0.35	0.00
lourd	0.00	-0.04	0.00	0.11	-0.08	0.00	0.42	-0.04
ac	0.00	0.00	0.28	-0.28	-0.08	0.00	-0.14	-0.11
agr	0.20	0.00	0.00	-0.10	-0.10	0.16	0.00	0.00
dur	0.12	-0.03	-0.10	-0.10	0.00	0.13	0.00	0.00
pres	0.12	0.00	0.68	0.36	0.59	0.70	0.00	0.00
prec d'ec	0.30	-0.10	0.00	-0.50	0.27	-0.30	-0.47	0.31
raig	-0.12	0.28	0.26	-0.07	0.24	0.00	0.27	0.00
rgrav	0.00	0.15	0.00	0.52	-0.20	0.00	0.20	0.00
IMGAL	0.16	0.08	0.00	0.23	0.33	-0.30	-0.11	0.43
adapt	0.00	0.10	0.38	0.27	0.00	0.00	-0.39	0.55
paig	0.30	0.00	—	0.00	0.20	0.00	0.00	0.00
pgrav	0.30	0.10	0.00	—	0.00	0.00	0.00	0.10
contr	0.15	-0.05	0.20	0.00	—	0.00	-0.50	0.15
(VIL): heurte	0.08	0.00	0.00	0.00	-0.08	—	0.00	-0.15
(CAMPAGNE): fluid	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	—	0.00	0.40
pat	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.19	0.16	—	-0.10

TAB. 7.1 - Coefficients du modèle de réduction du nombre des questions indépendantes. En bas du tableau sont également donné les coefficients pour les questions d'entrée, menant à une réduction supplémentaire du nombre de variables indépendantes.

performance moyenne	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.09	0.05	0.07	0.06	0.60	0.31	0.50
Villette: \mathcal{G}	0.04	0.00	0.01	0.02	0.99	0.60	0.75
Villette: $\mathcal{G}_{(0_{m,k})}$	0.06	0.03	0.11	0.04	0.64	0.04	0.53
Villette: $\mathcal{F}_{(p_{m,k})}$	0.07	0.04	0.11	0.06	0.65	0.05	0.47
Villette: \mathcal{I}	0.18	0.16	0.14	0.17	0.30	0.42	0.21
Villette: \mathcal{R}	0.14	0.14	0.14	0.12	0.18	0.00	0.19
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.03	0.00	0.01	0.01	0.93	0.66	0.63
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.21	0.13	0.06	0.17	0.54	0.77	0.43
Campagne: \mathcal{G}	0.14	0.02	0.01	0.05	0.87	0.89	0.77
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \mathcal{G}$	0.10	0.00	0.00	0.04	1.00	0.92	0.76
Campagne: \mathcal{I}	0.07	0.05	0.06	0.06	0.55	0.45	0.43
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.27	0.10	0.02	0.16	0.72	0.90	0.60
moyenne	0.12	0.06	0.06	0.08	0.67	0.50	0.52

TAB. 7.2 - Performances du modèle de réduction du nombre de variables d'entrée, moyennées sur toutes questions.

moyennes effectuées sur les réponses individuelles, les taux de corrélation du modèle de réduction n'atteignent pas les seuils théoriques (Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$, Campagne: $\overline{\mathcal{G}}$ et Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$), indiquant l'existence d'influences supplémentaires.

Chapitre 8

Analyse des mesures seules

Dans les deux chapitres précédents, seules les réponses aux questionnaires ont été analysées. Dans ce chapitre, on analysera les mesures effectuées dans les différentes salles de la campagne européenne, avant d'étudier les correspondances entre les réponses aux questionnaires et les mesures dans le chapitre suivant. Comme il a été décrit dans le chapitre 4.2.1, un protocole de mesures très élaboré a été suivi dans les salles. Cette analyse des mesures seules, ainsi que l'étude de la correspondance entre mesures objectives et réponses aux questionnaires dans le prochain chapitre, permettront d'évaluer la nécessité de suivre un protocole aussi élaboré.

8.1 Rappel et discussion du protocole de mesures

Comme il a été expliqué dans le chapitre 4, les mesures de réponse impulsionnelle ont été effectuées avec un haut-parleur de mesure *directif*. Les emplacements et les directions d'émission du haut-parleur comme les emplacements et les caractéristiques directionnelles du microphone de mesures ont été multipliés.

La raison de cette multiplication est simple : il s'agit d'obtenir une description de la transformation apportée par la salle pour les différents emplacements des sources et des récepteurs dans la salle. Cette transformation peut être décrite avec la réponse impulsionnelle, en considérant la salle comme un filtre linéaire invariant dans le temps. Mais cette description est uniquement valable pour *un emplacement de la source* et *un emplacement du récepteur* donnés. De plus, la transformation dépend des caractéristiques de directivité de la source et du récepteur. Il s'agit alors d'obtenir la description la plus exacte possible de la distribution *spatiale* du champ sonore, autant par rapport à l'émission de la source que par rapport au récepteur.

Cette description détaillée des caractéristiques spatiales a été recherchée pour deux raisons :

- d'une part, pour étudier les relations de correspondance objectif/perceptif : les instruments orchestraux n'ont pas un rayonnement omnidirectionnel. Afin d'expliquer les effets de la directivité des instruments d'orchestre (déjà constatés et décrits dans le chapitre 6 sur l'analyse des questionnaires seuls), on peut étudier la correspondance entre les mesures effectuées et différentes directions d'émission — ou avec des *pondérations* sur les différentes directions d'émission ;
- d'autre part, une description détaillée, des aspects spatiaux notamment, est indispensable pour comparer les mesures effectuées dans les salles avec les résultats des simulations informatiques effectuées en laboratoire. Les simulations fournissent une description des aspects spatiaux encore plus détaillée : pour chaque réflexion arrivant au récepteur, la direction d'émission, les surfaces rencontrées, l'énergie, la date et la direction d'arrivée sont donnés. Uniquement des mesures détaillées permettent de "caler" et d'optimiser les simulations informatiques (en jouant notamment sur la représentation géométrique de la

salle et les caractéristiques des matériaux des surfaces de la salle), particulièrement dans le but d'isoler le comportement des surfaces spécifiques dans la salle.

Il faut ajouter que, pour la comparaison mesures/ simulations, le tableau complet de *toutes* les possibilités de combinaison emplacement de la source/ direction d'émission de la source/ emplacement du microphone/ directivité du microphone n'est pas indispensable. Afin de limiter le nombre de mesures dans une salle (déjà considérable, comme évoqué dans le chapitre 4), on a décidé de :

- mesurer toutes les cinq directions d'émission (face, cour, jardin, arrière, plafond) *seulement* pour un emplacement de la source (au centre de la scène, à l'emplacement "T0") ;
- mesurer les trois directivités du microphone (omnidirectionnelle, cardioïde, figure 8) *seulement* pour la direction d'émission "face".

Dans la suite de ce document, on verra les implications de ces limites pratiques pour l'analyse — malheureusement, il s'avère que les implications, et les limites en résultant, sont parfois considérables. Un des buts des analyses décrites dans ce document sera donc d'aboutir à un nouveau protocole de mesures, plus adapté aux besoins de la caractérisation *perceptive* d'une salle.

Les emplacements des sources et des récepteurs dans la salle ont été choisis d'après le schéma d'une grille, espacée de 4 m, superposée au plan de la salle. Cette procédure assure que, dans la totalité des salles, des couples *géométriquement équivalents* soient mesurés, permettant une comparaison directe de l'effet apporté par la salle sur des couples de mesures identiques.

8.2 Calcul des critères acoustiques

Les mesures de réponse impulsionnelle ont été effectuées par le programme de mesure **AMS** (développé par la société APIA, en collaboration avec le CNET, [JGS84], [War93]), utilisant une séquence pseudo-aléatoire de longueur maximale. Cette technique garantit un bon rapport signal sur bruit des mesures, ainsi que la reproductibilité des mesures et un calibrage fiable de la chaîne de mesures.

Les réponses impulsionnelles sont ensuite analysées en bandes d'octaves¹ et un certain nombre de critères acoustiques sont calculés directement par le programme d'analyse :

- le temps de réverbération, TR^2 ;
- l'amplification de la salle, G ;
- les énergies dans les différentes plages temporelles : **OD** ([0 ms, 20 ms]), **R1** ([20 ms, 40 ms]), **R2** ([40 ms, 80 ms]), **R3** ([80 ms, 160 ms]), **R4** ([160 ms, ∞]). Les frontières

1. Une décroissance directe et une décroissance intégrée (par la méthode de Schroeder, [Sch65]) sont calculées et stockées pour chaque bande d'octave.

2. La procédure de calcul du temps de réverbération n'est pas identique à celle suggérée dans la norme ISO ([ISO93]), où une régression linéaire sur la plage énergétique [-5 dB, -35 dB] ou [-5 dB, -25 dB], selon la dynamique de la mesure, est conseillée. Le programme AMS établit d'abord la date d'arrivée du son direct (la notion de temps absolu est conservée grâce au déclenchement de l'enregistrement sur disque dur par la carte d'acquisition, qui pilote aussi l'envoi de la séquence vers le haut-parleur). Ensuite, sont calculées la date à laquelle le signal devient inférieur au niveau de bruit ainsi que la différence de niveau entre le niveau maximal et le niveau du bruit. A partir de ces données, une première estimation du TR est effectuée et le TR final est calculé par une régression linéaire sur la décroissance intégrée sur les bornes temporelles [date d'arrivée du son direct + 10% du $TR_{estimé}$, date d'arrivée du bruit - 10% du $TR_{estimé}$]. Transformées en plages énergétiques, ces bornes correspondent, pour un rapport signal sur bruit qui atteint habituellement les 30 dB en basses fréquences et les 40 dB en hautes fréquences, à environ [-6 dB, -24 dB] pour une faible dynamique de mesure, et la plage d'évaluation peut atteindre l'intervalle [-6 dB, -35 dB] pour de fortes dynamiques de mesure. Le programme utilise automatiquement la plage énergétique correspondant à la dynamique de mesure dans la bande d'octave concernée. L'étude de la formule utilisée montre que les valeurs sont très proches de celles calculées selon la norme ISO.

temporelles ne sont pas abruptes, car un filtre de cross-over d'une constante de temps de 5 ms est appliqué;

- le temps central et l'écart-type des premières réflexions, calculés séparément pour les premières réflexions (dans **R1**), les deuxièmes réflexions (dans **R2**) et dans la plage générale [20 ms,160 ms];
- quelques critères acoustiques qui ont été trouvés comme étant liés à la perception de la qualité acoustique, comme le son direct étendu (DirE) ou le critère de D2. La campagne de mesures ayant été effectuée à partir de 1990, ces critères correspondent aux analyses des tests en laboratoire effectuées avant cette date et n'intègrent pas les formules finales proposées par Jean-Pascal Jullien (cf. les résultats détaillés dans le chapitre 3.4).

A partir de ces données, appelées pré-critères et calculés automatiquement par le programme de mesures et stockés dans un fichier, un grand nombre de critères acoustiques a ensuite été calculé. On y retrouve la quasi-totalité des critères utilisés habituellement en acoustique et trouvés dans la littérature (cf. la discussion et les formules données dans le chapitre 2 sur l'étude bibliographique)³, des critères proposés par Jean-Pascal Julien dans l'explication des résultats des tests en laboratoire (cf. le chapitre 3.4), ainsi que d'un certain nombre de critères définis spécifiquement afin d'interpréter les données de cette campagne de tests d'écoute. Tous ces critères ont été calculés en utilisant le programme d'analyse statistique et de graphique **S** ([BCW88]) qui a été utilisé également pour la totalité des analyses statistiques. La souplesse des calculs dans ce programme a permis de calculer et d'essayer les performances de plus d'une centaine de critères acoustiques — sachant que souvent il ne s'agissait que de petites variations dans la définition des critères, testées dans le but d'une optimisation de la correspondance entre les données perceptives et les données des mesures objectives. Tous les critères ont été calculés par bande d'octave; ensuite, des moyennes de bandes d'octave ainsi que les pentes vers les hautes et les basses fréquences ont été calculées.

8.3 Caractérisation de la source de mesures

La source de mesures utilisée était un haut-parleur *directif* de type *Yamaha NS1000*. Il a préalablement été l'objet d'une caractérisation exhaustive en chambre sourde ([Dam91]). Deux types de mesures ont été effectués: des mesures de diagrammes de directivité, en utilisant une table tournante (par tiers d'octave, pour le plan horizontal comme pour le plan vertical), et des mesures de puissance acoustique, par la méthode de 20 points en suivant la norme AFNOR NF S 31-026.

Ensuite, plusieurs modèles de caractérisation de la source ont été essayés:

- indice de directivité (**DI**, "directivity index");
- angle vertical pour -3dB, angle horizontal pour -3dB;
- angle vertical pour -6dB, angle horizontal pour -6dB;
- angle vertical pour -3dB et -6dB, angle horizontal pour -3dB et -6dB;
- angle vertical pour -3dB, angle horizontal pour -3dB et **DI**;
- angle vertical pour -6dB, angle horizontal pour -6dB et **DI**.

3. Le critère d'IACC n'a pas pu être calculé car il nécessite des mesures effectuées avec une tête artificielle. D'autres critères ont uniquement pu être calculés de manière approximative, à cause du protocole de mesures utilisé dans la campagne de mesures (cf. la discussion ci-après).

La correspondance entre les diagrammes de directivité *mesurées* et les modèles de directivité simplifiée a globalement été la meilleure en utilisant seulement l'indice de directivité statistique, **DI**.

L'indice de directivité **DI** est défini comme le rapport énergétique (en dB) entre la pression acoustique quadratique mesurée en face à une distance de 1 m et la pression acoustique quadratique que l'on aurait mesurée avec une source omnidirectionnelle de puissance égale (la pression acoustique quadratique d'une enceinte omnidirectionnelle à une distance de 1 m est égal à la puissance acoustique de l'enceinte normalisé moins 11 dB).

Dans la pratique, le **DI** est calculé en utilisant la formule suivante :

$$DI = LP_0^2 - \overline{LP^2}, \quad (8.1)$$

où LP_0^2 est la pression quadratique de référence (mesuré en face à 1 m du centre acoustique) et $\overline{LP^2}$ est la pression quadratique moyenne relevée pour les 20 positions, exprimée en dB.

Le tableau 8.1 suivante donne le **DI** de l'enceinte de mesures, pour les différentes bandes d'octaves.

octave	DI[dB]
63	2.15
125	2.39
250Hz	5.12
500Hz	7.18
1kHz	6.00
2kHz	5.42
4kHz	7.91
8kHz	8.80

TAB. 8.1 - Indice de directivité **DI**, en dB, pour la source de mesures Yamaha NS1000, par bande d'octave.

8.4 Reconstitution d'une enceinte omnidirectionnelle

Afin d'obtenir une vue synthétique, des "mesures" avec un haut-parleur omnidirectionnel ont été reconstituées. Il s'agit de l'emplacement situé au centre de la scène, pour lequel les cinq directions d'émission ont été mesurées. La reconstitution d'un haut-parleur omnidirectionnel consiste à sommer les contributions des cinq directions d'émission *par plage temporelle*. L'avantage de la reconstitution *a posteriori* repose dans le fait que les mesures ont été effectuées l'une après l'autre et qu'aucune interférence entre les haut-parleurs individuels ne peut se produire (la caractérisation de l'enceinte, établie en chambre sourde, [Dam91], reste donc entièrement valable). Par contre, le nombre de cinq haut-parleurs, permettant de reconstituer un rayonnement omnidirectionnel, est très petit. Une analyse de la caractérisation de l'enceinte en chambre sourde montre que la "source" en résultant a un rayonnement raisonnablement omnidirectionnel jusqu'à une fréquence de 2 kHz, [CBW95].⁴

Une autre question repose dans l'erreur commise par rapport à une véritable source omnidirectionnelle en n'ayant pas fait de mesures avec le haut-parleur orienté vers le bas. Par contre, le rayonnement des instruments d'orchestre vers le bas est atténué par l'absorption des musiciens. On peut supposer que la source reconstituée se rapproche davantage d'une figure de rayonnement d'un instrument d'orchestre joué par un musicien.

Tous les critères cités dans le paragraphe précédent ont été calculés à partir de cette reconstitution d'un haut-parleur omnidirectionnel et individuellement sur chaque direction d'émission.⁵

4. La plupart des laboratoires de recherche utilisent un haut-parleur dodécaédrique, donc avec 12 enceintes, comme source. Ces sources ont un rayonnement omnidirectionnel jusqu'à une fréquence de 4 kHz.

5. La différence est importante, surtout dans deux cas : premièrement, certains critères proposés par Jean-

8.5 Limites dues au protocole de mesure

On discutera encore certaines *limites* dans le calcul des critères acoustiques utilisés dans les analyses, limites dues au protocole de mesures et au programme d'analyse utilisés :

IACC : le critère IACC ainsi que tout autre critère binaural (par exemple la clarté binaurale ou le temps central binaural, [Leh76]) n'ont pas pu être calculés. Ces critères nécessitent des mesures avec une tête artificielle comme récepteur ;

critères spatiaux : les critères spatiaux (par exemple : l'efficacité latérale, LE (en dB) ou l.e.f. (en linéaire), d'après Barron et Marshall, [BM81], chapitre 2.11 ; la distance effective de réverbération ("wirksamer Hallabstand") d'après Reichardt et Lehmann, [Leh75], chapitre 2.10.1 ; ou encore les critères ANG1 et ANG2 proposés par J.-P. Jullien, chapitre 3.4) intègrent tous une dépendance de la direction d'arrivée du son. Dans la plupart des cas, les auteurs donnent également une approximation par les directivités standards des microphones (omnidirectionnelle, cardioïde, figure 8). Les mesures, avec ces directivités de microphone, ont été effectuées uniquement pour la direction d'émission "face" du haut-parleur, les critères correspondants peuvent être calculés uniquement pour une émission frontale. Les valeurs des critères pour une émission omnidirectionnelle ne sont pas accessibles ;

bornes temporelles : un certain nombre de critères classiques de rapports énergétiques, comme la clarté C50, le "Deutlichkeitsgrad" D ou le "Hallmaß" H, est défini avec une borne temporelle de 50 ms. Cette frontière n'étant pas adaptée aux bornes temporelles du programme d'analyse, les critères ont été calculés en utilisant une borne temporelle de 40 ms ;⁶

EDT : dans le chapitre 3.4.3, les différentes méthodes permettant de calculer les critères des temps de réverbération précoce ont été discutées. La définition originale de ce critère ([ASS65], [Jor70]) prévoyait une régression linéaire sur les plages d'évaluation des différents temps de réverbération précoce. Une autre méthode, plus pertinente du point de vue perceptif, a été suggérée : il s'agit de calculer la différence temporelle absolue entre la date d'arrivée du son direct et le temps où le niveau de la décroissance intégrée atteint -10 dB (ou -15, -20, selon les définitions) **re.** le niveau total. L'EDT ne figurant pas dans la liste des critères calculés par le programme d'analyse, il faudrait effectuer un changement de programme d'analyse, ou calculer les valeurs par un autre programme extérieur. Par ailleurs, des études effectuées par David Griesinger (e.g. [Gri95a]), ont clairement montré que les valeurs calculées selon les deux méthodes sont souvent proches (quand le son direct n'est pas prépondérant) et que, sinon, la correspondance avec la perception de la réverbérance est meilleure pour les valeurs calculées en prenant la différence *absolue*. Les données recueillies lors de la campagne européenne confirment ce résultat : un fort son direct *diminue* la perception de la réverbérance. Il en a été conclu que l'évidence en faveur

Pascal Jullien contiennent une comparaison de l'énergie dans deux plages temporelles. Le maximum pouvant changer avec l'orientation de la source, la somme des contributions doit être effectuée *avant* la comparaison des contributions. Deuxièmement, pour l'évaluation du masquage postérieur, les contributions spatiales doivent être sommées *avant* l'application des formules de masquage.

6. Compte tenu du fait que les sources du programme sont disponible à l'Ircam, un changement des bornes temporelles serait assez facilement possible et est prévu dans un futur proche. Comme les frontières entre les différentes plages temporelles de la réponse impulsionnelle ne sont pas connues avec certitude (frontière R1/R2 à 40 ms ou à 50 ms, frontière R2/R3 à 80 ms ou à 100 ms, frontière R3/R4 à 160 ms ou plus tard) deux solutions sont envisagées : soit une découpe plus fine de la réponse impulsionnelle (par exemple par des plages de 10 ms, augmenté à 20 ms et ensuite 40 ms pour les plages plus tardives de la réponse), soit en donnant différentes coupes "en parallèle". En même temps un changement de la structure globale du programme d'analyse est prévu, rendant nettement plus simple la possibilité de calculer des nouveaux critères, définis *a posteriori*, à partir des courbes de décroissance par octave déjà calculées et stockées. Il s'agissait alors de seulement calculer de nouveaux tableaux de valeurs de critères acoustiques. Dans le cadre de cette thèse, l'effort considérable de temps nécessaire pour refaire la totalité des analyses, après un changement de programme, a été considéré comme démesuré par rapport aux précisions qui auraient pu être obtenues.

de la méthode directe proposée est suffisamment prouvée, donc les EDT par régression linéaire n'ont pas été calculés. La méthode de calcul employée a été la suivante : à partir du temps 160 ms après la date de l'arrivée du son direct (pour cette date l'énergie restante est connue exactement), une décroissance exponentielle, avec une pente donnée par le temps de réverbération TR, est supposée, et les temps correspondants à une décroissance à -10, -15 et -20 dB (ou autres) sont calculés. Une vérification, en comparant les valeurs de l'EDT ainsi calculées avec les EDT calculés à la main, sur les courbes de décroissance intégrée par bande d'octave, a montré que la méthode utilisée n'introduit pas d'erreurs importantes ;

autres emplacements sur scène : compte tenu du fait que la totalité des directions d'émission a été mesurée uniquement pour l'emplacement T0 au centre de la scène, les autres emplacements ne peuvent être étudiés que pour des directions d'émissions *spécifiques*. La reconstitution d'une source omnidirectionnelle n'est pas possible pour ces emplacements. Notamment, il s'avère impossible de reconstruire une "source élargie omnidirectionnelle" couvrant la totalité de la scène — ce qui mènerait à des mesures encore plus synthétiques — représentatives du comportement global de la salle avec un orchestre couvrant la scène ;

symétrie des salles : l'emplacement "T0", pour lequel toutes les directions d'émission ont été mesurées, se trouvait au milieu de la scène, dans l'axe de symétrie des salles (toutes les salles ont été, au moins approximativement, symétriques). Certains emplacements du récepteur (tous ceux finissant par le code "0") se trouvaient également dans l'axe de symétrie (pour les mesures comme pendant les tests d'écoute). Pour les couples où la source et le récepteur se trouvaient dans l'axe de symétrie de la salle, des effets d'*interférence* constructive se sont produits, menant à une surestimation de l'énergie, notamment dans les basses fréquences. Ce phénomène a peu d'effet pendant les tests d'écoutes car peu d'instruments se trouvent réellement sur l'axe de symétrie. Néanmoins, il est intéressant de noter que, dans les tests d'écoutes, un *bonus* semble attribué aux places centrales, placées dans l'axe de symétrie — ce qui mène surtout à une meilleure impression de la balance générale.

8.6 Analyse des mesures à partir d'ACPs

La première question concernant les mesures objectives — notamment dans le cas où le nombre de critères acoustiques étudiés a été multiplié — est leur corrélation ou, formulé différemment, leur *indépendance* dans le cas pratique de mesures effectuées dans une ou plusieurs salles.

On commencera avec l'analyse des mesures du haut-parleur omnidirectionnel reconstitué, au centre de la scène, mesures qu'on appellera "T0o" (T0, pour l'emplacement, o, pour omnidirectionnel). Une analyse en composantes principales, ACP, est-elle capable de fournir le nombre de dimensions *indépendantes* de l'espace formé par les critères acoustiques ? Et, deuxièmement, les variations des critères sont-elles pertinentes, c.-à-d., produiront-elles des effets perceptibles ? En fait, les deux questions sont intrinsèquement liées car l'ACP prend la variance de chaque critère objectif comme paramètre d'entrée.⁷ Pourtant, *a priori*, la variance d'un critère objectif n'a pas de sens en elle-même car elle dépend de l'échelle employée (la variance d'un temps de réverbération mesuré en millisecondes est différente de la variance du même critère mesuré en secondes). Il faut alors traduire la variance de chaque critère objectif en importance perceptive, en utilisant la *sensibilité* perceptive pour une variation objective. Pour un certain nombre de critères, les sensibilités ont été évaluées et se trouvent dans la littérature (e.g. [CM82]). A partir

7. Les ACP forment toute une famille d'analyses multidimensionnelles. La première étape consiste à effectuer une décomposition en valeurs propres de matrice. Selon la définition utilisée, la décomposition est soit effectuée sur la matrice originale — en intégrant les variances des colonnes de la matrice — soit sur la matrice normalisée, mettant toutes les variances arbitrairement à 1. D'autres variantes utilisent une métrique non-euclidienne pour la représentation finale de l'espace multidimensionnel.

des tests en laboratoire effectués à l'Ircam, les sensibilités ont également pu être déterminées pour un certain nombre de critères (cf. les résultats décrits dans le chapitre 4). Sinon, quand les sensibilités ne sont pas connues, la seule possibilité consiste à effectuer une ACP à partir des critères *normalisés* à une variance égale (la normalisation ramène les valeurs de chaque critère à une moyenne de 0 et une variance de 1). Mais dans ce cas, un critère ayant une variabilité quasi-nulle (et n'ayant donc aucun effet perceptif) aura un poids égal à d'autres critères ayant des fortes variations.

On commencera donc par étudier seulement les critères pour lesquels une sensibilité a été déterminée préalablement. Dans le chapitre 6.1, une ACP des données subjectives recueillies dans le Concertgebouw d'Amsterdam a été présentée. On a vu que les deux premiers axes de l'ACP expliquent déjà plus de 70% de la variance totale contenue dans les réponses aux questionnaires.⁸ Est-ce parce que les sujets, en situation de concert, ne pourraient pas différencier selon plus de trois ou quatre aspects indépendants? Ou parce que les critères acoustiques sont très corrélés?

8.6.1 Critères de la thèse de Catherine Lavandier

Un premier essai a été effectué avec la base de critères objectifs proposée dans la thèse de Catherine Lavandier ([Lav89], cf. chapitre 3.3), en utilisant les sensibilités données au même endroit. La prochaine figure (fig. 8.1) décrit le plan 1/2 de l'ACP calculée en utilisant cette base de critères objectifs, mesurés au Concertgebouw Amsterdam.

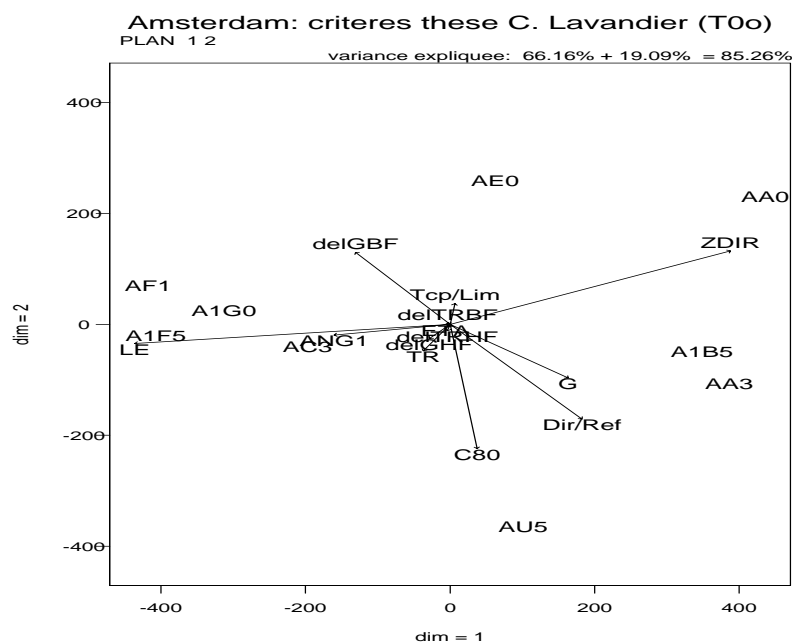


FIG. 8.1 - Plan 1/2 de l'ACP des critères objectifs faisant partie de la base de critères proposée dans la thèse de C. Lavandier, mesurés au Concertgebouw Amsterdam. On considère une source omnidirectionnelle au centre de la scène.

On remarque surtout la très forte corrélation des critères objectifs — proposés comme base de critères objectifs liés au facteurs perceptifs structurant notre perception de la qualité

8. Le chiffre donné est issu de l'analyse des moyennes des réponses par place, moyennées à travers les différentes œuvres. Les analyses subséquentes avaient montré que, au Concertgebouw Amsterdam, les œuvres étaient suffisamment proches pour ne pas trop influencer les réponses aux questionnaires. Le chiffre de 70% est donc applicable pour l'influence de l'acoustique sur les réponses aux questionnaires dans cette salle.

acoustique. Les deux premiers axes de l'ACP expliquent 85% de la variance totale, et le premier de ces deux axes, seul, explique deux tiers de la variance.

On note alors que, dans une situation réelle, les critères objectifs, *a priori* indépendants (surtout en laboratoire, où des détails des champs sonores peuvent être contrôlés finement), sont fortement corrélés. Sur la figure 8.1, en étudiant l'emplacement des places à l'intérieur de la salle, on constate qu'il s'agit, à peu de choses près, d'une représentation géométrique de la salle: le premier axe traduit l'effet d'un éloignement par rapport à la source et le deuxième axe différencie les places centrales des places excentrées.⁹

En comparant le plan 1/2 de l'ACP des mesures objectives (fig. 8.1) avec le plan 1/2 de l'ACP sur les réponses *subjectives* au Concertgebouw Amsterdam (figure 6.2), on peut en déduire que l'espace des mesures objectives, calculé à partir des mesures avec une source reconstituée omnidirectionnelle située au centre de la scène, est encore plus dégénéré que l'espace des réponses subjectives.

8.6.2 La base de critères proposée par J.-P. Jullien

L'interprétation change-t-elle lorsque l'on considère la base de critères proposée par J.-P. Jullien après l'étude approfondie des tests en laboratoire effectués à l'Ircam, cf. chapitre 3.4? La figure suivante (fig. 8.2) montre que, avec cette base, l'espace devient légèrement moins dégénéré, néanmoins le premier axe explique 60% de la variance et les deux premiers axes suffisent à expliquer plus de 80% de la variance totale.

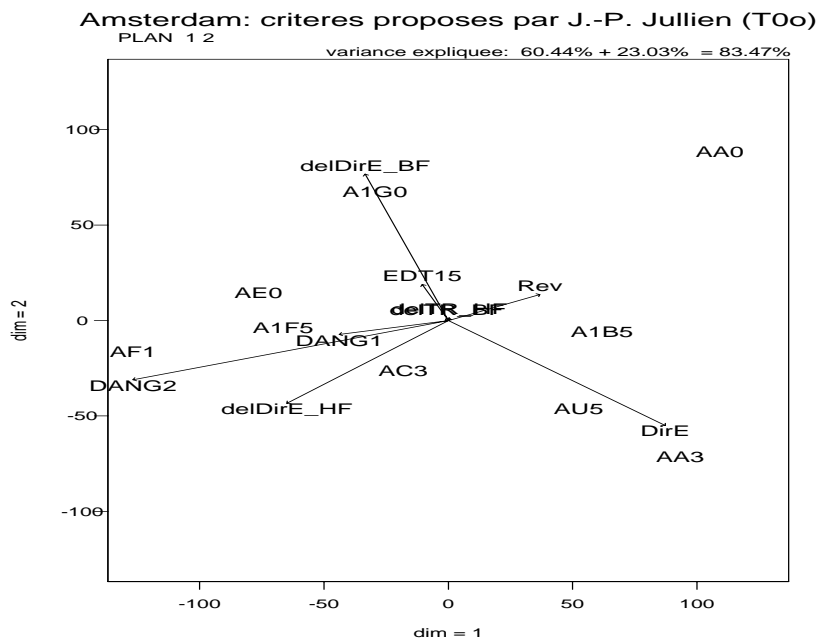


FIG. 8.2 - Plan 1/2 de l'ACP des critères objectifs faisant partie de la base de critères proposée par J.-P. Jullien (cf. chapitre 3.4), mesurés au Concertgebouw Amsterdam. On considère une source omnidirectionnelle au centre de la scène.

L'espace objectif est plus dégénéré que l'espace subjectif, et il est donc difficile d'expliquer la totalité des réponses aux questionnaires avec les critères objectifs considérés. Faut-il alors

9. L'apparition de ce deuxième axe est en partie liée au problèmes du protocole de mesures, discutés ci-dessus: la source ainsi que certains récepteurs se trouvant dans l'axe de symétrie de la salle, des effets d'interférence constructive se sont produits. Il est intéressant de noter que l'effet de ces interférences reste visible *tard* dans la réponse impulsionnelle, menant à une *augmentation* de l'énergie du champ tardif, donc à une diminution de la clarté C80.

ajouter d'autres critères objectifs? Le problème est que, pour les autres critères, au moins dans la plupart des cas, aucune information sur leurs *sensibilités* perceptives n'est disponible. On est alors obligé de normaliser ces critères objectifs avant d'effectuer une ACP — sachant qu'on attribuera ainsi une importance égale à tous les critères, même à ceux dont on sait qu'ils ont une variation négligeable. Une ACP a été calculée sur une matrice normalisée avec plus d'une centaine de critères objectifs. La figure n'est pas reproduite ici car, avec tant de critères, le graphique devient illisible. Il s'avère que l'interprétation générale se trouve très peu affectée: le premier axe explique 58% de la variance, le deuxième 23%, les deux premiers axes de l'ACP expliquent toujours plus de 80% de la variance totale.¹⁰

8.6.3 Toutes salles confondues

Que se passe-t-il quand on ne considère plus une seule salle mais la totalité des places écoutées et mesurées dans les salles de la campagne européenne?

Comparant le plan 1/2 des réponses aux questionnaires au Concertgebouw Amsterdam (figures 6.2 et 6.3) avec les figures 8.5 et 8.6 suivantes, on constate surtout qu'il existe un axe supplémentaire lié à la question sur la réverbérance.¹¹ Cet axe subjectif a permis aux sujets de *différencier* les salles individuelles — sur les autres axes, les différences observées à l'intérieur d'une même salle sont souvent égales sinon supérieures aux différences observées entre les salles.

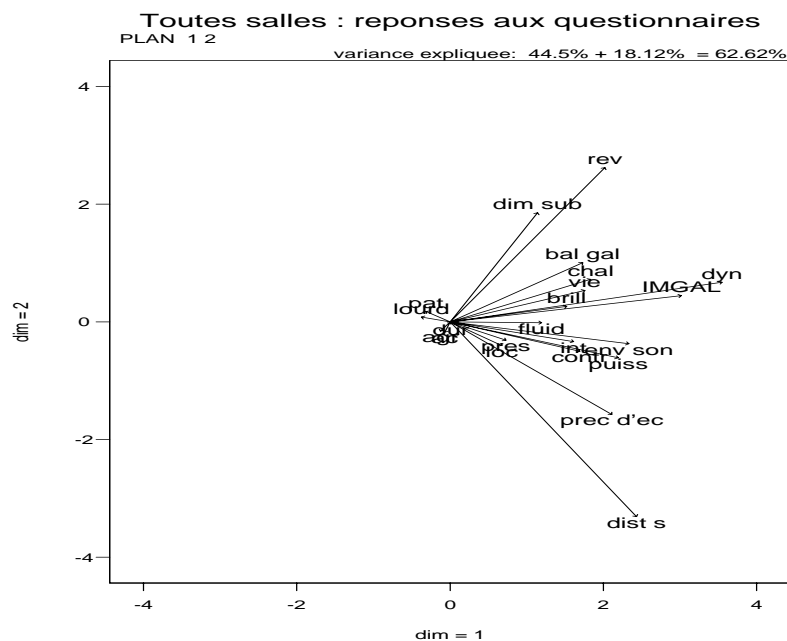


FIG. 8.3 - Plan 1/2 de l'ACP des réponses aux questionnaires, pour toutes les places dans toutes les salles de la campagne européenne. Moyennes par place pour toutes les œuvres.

10. L'interprétation de ces chiffres nécessite une certaine prudence: pour une centaine de critères objectifs normalisés, chacun des critères n'explique que 1% de la variance — et même un axe "postérieur" peut alors être pertinent. Ce qui est encore plus significatif est que l'emplacement des places dans le plan 1/2 de l'ACP ne change quasiment pas, indiquant la stabilité entre une ACP sur un sous-ensemble choisi de critères objectifs et une ACP sur la totalité des critères objectifs calculés.

11. Plus exactement, l'axe est formé par les deux questions sur la réverbérance et sur la dimension subjective de la salle. De plus, il ne s'agit pas exactement du deuxième axe de l'ACP — mais, sachant que les axes ne sont fixés que par la maximisation de la variance, deux axes orthogonaux peuvent être construits par les questions sur la distance subjective et sur la réverbérance.

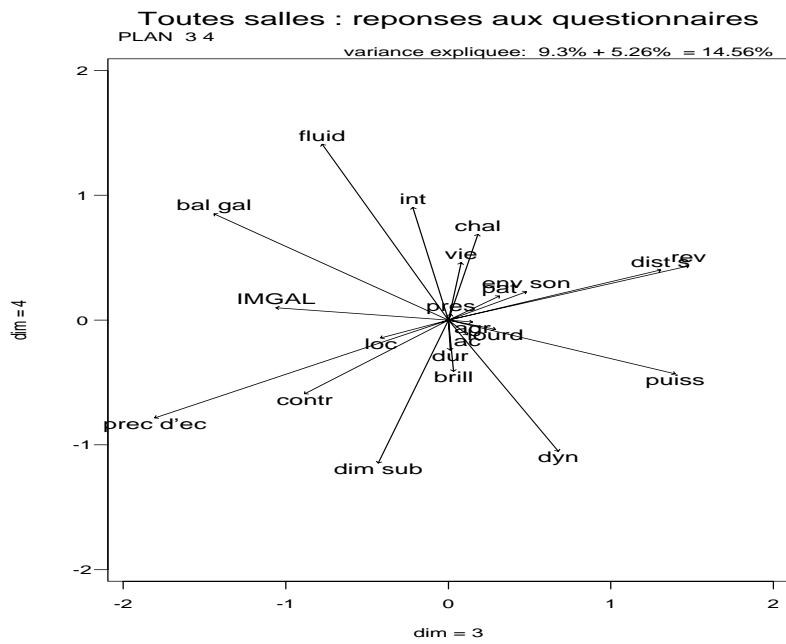


FIG. 8.4 - Plan 3/4 de l'ACP des réponses aux questionnaires, pour toutes les places dans toutes les salles de la campagne européenne. Moyennes par place pour toutes les œuvres.

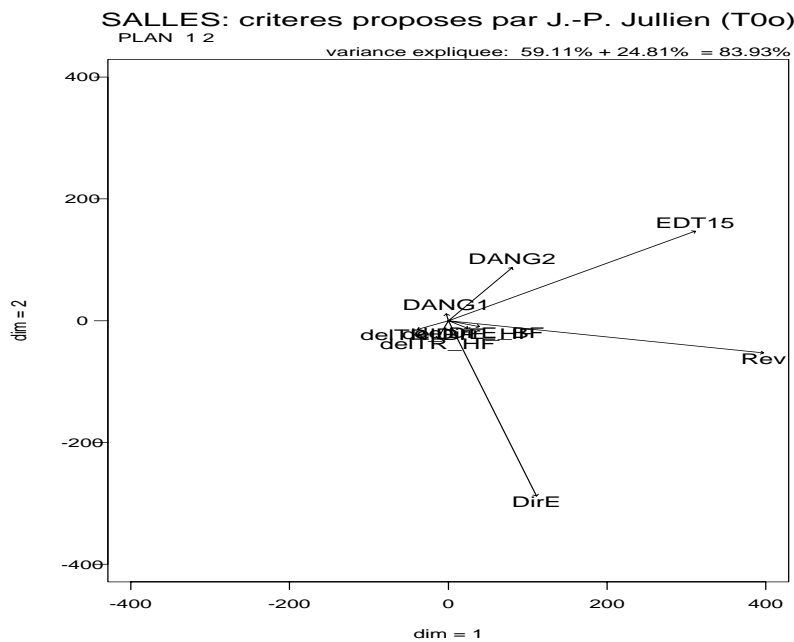


FIG. 8.5 - Plan 1/2 de l'ACP de la base de critères objectifs, proposée par J.-P. Jullien, pour toutes les places dans toutes les salles de la campagne européenne. On considère une source omnidirectionnelle au centre de la scène.

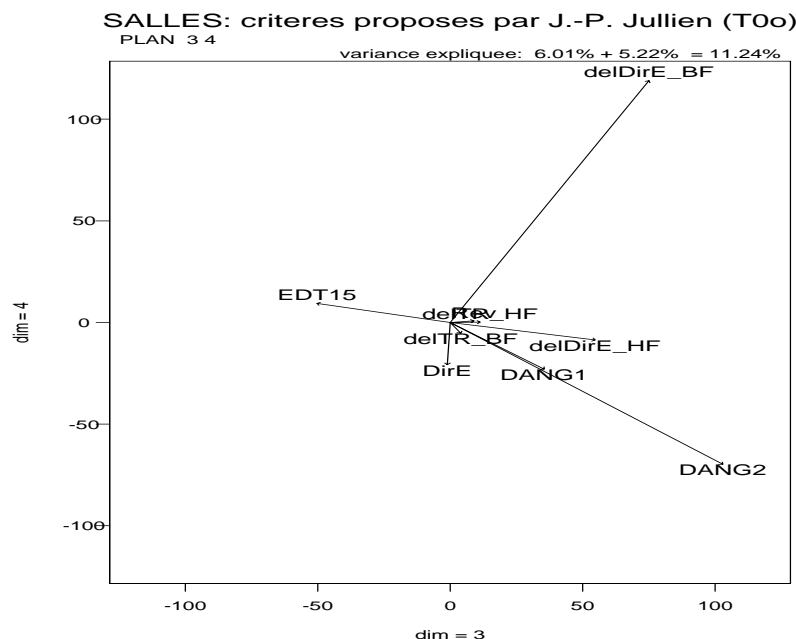


FIG. 8.6 - Plan 3/4 de l'ACP de la base de critères objectifs, proposée par J.-P. Jullien, pour toutes les places dans toutes les salles de la campagne européenne. On considère une source omnidirectionnelle au centre de la scène.

Cette augmentation de la variance sur la question de la réverbérance est reflétée par l'augmentation de la variance sur le critère d'EDT dans le plan 1/2 de l'ACP des mesures objectives (fig. 8.5). Pour l'ACP des mesures objectives, la variation du temps de réverbérance (affectant les critères de l'EDT ainsi que le critère de Rev), forme même le premier axe de l'ACP.

Mais si l'on regarde les pourcentages de la variance expliquée, on observe que rien n'a changé : l'espace des critères objectifs est toujours nettement plus dégénéré que l'espace des réponses aux questionnaires. Les deux premiers axes de l'ACP sur les mesures expliquent plus de 80% de la variance totale contenue dans les mesures, pour l'ACP sur les réponses subjectives, alors que les deux premiers axes n'expliquent que 60% de la variance totale contenu dans les réponses aux questionnaires. On peut alors conclure que :

Les critères objectifs, mesurés avec un haut-parleur omnidirectionnel situé au centre de la scène, ne permettent pas d'expliquer la totalité des réponses aux questionnaires.¹²

Mais, dans une certaine mesure, ce résultat n'est guère surprenant. Tout le long du chapitre 6 sur l'analyse des questionnaires, on a constaté l'importance de la question sur la balance générale. On avait conclu que la notion de balance générale figure très tôt dans la hiérarchie des facteurs perceptifs. De plus, on avait remarqué que la notion de balance n'a pas été étudiée lors des tests en laboratoire.

Il n'est donc pas surprenant qu'aucun critère directement lié à la notion de balance générale

12. En principe ce raisonnement n'est pas irréprochable. Plusieurs autres raisons peuvent expliquer la disparité des variances expliquées : le fort bruit résiduel contenu dans les questionnaires, une éventuelle sur-évaluation ou sous-évaluation de la sensibilité sur certains critères objectifs ou encore, la différence entre salles vides (lors des mesures) et salles occupées (lors des tests d'écoute). On doit pondérer légèrement : les résultats décrits donnent des indications importantes que les mesures avec un haut-parleur omnidirectionnel au centre de la scène ne suffisent pas pour expliquer la totalité de l'information contenue dans les réponses aux questionnaires.

ne soit inclus dans la base de critères objectifs proposée par J.-P. Jullien. Mais, n'est-il pas impossible de définir des critères représentatifs de la balance générale à partir des mesures effectuées avec *une* source *omnidirectionnelle*, placée au centre de la scène?

On pourra au moins vérifier si les autres questions peuvent être expliquées avec les mesures effectuées avec un haut-parleur omnidirectionnel. En enlevant la question sur la balance générale, le premier axe de l'ACP des réponses au Concertgebouw Amsterdam explique 64% de la variance, donc plus que le premier axe de l'ACP sur les mesures effectuées dans cette salle (toujours sur T0o, un haut-parleur omnidirectionnel reconstitué). Mais, pour l'ensemble des salles de la campagne européenne, la variance expliquée par le premier axe n'augmente que de 45% (avec la question sur la balance) à 46% (sans la balance générale). Il semble donc qu'il reste toujours un résidu de l'information contenue dans les réponses aux questionnaires qui ne peut pas être expliqué avec les mesures omnidirectionnelles.

On se demandera s'il faut chercher l'information supplémentaire nécessaire afin de mieux expliquer les réponses aux questionnaires en considérant les mesures effectuées avec d'autres *emplacements* de la source, ou en considérant les différentes *directions d'émission* de la source.

8.6.4 Comparaison des bases

Avant d'aborder cette question — qui, en grande partie, ne peut être résolue qu'*a posteriori*, en évaluant la correspondance des données perceptives avec les différentes mesures objectives, on étudiera une autre question: peut-on comparer les deux bases, celle proposée par C. Lavandier dans sa thèse avec celle proposée par J.-P. Jullien? Une projection des réponses aux questionnaires (à l'exception de la question sur la balance générale) permettra d'évaluer et comparer les performances des deux bases. On utilisera le fait que les ACP des différents ensembles de critères objectifs mesurés nous donnent des axes orthogonaux. La somme (quadratique; plus exactement la racine carrée de la somme des carrés) des corrélations de chaque question avec les axes de l'ACP donne une estimation du pouvoir explicatif de chaque sous-ensemble de critères.¹³ Le tableau 8.2 suivant donne la corrélation moyenne pour toutes les questions, sauf celle sur la balance générale, avec les *quatre* premiers axes de l'ACP de la base de critères de J.-P. Jullien, de l'ACP de la base proposée par C. Lavandier et de l'ACP de tous les critères objectifs calculés. En calculant la corrélation avec la question sur la balance générale, il s'avère que le pouvoir explicatif des différentes bases (pour les mesures T0o) est réellement plus faible pour cette question.

cor cumulée (r)	Amsterdam	Toutes salles
Base propose par J.-P. Jullien	0.83	0.43
Base propose par C. Lavandier	0.81	0.41
Tous critères normalisés	0.83	0.42

TAB. 8.2 - *Moyenne des corrélations des réponses aux questionnaires (sauf la question sur la balance générale) avec les 4 premiers axes des ACP des mesures. Les taux de corrélation donnés sont la somme (quadratique) des corrélations avec les axes individuels. Première ligne: ACP de la base de critères proposée par Jean-Pascal Jullien, deuxième ligne: ACP de la base proposée dans la thèse de Catherine Lavandier, troisième ligne: ACP de tous les critères (environ une centaine) normalisés.*

Dans le tableau 8.2, les performances des différentes bases indiquent que la base proposée par J.-P. Jullien, après une étude approfondie des résultats des tests en laboratoire, a un meilleur pouvoir d'explication des réponses aux questionnaires. De plus, cette base est la plus réduite (9

13. L'orthogonalité des axes permet de sommer les carrés des corrélations avec les différents axes. Par contre, il est difficile de traduire la corrélation globale en pourcentage de la variance expliquée, car la corrélation introduit un facteur multiplicatif *indépendant* pour chaque axe.

critères au lieu de 13 pour la base de la thèse de C. Lavandier et cent pour tous les critères). On est donc amené à conclure que la base, originalement proposée pour l'explication des tests en laboratoire, est également bien adaptée pour l'explication des résultats des tests d'écoute dans les salles réelles.

Comment comprendre la diminution du pouvoir d'explication lorsque l'on considère toutes les salles plutôt que la salle d'Amsterdam seule? On pourrait penser que cette diminution est induite par le fait d'ajouter des salles — et donc des comparaisons entre les places à l'intérieur d'une même salle et entre différentes salles, avec des laps de temps très différents pour les deux comparaisons. Les sujets changent-ils d'échelle de valeurs (ou plutôt d'ampleur d'échelle) pour les deux types de comparaison? Mais il y a aussi des changements objectifs: les tailles de salles ont été très différentes, et les niveaux (en dB) de la force sonore, comme des différentes parties de la réponse impulsionnelle, sont nettement *plus élevés* dans les petites salles. Cette augmentation de l'amplification est compensée par la taille plus réduite des ensembles orchestraux jouant dans les salles de taille réduite, ensembles ayant une puissance sonore bien plus faible.

Afin de répondre à la question, on compare les pouvoirs explicatifs pour les grandes salles de concert, individuellement ainsi que mises ensemble. Le tableau 8.3 donne le pouvoir explicatif (la racine carrée de la somme quadratique des corrélations avec les quatre premiers axes des ACP) pour les quatre salles de concerts incluses dans la campagne européenne.

	Amst	Berlin	Pleyel	Vienne	Toutes salles de concert
corrélations	0.83	0.67	0.63	0.64	0.56

TAB. 8.3 - Moyenne des corrélations des réponses aux questionnaires (sauf la question sur la balance générale) avec les 4 premiers axes des ACP des mesures, pour le Concertgebouw Amsterdam, la Philharmonie de Berlin, la Salle Pleyel, la Musikvereinsaal à Vienne ainsi que pour les quatre salles réunies. Les taux de corrélation donnés sont la somme (quadratique) des corrélations avec les axes individuels.

On remarque d'abord que, par rapport au cas de la salle à Amsterdam, le pouvoir explicatif a diminué pour ces autres salles — mais pour celles-ci, une disparité plus grande des œuvres ainsi qu'une plus forte influence de l'interaction acoustique/œuvre a déjà été constatée, cf. le chapitre sur l'analyse des réponses aux questionnaires seules. Pour les salles de concerts réunies, le pouvoir explicatif diminue encore, mais il reste nettement supérieur que pour toutes les salles mises ensemble. On remarque donc un effet des deux influences:

- il faut faire attention lorsque l'on réunit des salles: les mêmes changements objectifs peuvent provoquer des changements différents pour les différentiations à l'intérieur d'une salle et pour les différentiations entre salles, dus à la différence de temps écoulé entre l'évaluation des différentes places à l'intérieur d'une même salle et entre salles;
- il est difficile de comparer *directement* des salles à vocation très différente, et notamment des salles de tailles très différentes. Il s'avère que, pour ces comparaisons, un modèle intégrant les différentes puissances acoustiques des effectifs orchestraux sur scène est indispensable. Ce modèle sera élaboré dans le chapitre 10.

Etant donnée la difficulté de comparer les mesures effectuées dans les différentes salles, dans le prochain chapitre sur la correspondance entre les mesures et les réponses aux questionnaires, on *éliminera* d'abord la moyenne de l'effet de salle ainsi que des œuvres écoutées et de leurs effectifs orchestraux: pour chaque salle, les réponses *par œuvre* ainsi que les critères objectifs seront *centrés*. On élimine l'effet des différences d'amplification des salles ainsi que des puissances acoustiques des effectifs. De plus, on se concentre sur les différences perçues et mesurées à l'intérieur des salles et le problème de la différence d'échelle entre comparaisons à court-terme et à long-terme est évacué.

Chapitre 9

Analyse de la correspondance objectif/perceptif

Dans ce chapitre, on analysera les *correspondances* entre les réponses aux questionnaires et les mesures objectives effectuées. Puisqu'aucun modèle de l'influence de l'œuvre n'est considéré dans ce chapitre, l'analyse se limitera principalement aux matrices subjectives suivantes :

- la matrice $\mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{k,m}) + \mathcal{R}$. Cette matrice, déjà décrite dans le chapitre 6 précédent, a été calculée de la manière suivante: les réponses aux questionnaires ont été séparées *par œuvre*; chaque matrice par œuvre a ensuite été individuellement centrée avant de les réunir toutes ensemble afin de former *une* seule grande matrice d'analyse. Différents sous-ensembles de salles seront étudiés :

toutes salles : $\mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{k,m}) + \mathcal{R}$, toutes salles confondues ;

Campagne : $\mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{k,m}) + \mathcal{R}$, pour les salles de la campagne européenne ;

Villette : $\mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{k,m}) + \mathcal{R}$, pour la salle de La Villette (quatre tests d'écoute ont eu lieu dans cette salle) ;

salles concert : $\mathcal{F}(p_k) + \mathcal{I}(i_{k,m}) + \mathcal{R}$, uniquement pour les quatre salles de concerts ;

- **CONCplaces :** $\mathcal{F}(p_k) + \overline{\mathcal{G}(o_m)} + \mathcal{I}(i_{k,m}) + \mathcal{R}$, la matrice des moyennes par place (à travers toutes les œuvres écoutées), uniquement pour les salles de concerts. Dans ces salles, les œuvres (ou plutôt la moyenne des œuvres par salle) étaient suffisamment semblables pour qu'on puisse comparer les réponses par place sans prendre en compte l'influence de l'œuvre.

Les mesures objectives considérées sont :

- principalement les mesures "T0o", effectuées à partir d'une source omnidirectionnelle reconstituée, située au centre de la scène ;
- les différentes directions d'émission pour l'emplacement T0 : face, jardin, cour, arrière et plafond ;
- les différents emplacements de source, avec les directions d'émission mesurées. La taille de la scène, selon les salles, étant très variable, certains emplacements ont été mesurés seulement dans certaines salles. On se limitera donc aux salles de concerts pour intégrer les différents emplacements de source ; dans toutes les salles de concerts les emplacements S1, S2, T0, T3, T4, U1 et U2 ont été mesurés (pour les codes cf. figures 4.1 ou 6.1).

9.0.5 Structure des sous-chapitres par question

On commencera l'étude de la correspondance entre les mesures objectives et les réponses aux questionnaires avec les questions retenues comme *variables d'entrée* du modèle de réduction du questionnaire: les questions sur la "puissance sonore", la "réverbérance", le "contraste", la "balance générale", la "puissance sonore des aiguës", la "puissance de graves" et sur les défauts de "pâteux" et de "heurté". Les autres questions peuvent déjà être interprétées, au moins en partie, en utilisant les coefficients du modèle de réduction, donnés dans le chapitre 7, et la correspondance objectif/perceptif trouvée pour les variables d'entrée.

Seuils théoriques

Pour chaque question, on donnera d'abord les seuils des taux de corrélation pour les différents ensembles de questionnaires étudiés. Ces seuils théoriques sont calculés en considérant le bruit, évalué comme dans le chapitre 5.5.2, à partir du premier test d'écoute à La Villette (première ligne dans les tableaux, \mathcal{R}), et à partir de la somme des termes \mathcal{R} et $\mathcal{I}(i_m, k)$, calculée indépendamment pour les tests de la campagne européenne et des tests à la Villette (cf. chapitre 5.5.6, deuxième ligne dans les tableaux). Le nombre de questionnaires par place et par œuvre est également considéré, et l'on compare la variance de ce bruit résiduel avec la variance totale sur la question considérée (sur le sous-ensemble de données considéré).

Correspondance des critères objectifs avec les réponses sur chaque question

On évaluera d'abord la correspondance à partir de quelques critères "classiques" issus de la littérature. Ensuite, les effets fréquentiels et temporels seront abordés, menant à un premier critère "candidat" pour la correspondance objective sur la question étudiée.

Direction d'émission et emplacement des sources

Puis, on s'intéressera aux influences de la direction d'émission et de l'emplacement des sources. On effectuera une optimisation de la directivité "globale" d'une source pouvant être représentative d'une source orchestrale élargie. En raison de la variabilité des tailles de scène dans les différentes salles, cette optimisation ne sera effectuée qu'en considérant les emplacements de source suivants :

- les cinq directions d'émission de la source "T0", placée au milieu de la scène — ou, pour les salles d'opéras, au milieu de la fosse d'orchestre;
- pour les salles de concerts et les salles de musique de chambre, les emplacements S1 et S2, uniquement pour la direction "face" ;
- pour les opéras, les emplacements U1 et U2, situés *sur la scène*. On pourra ainsi vérifier l'influence de la différence entre les mesures effectuées dans la fosse d'orchestre et celles effectuées sur le plateau.

Résumé sur la question

Chaque sous-chapitre se conclura par un résumé des différentes influences trouvées, où l'on donnera la formule du critère menant à la meilleure correspondance objectif/perceptif.

Intégration de l'effet de l'interaction

L'effet de l'interaction acoustique/œuvre sera abordé, pour toutes les question, dans un sous-chapitre à part, le chapitre 9.10. Une régression multiple *par œuvre* a été effectuée, en considérant les directivités suivantes :

- T0o, la source omnidirectionnelle reconstituée, située au milieu de la scène/de la fosse d'orchestre;

- T0f, la direction d’émission frontale de la même source ;
- T0p, la direction d’émission vers le plafond.

Pour effectuer cette optimisation de la directivité par œuvre, on ne considère que les œuvres et/ou les salles pour lesquelles au moins 7 places différentes ont été écoutées. Les taux de corrélation moyenne peuvent donc différer, et les taux moyens pour le critère choisi seront redonnés pour la source omnidirectionnelle ainsi que pour l’optimisation par œuvre. Bien que seulement trois directivités soient considérées pour la régression multiple — et seules les œuvres pour lesquelles un nombre suffisant de places a été écoutée sont incluses dans l’analyse — les résultats de l’optimisation de la directivité de la source orchestrale par œuvre sont souvent très instables. Dans la plupart des cas, on se limitera donc à donner un résultat “sommaire” : il s’agit du taux moyen de corrélation pour une source omnidirectionnelle, du taux moyen de corrélation pour l’optimisation de la directivité de l’ensemble orchestral et du *quotient* des deux taux moyens. Ce quotient donne un indice de l’importance de l’effet de l’interaction : s’il est proche de 1, c.-à-d. que le fait de considérer une directivité différente par œuvre n’améliore que peu la correspondance objectif/perceptif, l’effet de l’interaction acoustique/œuvre est faible. Par contre, si le quotient est élevé, cela est un indicateur d’un fort effet de l’interaction.

9.1 Puissance sonore

9.1.1 Seuils théoriques

Comme l’indique le tableau 9.1, les seuils théoriques sur la question sur la puissance sonore sont assez élevés. Cette question a donc pu être évaluée par les sujets avec beaucoup de certitude. En comparant la première et la deuxième ligne du tableau, on remarque que l’effet de l’interaction reste modéré.

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.83	0.86	0.68	0.85	0.94	0.83
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.76	0.82	0.47	0.81	0.92	0.76

TAB. 9.1 - *Seuils théoriques des taux de corrélation, pour les sous-ensembles considérés, pour la question sur la puissance sonore. La première ligne indique les seuils calculés à partir du terme \mathcal{R} , calculé à partir du premier test d’écoute à la Villette. La deuxième ligne indique les seuils calculés à partir de la somme des termes $\mathcal{R} + \mathcal{I}$, calculée individuellement à partir des tests de la campagne européenne et des tests à la Villette (cf. chapitre 5).*

9.1.2 Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la “puissance sonore”

On avait déjà supposé, dans le chapitre 7, que la question sur la puissance pourrait être liée au critère objectif de l’amplification de la salle, \mathbf{G} . En étudiant les taux de corrélations avec un certain nombre de “critères classiques”, on s’aperçoit qu’en fait, les taux de corrélations avec le critère de \mathbf{G} sont supérieurs aux taux avec les autres critères, cf. le tableau 9.2.

Dépendance fréquentielle

Le tableau 9.3 donne les taux de corrélations des réponses pour la question sur la puissance avec le critère \mathbf{G} , pour les différentes plages fréquentielles et les différents sous-ensembles considérés.

Sur tous les sous-ensembles considérés, le maximum de taux de corrélation se manifeste pour la plage fréquentielle des fréquences moyennes, c.-à-d. la moyenne des deux bandes d’octaves autour de 500 Hz et autour de 1 kHz.

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
G	0.450	0.453	0.455	0.518	0.702	0.516
OD[dB]	0.347	0.331	0.445	0.284	0.290	0.339
O40[dB]	0.383	0.385	0.444	0.407	0.338	0.391
O80[dB]	0.407	0.420	0.426	0.484	0.504	0.448
Rev	0.350	0.368	0.280	0.261	0.580	0.368
C80	0.081	-0.007	0.374	0.229	-0.215	0.092
TR	-0.080	-0.099	0.051	-0.029	0.506	0.070
EDT15	-0.066	0.016	-0.357	-0.126	0.438	-0.019

TAB. 9.2 - Taux de corrélations entre la question sur la puissance sonore et quelques critères "classiques", pour les différents sous-ensembles considérés, pour la plage fréquentielle des moyennes fréquences.

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
63	0.355	0.376	0.285	0.205	0.250	0.294
125	0.387	0.406	0.395	0.282	0.492	0.392
250	0.391	0.383	0.447	0.368	0.591	0.436
500	0.447	0.445	0.467	0.495	0.671	0.505
1k	0.434	0.436	0.435	0.509	0.709	0.505
2k	0.404	0.390	0.474	0.332	0.581	0.436
4k	0.373	0.360	0.444	0.248	0.420	0.369
8k	0.464	0.465	0.468	0.440	0.347	0.437
BF	0.416	0.423	0.446	0.364	0.588	0.448
MF	0.450	0.453	0.455	0.518	0.702	0.516
HF	0.392	0.377	0.466	0.291	0.522	0.410
delBF	0.110	0.057	0.327	-0.050	0.022	0.093
delHF	0.059	0.033	0.188	-0.123	-0.180	-0.005

TAB. 9.3 - Taux de corrélations entre la question sur la puissance sonore et le critère d'amplification de la salle, **G**, pour les différents sous-ensembles considérés, pour différentes plages fréquentielles.

Plusieurs autres plages fréquentielles ont été essayées, notamment des plages plus larges, toujours centrées autour des fréquences moyennes, mais, de manière constante, les performances se sont révélées optimales pour la plage des fréquences moyennes (MF). Toutes les analyses suivantes seront donc limitées à cette plage fréquentielle.

Par ailleurs, en étudiant le tableau 9.3, on remarque que les taux de corrélations, donc les performances de la correspondance objectif/perceptif, restent relativement faibles (comparés aux seuils théoriques calculés en considérant le bruit résiduel contenu dans les réponses aux questionnaires). Les taux de corrélations se maintiennent autour de 50%, au lieu d'un seuil théorique d'environ 75%. Serait-ce que le critère de **G** considéré n'est pas optimal? Les prochains paragraphes reprendront ces questions.

Dépendance temporelle

Que les taux de corrélations se soient montrés nettement supérieurs avec le critère de **G** qu'avec des critères mesurant l'énergie *précoce* — ces critères étaient également considérés parmi les "critères classiques" évoqués ci-dessus — démontre que la puissance sonore est liée à la puissance de la salle, plutôt qu'à la puissance précoce de la salle.

Il s'agit maintenant de savoir si toutes les plages *temporelles* de la réponse impulsionnelle contribuent à la perception de la puissance sonore de manière équivalente. En d'autres termes, on voudrait savoir si, pour la question sur la puissance, la même énergie provoque un effet

perceptif de même grandeur, indépendamment du temps d’arrivée.

Une manière simple pour donner une première réponse consiste à effectuer une régression multiple sur les différentes plages temporelles de la réponse impulsionnelle. On rapportera le résultat d’une régression multiple pour la matrice **toutes salles**, en utilisant le découpage temporel effectué par le programme AMS (cf. tab. 4.3), en utilisant les énergies par plage temporelle *en dB*. Les coefficients et les t-values (indicateurs de la certitude de dépendance) sont les suivants :¹

puiss	coefficient	t-value
OD [dB]	0.030	3.149
R1 [dB]	0.003	0.266
R2 [dB]	0.011	0.508
R3 [dB]	-0.001	-0.044
R4 [dB]	0.095	3.351

On remarque surtout le coefficient extrêmement élevé pour **R4**, énergie très tardive, arrivant au moins 160 ms après la date d’arrivée du son direct. Mais attention, **R4** est objectivement très fortement corrélée (négativement) avec la date d’arrivée du son direct (**DSAT**, “Direct Sound Arrival Time”). La raison en est la suivante (cf. également la “revised theory” de M. Barron, [BL88], [Bar93]) : la théorie de Sabine (cf. les articles de Jean-Dominique Polack sur la théorie du billard, appliquée aux salles de concerts, [Pol92], [Pol93]) prédit une distribution uniforme de l’énergie du champ diffus.² Mais cette décroissance uniforme dans la salle est référencée à la *source*, donc par rapport au temps zéro de la source. Par contre, les critères acoustiques sont calculés par rapport au temps zéro du *récepteur*, donc par rapport à la date d’arrivée du son direct. Dans une grande salle de concert, le “temps de parcours” entre la source et un récepteur lointain peut atteindre 100 ms — comparé à un “temps de parcours” pour les récepteurs proches de la source d’environ 30 ms. L’énergie dans **R4**, pour le récepteur lointain, est donc inférieure à l’énergie dans **R4** pour les récepteurs proches de la source.

Connaissant les dates d’arrivée pour les différents récepteurs, ainsi que le temps de réverbération, cette influence de la distance sur l’énergie de **R4** peut être enlevée, l’énergie corrigée étant nommée **R4DSATout**. En calculant une régression multiple sur les valeurs corrigées, on obtient les coefficients et t-values suivants :

puiss	coefficient	t-value
OD [dB]	0.042	4.702
R1 [dB]	-0.001	-0.046
R2 [dB]	0.005	0.231
R3 [dB]	0.055	1.872
R4DSATout [dB]	0.034	0.946

Le coefficient pour **R4** a sensiblement baissé, il reste néanmoins de même ordre de grandeur que le coefficient pour **OD**. Par contre, le coefficient pour **R3** a augmenté, probablement par un effet résiduel de la corrélation avec la distance source-récepteur.

Ces résultats confirment l’importance de l’énergie précoce (et même, très précoce, **OD** étant l’énergie arrivant entre 0 et 20 ms après la date de l’arrivée du son direct) et de l’énergie tardive.

1. La régression multiple a été effectuée sur les valeurs de **OD**, **R1**, **R2**, **R3** et **R4** *en dB*. Une régression, utilisant les valeurs *linéaires*, donne des résultats qualitativement identiques. Il serait encore plus rigoureux d’effectuer la sommation des contributions en linéaire et de transformer la somme en dB — ce qui n’est pas directement possible lorsque l’on utilise une régression multiple. Les autres critères, discutés plus tard, seront calculés de cette manière.

2. La théorie de Sabine prédit un champ diffus dans *toutes* les salles. Cela est exact uniquement pour une absorption uniforme (c.-à-d. que l’absorption est distribuée de manière homogène sur toutes les surfaces de la salle), cf. [Pol92], [Pol93]. Un cas opposé à l’extrême est celui d’une salle constituée de volumes *partiellement découplés*, où deux décroissances différentes s’établissent dans les différents volumes. Le temps d’établissement du champ diffus dépend également de la salle ; en général, il est de l’ordre de 100 à 200 ms. Les simulations informatiques utilisées à l’Ircam, intégrant un processus Markovien pour calculer la distribution de l’énergie sur les surfaces de la salle, permettent d’étudier le couplage entre les surfaces individuelles de la salle, et de quantifier à partir de quel moment dans la décroissance — et à quel degré — le champ devient diffus.

Mais l'importance de l'énergie intermédiaire semble moindre.³ Une optimisation des coefficients donne les poids suivants :⁴

puiss	OD[lin]	R1[lin]	R2[lin]	R3[lin]	R4[lin]
coef (en linéaire)	1	0.5	0.8	0.5	1.4

amenant les taux de corrélations suivants :

puissance	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
taux r	0.461	0.464	0.464	0.512	0.707	0.522

Mais, plutôt que d'optimiser "aveuglement", on pourrait tenter d'intégrer les optimisations des critères de DirE et de Rev, apportées par Jean-Pascal Jullien (cf. le chapitre 3.4 ou l'annexe A). Il s'agit, d'une part, de prendre en compte l'intégration *conditionnelle* des réflexions contenues dans R2 et, d'autre part, le masquage partiel du champ tardif par le son direct. La puissance objective totale est donc exprimée comme la somme de l'énergie précoce perçue et de l'énergie tardive perçue (les deux énergies en linéaire), la somme étant exprimée en dB.

Le tableau 9.4 suivant donne les taux de corrélations des sommes énergétiques des critères proposés (c.-à-d. que les énergies linéaires sont additionnées; l'énergie totale est ensuite transformée en valeurs en dB). La nomenclature est expliquée dans le titre du tableau et, pour la définition exacte des critères, cf. l'annexe A.

puissance	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
G	0.450	0.453	0.455	0.518	0.702	0.516
GDirAMSR80	0.455	0.457	0.464	0.504	0.695	0.515
GO40R80	0.457	0.459	0.471	0.484	0.682	0.511
GDirER80	0.459	0.461	0.470	0.512	0.702	0.521
GDirERev	0.447	0.455	0.464	0.517	0.699	0.516
GDirERevR3	0.446	0.455	0.463	0.517	0.696	0.515
GDirEtRev	0.452	0.458	0.471	0.524	0.711	0.523
GDirEtR80	0.461	0.462	0.476	0.517	0.710	0.525
GDirEpRev	0.443	0.451	0.464	0.499	0.682	0.508
GDirEtpRev	0.449	0.457	0.464	0.514	0.698	0.516

TAB. 9.4 - Taux de corrélation entre la question sur la puissance subjective et les différents critères de **G**, bande de fréquences MF. La nomenclature est la suivante: **G** pour le critère de l'amplification de la salle, suivi par le critère mesurant l'énergie précoce, suivi par le critère mesurant l'énergie tardive. Les critères sont: **G**, l'amplification de la salle; **DirAMS** le son direct élargi donné par AMS [$10 * \log_{10} (OD + R1 + 0.5 * R2)$]; **R80** égal $10 * \log_{10} (R3 + R4)$, l'énergie après 80 ms; **DirE** le DirE après la formule de J.-P. Jullien (intégration conditionnelle); **t** intègre l'élongation temporelle de **R2**; **p** intègre une pondération spatiale de **R2**; **Rev** intègre le masquage partiel du champs tardif, **RevR3** intègre une pondération plus forte de ce masquage pour **R3** que pour **R4**.

On constate une légère amélioration des taux de corrélations. Le tableau 9.4 semble indiquer qu'il faut considérer, pour l'énergie précoce, la formule de **DirEt**, avec une élongation temporelle de **R2** (la plage de **R2** étant donc de 40 ms à 100 ms), mais que, pour l'énergie tardive, il faut considérer **R80** (toute l'énergie après 80 ms), plutôt que le critère de **Rev**, intégrant le masquage postérieur.

3. Le coefficient négatif — ou plutôt quasi-nul — de **R1** peut s'expliquer par la corrélation négative entre **R1** et **OD**: R1 est très faible pour les places proches de la source, pour lesquelles **OD** est très forte.

4. Les coefficients de la régression ne peuvent pas être utilisés en tant que tels à cause des raisons suivantes: premièrement, la régression n'était effectuée que sur *une* matrice, tandis que l'optimisation prend en compte les différentes matrices et sous-ensembles de matrices. Deuxièmement, la régression donne des coefficients pour les énergies par plage temporelle en dB, tandis que pour les taux de corrélations la somme des énergies *linéaires* pondérées a été calculée puis transformée en valeur en dB.

Une autre forme de sommation des critères a été essayée: il s’agit de calculer d’abord les valeurs des critères (en dB), puis en effectuer la somme *sur les valeurs des critères*. Le tableau 9.5 indique que cette procédure *augmente* les taux de corrélation — faiblement, mais de manière cohérente sur toutes les matrices considérées. De plus, dans ce cas, il semble qu’il faut considérer le critère de **Rev** plutôt que celui de **R80**, rapprochant les résultats des tests d’écoute de la campagne européenne aux résultats des tests en laboratoire.

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
O80 + R80	0.457	0.460	0.452	0.515	0.703	0.517
DirAMS + R80	0.460	0.463	0.461	0.501	0.687	0.514
DirE + R80	0.467	0.471	0.466	0.520	0.700	0.525
DirE + Rev	0.470	0.471	0.471	0.519	0.714	0.529
DirEt + R80	0.471	0.474	0.475	0.531	0.720	0.534
DirEt + Rev	0.473	0.471	0.481	0.528	0.722	0.535

TAB. 9.5 - Taux de corrélation entre la question sur la puissance subjective et les sommes des critères **O80**, **DirAMS**, **DirE**, **R80** et **Rev**, pour la bande de fréquences MF. Il s’agit des sommes des critères (en dB) — non des énergies.

Les implications qu’entraîne ce “simple” changement de méthode de sommation sont considérables. Le pouvoir d’explication des critères augmente lorsqu’on calcule *d’abord* les valeurs des critères liés à la perception de l’énergie précoce et de l’énergie tardive, et que l’on effectue la sommation de l’énergie précoce et de l’énergie tardive sur les *critères* plutôt que sur les *énergies*.

On en conclura que :

Les résultats indiquent que la puissance sonore est perçue comme la somme de l’énergie précoce et de l’énergie tardive. Perceptivement, ces deux énergies sont d’abord évaluées séparément, la puissance sonore étant évaluée aux niveaux supérieurs du processus auditif. Ce résultat est une confirmation des résultats avancés par Jean-Pascal Jullien, selon lesquels il n’y a pas un facteur perceptif lié à l’énergie totale, mais deux facteurs perceptifs indépendants, liés respectivement à l’énergie précoce et à l’énergie tardive.

Des analyses supplémentaires ont été entreprises afin de vérifier si l’intégration des premières réflexions est *totale*. Dans la formule du critère de **DirE** (cf. chapitre 3.4 ou l’annexe A), l’intégration de l’énergie dans les premières 40 ms (**OD** et **R1**) est totale. Par contre, le tableau des coefficients de la régression multiple semblait indiquer que les réflexions dans **R1** ne sont pas totalement intégrées dans la perception de la puissance de l’énergie précoce.

Mais faut-il vraiment considérer les contributions **OD** et **R1**? Dans le chapitre 3.4, dans la définition du critère **dANG2** on a utilisé le critère de **d**, le *son direct perçu* :

$$d = 10 * \log_{10}(\max(\text{OD}, \text{R1})) \quad (9.1)$$

$$d_{lin} = \max(\text{OD}, \text{R1}) \quad (9.2)$$

En analogie avec la définition du critère **d**, on définira un nouveau critère **DirE’**, menant à une nette amélioration de la correspondance objectif/perceptif :

$$\text{DirE}' = 10 * \log_{10}(\max(d_{lin}, \text{R2})) = 10 * \log_{10}(\max(\text{OD}, \text{R1}, \text{R2})), \quad (9.3)$$

avec toutes les énergies en linéaire.

Aucun indice d’une intégration partielle des autres parties énergétiques de la réponses précoce de la salle n’a pu être trouvé. De manière cohérente on obtient les meilleures correspondances avec les réponses à la question sur la puissance sonore en *négligeant* les autres énergies :

$\min(\text{OD}, \text{R1})$ et $\min(\text{d}, \text{R2})$. La meilleure performance de la relation objectif/perceptif a été trouvée en prenant la somme de $1,5 * \text{DirE}'$ et de Rev (intégrant le masquage postérieur) — indiquant que l'énergie précoce a une importance légèrement plus forte que l'énergie tardive. Le tableau 9.6 donne les correspondances finales. Le fait que l'énergie du son direct perçue n'est pas identique à l'énergie du son direct "objectif" (l'énergie de l'onde directe, ou de l'onde directe étendue, c.-à-d. l'énergie dans les 20 premières millisecondes) mais correspond soit à l'énergie des 20 premières millisecondes, soit à l'énergie entre 20 ms et 40 ms, soit parfois même à l'énergie entre 40 ms et 80 ms, deviendra important pour d'autres questions, plus liées à une notion de son direct ("précision d'écoute", "contraste"). Ce phénomène peut — au moins partiellement — expliquer la qualité acoustique des anciennes salles en "boîte à chaussures" avec un parterre plat, et donc une visibilité de la scène souvent très réduite pour les places au parterre: le son direct est très affaibli pour une grande partie de ces places, mais les réflexions (premières ou deuxièmes réflexions) se substituent perceptivement à ce son direct objectif. L'énergie du *son direct perçu* n'est donc *pas du tout* influencée par la faiblesse du son direct objectif.

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	$\overline{\text{cor}}$
$\text{DirE}' + \text{Rev}$	0.485	0.489	0.474	0.553	0.759	0.552
$1,5 * \text{DirE}' + \text{Rev}$	0.489	0.500	0.467	0.572	0.778	0.561

TAB. 9.6 - Taux de corrélation entre la question sur la puissance subjective et les sommes des critères: $\text{DirE}' + \text{Rev}$ (première ligne) et $1,5 * \text{DirE}' + \text{Rev}$ (deuxième ligne). Pour la définition des critères voir le texte.

Les taux de corrélation restent toujours légèrement décevants. Plusieurs raisons peuvent contribuer au fait que les performances des relations objectif/perceptif restent en deçà des seuils théoriques:

emplacement de la source : jusqu'à présent, seule une source omnidirectionnelle, située au milieu de la scène, a été considérée. Une somme pondérée de plusieurs emplacements de source et des différentes directions d'émission peut s'approcher davantage du rayonnement d'une source élargie orchestrale;

occupation de la salle : les mesures étaient effectuées salles vides, c.-à-d. sans public. L'occupation de la salle transforme son amplification, ce qui influence différemment chacune des zones d'écoute;

occupation de la scène : il s'agit surtout de l'effet de masquage de certains instruments par d'autres instrumentistes. On avait vu, dans le chapitre 6.1, que les places au balcon paraissaient "rapprochées" par rapport à leur distance objective de la scène. Pour ces places, l'effet de masquage entre les musiciens est moins fort que pour les places parterre;

interprétation sémantique : un élément de confusion peut subsister entre une évaluation absolue et une évaluation relative (par rapport à la distance) de la puissance subjective;

non-linéarités : toutes les analyses utilisées (corrélations, régressions multiples) supposent une loi de correspondance strictement linéaire entre les jugements subjectifs et les critères objectifs (la définition des critères, bien sûr, peut être non-linéaire).

Direction d'émission et emplacement des sources

La dépendance de la direction d'émission, sans prendre en compte l'effet de l'interaction acoustique/œuvre, reste faible. Une légère amélioration de la correspondance objectif/perceptif est constatée lorsqu'on considère une source "globale" avec un lobe de directivité vers le plafond, et que l'on remplace la source T0f par la source S2f/U2f, cf. tableaux 9.7 et 9.8. Le poids élevé de la direction d'émission "plafond" souligne l'importance des effets de masquage entre les musiciens. Le remplacement de la source T0f par la source S2f améliore la correspondance de

manière cohérente pour tous les sous-ensembles considérés. Comme indiqué dans le paragraphe d'introduction de ce chapitre, pour les salles d'opéras, on a considéré les sources "U1" et "U2", situées *sur la scène*, plutôt que les sources S1 et S2. L'augmentation du taux de corrélation pour la matrice **Campagne** indique que, pour les opéras, il faut considérer une moyenne entre les source situées sur scène et celles situées dans la fosse d'orchestre. Pour les salles de concerts, ce résultat souligne la nécessité de considérer des sources éclatées: presque toutes les places écoutées étaient du côté jardin dans la salle (côté des premiers violons). La mesure S2 peut être considérée comme la mesure de ce qui se produit "de l'autre côté" de la scène.

direction	T0f	T0j	T0c	T0a	T0p	S1f	S2f
coef	0	1	1	1	1,5	0	1

TAB. 9.7 - Directivité "globale" de l'orchestre, donnant les meilleures correspondances avec la question sur la puissance sonore, de manière globale. Il s'agit des coefficients des énergies en linéaire.

Cette optimisation a été effectuée avec le critère de l'amplification de la salle, et non avec la somme des critères liés aux énergies précoce et tardive de la salle (limitant ainsi le nombre de paramètres libres). Les résultats sont similaires quand on utilise la somme des critères **DirEt** et **Rev** ou **DirE'** et **Rev**. Le tableau 9.8 donne les taux de corrélation pour une source omnidirectionnelle et pour la source légèrement directive.

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
omni (G)	0.450	0.453	0.455	0.518	0.702	0.516
directive (G)	0.482	0.494	0.461	0.541	0.715	0.539
directive (DirEt + Rev)	0.503	0.515	0.474	0.545	0.729	0.553
directive (DirE' + Rev)	0.512	0.528	0.473	0.556	0.763	0.566
directive (1,5*DirE' + Rev)	0.509	0.533	0.468	0.566	0.757	0.566

TAB. 9.8 - Taux de corrélations avec la question sur la puissance sonore, pour les différents sous-ensembles considérés, pour une source omnidirectionnelle située au milieu de la scène (critère de l'amplification de la salle, **G**, première ligne) et une source légèrement directive (différents critères objectifs).

En considérant une source légèrement directive, la différence de *poïds* entre l'énergie précoce et l'énergie tardive ($1,5 * \text{DirE}' + \text{Rev}$) devient moins évidente, la performance *sans* pondération donnant des résultats similaires. Par contre, les taux de corrélations confirment les autres optimisations: considérer *séparément* chacune des *deux* contributions énergétiques, l'énergie précoce et l'énergie tardive, améliore la correspondance objectif/perceptif. On obtient la meilleure correspondance en ne considérant, pour l'énergie précoce de la salle, que le maximum énergétique des trois parties de la réponse précoce de la salle, **OD**, **R1** et **R2**, nommé **DirE'**.

On a effectué une optimisation équivalente pour les grandes salles de concerts, en utilisant les emplacements de sources S1, S2, T0, T3, T4, U1 et U2, mais aucune amélioration supplémentaire n'a été trouvée. Il faut signaler que, pour les emplacements de source autres que "T0", seules les directions d'émission "face" et vers le milieu de la scène ont été mesurées. Ce résultat indique donc qu'il est primordial de considérer *toutes* les directions d'émission, et particulièrement la direction d'émission "plafond" pour tous les emplacements de source. De manière globale, une source omnidirectionnelle apporte plus d'information qu'une source directionnelle, et il est dommage que, pour les emplacements de source autres que "T0", les mesures n'aient été effectuées seulement pour quelques directions d'émission.

On en conclura donc :

La plupart de l'information nécessaire pour la correspondance entre les mesures objectives et les réponses aux questionnaires est accessible par les mesures effectuées avec une source omnidirectionnelle. Par contre, la prise en compte de la directivité

permet d'accéder à une information supplémentaire permettant une analyse plus fine de la correspondance objectif/perceptif.

9.1.3 Résumé : puissance sonore

Les réponses à la question sur la "puissance sonore" sont assez bien liées au critère de l'amplification de la salle, **G** ([Leh76], [WP75]). On verra dans le chapitre suivant que la perception de la puissance sonore est liée à la pression acoustique au niveau des oreilles d'un auditeur. Cette pression acoustique est le produit de la puissance acoustique de l'effectif orchestral sur scène et de l'amplification de la salle.

Néanmoins, plusieurs influences supplémentaires provenant de détails de la réponse de la salle ont été trouvées :

somme de deux parties : les résultats indiquent que la perception de la puissance sonore n'est pas immédiatement liée à l'amplification de la salle. Le système auditif dissocie d'abord l'énergie précoce et l'énergie tardive de la salle : il cherche à évaluer séparément les contributions de la *source* et de la *salle*. Puis, l'évaluation de la puissance sonore est effectuée aux niveaux supérieurs du processus auditif, faisant la somme des contributions de la source et de la salle. A ce propos, il est d'ailleurs intéressant de noter que le même découpage en "puissance du son direct" et "puissance du son réverbéré" a été utilisé par Leo Beranek dans [Ber62] ;

intégration conditionnelle : on a constaté avec surprise que la meilleure correspondance a été trouvée en ne gardant que le maximum énergétique des trois parties de la réponse précoce de la salle, **OD**, **R1** et **R2**, alors qu'on se serait attendu plutôt à observer une intégration *partielle* des autres contributions énergétiques. Le *rapport* énergétique est en fait assez lié à la notion de contraste et de définition des attaques. Il y a donc une confusion sémantique chez les sujets, qui ont amalgamé la question sur la puissance sonore et celle sur le contraste. L'interdépendance des questions (et de la confusion sémantique et/ou perceptive entre les questions, également des questions d'entrée du modèle de réduction), sera discutée plus en détail dans le paragraphe 9.11 de ce chapitre ;

directivité globale d'un orchestre symphonique : une légère amélioration de la correspondance a été trouvée en effectuant une somme pondérée des énergies des différents emplacements et directions d'émission des sources. Le poids élevé de la direction d'émission vers le plafond souligne l'importance de cette direction d'émission, provenant du masquage partiel de l'énergie émise dans le plan horizontal par les autres musiciens. L'optimisation, due à l'échange pour la direction d'émission "face", entre la source T0 et la source S2, peut être liée à deux facteurs : pour les opéras, l'amélioration indique qu'il faut considérer une moyenne pondérée entre les sources dans la fosse d'orchestre et les sources placées sur scène. Pour les salles de concerts, ce résultat souligne la nécessité de considérer des sources éclatées : presque toutes les places écoutées étaient du côté jardin dans la salle (côté des premiers violons). La mesure S2 peut être considérée comme la mesure de ce qui se produit "de l'autre côté" de la scène.⁵

Le critère objectif correspondant à la question sur la puissance sonore et que l'on nomme **PUISS**, est défini comme suit :⁶

5. On pourrait également supposer que l'amélioration reflète les problèmes du protocole de mesures évoqués dans le paragraphe 4.2.1 : la source et quelques récepteurs se trouvaient dans l'axe de symétrie de la salle. L'interférence constructive n'apparaît plus pour l'emplacement S2. Par contre, en étudiant certaines graphiques, on a pu constater que l'amélioration de la correspondance se fait pour toutes les places, et pas seulement pour les places situées dans l'axe de symétrie.

6. Le poids plus élevé pour l'énergie *précoce* (facteur multiplicatif de 1,5) reste incertain ; on pourra donc également utiliser la formule plus simple de $PUISS = DirE' + Rev$. Le critère de **Rev** intègre le masquage par le son direct étendu, cf. chapitre 3.4 ou l'annexe A.

$$PUISS = 1.5 * DirE' + Rev = 15 * \log_{10}(\max(OD, R1, R2)) + Rev \quad (9.4)$$

Le taux de corrélation pour ce critère sont de :⁷

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
PUISS	0.489	0.500	0.467	0.572	0.778	0.561

On terminera ce paragraphe en donnant les coefficients d'une régression sur les réponses à la question sur la puissance sonore pour les deux critères de l'amplification de la salle **G** et **PUISS**, la somme de $1,5 * DirE' + Rev$ (tableau 9.9), ainsi que des graphiques de la correspondance, pour les salles de concert (**CONCplaces**, figure 9.1).

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	<i>lsfit</i>
G	0.15	0.16	0.12	0.24	0.20 + 9.8	0.17
1,5 DirE' + Rev	0.06	0.06	0.04	0.09	0.07 + 9.9	0.06

TAB. 9.9 - Coefficients de la régression linéaire $puiss = a*x + b$, pour les critères de l'amplification de la salle (première ligne) et le critère de la somme $1,5 * DirE' + Rev$. Sauf pour la matrice **CONCplaces**, il s'agit de matrices centrées, le coefficient b étant égal à zéro pour ces cas.

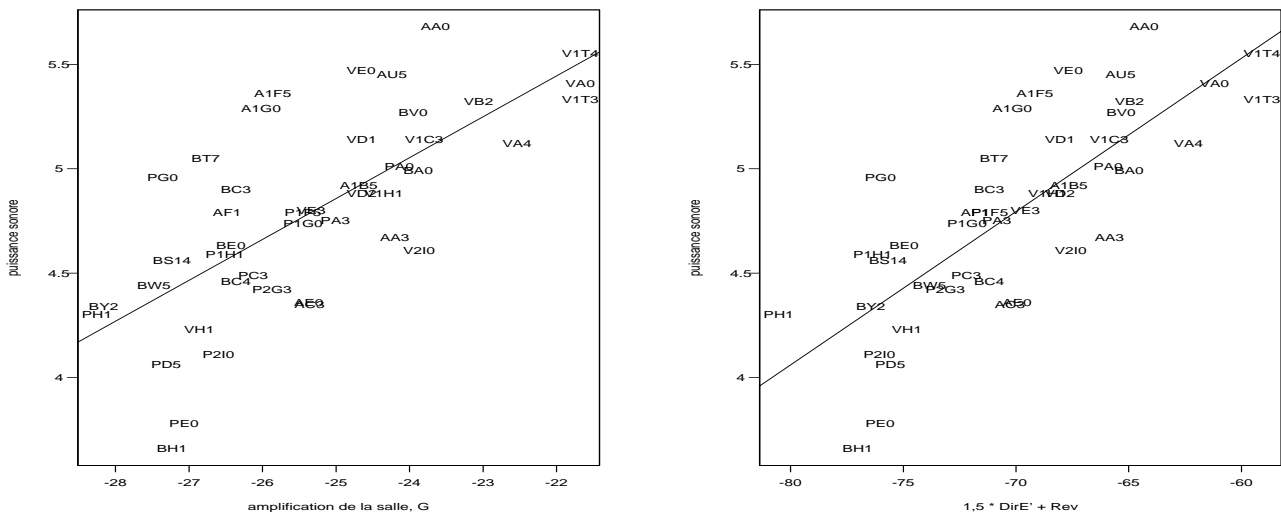


FIG. 9.1 - Correspondance entre les réponses à la question sur la puissance sonore et les critères de l'amplification de la salle (figure de gauche), et la somme $1,5 * DirE' + Rev$ (figure de droite), pour la matrice **CONCplaces** des places individuelles dans les salles de concerts.

9.2 Réverbérance

La question sur la réverbérance a déjà été discutée dans l'article [KJ94]. Dans cet article, il a été démontré que les meilleures performances persistent avec le critère de l'**EDT15**.⁸ Dans

7. L'optimisation de la directivité de la source de mesures n'est pas incluse dans l'équation ni dans le tableau des correspondances finales. Le taux de corrélation pour la matrice **CONCplaces** augmente à $r = 0.820$ lorsque l'on ne considère que les places pour lesquelles au moins trois questionnaires ont été remplis par des sujets appartenant au noyau stable de campagne européenne.

8. Le critère doit être évalué en prenant la différence absolue entre le début de la décroissance intégrée et le point correspondant à $-15 \text{ dB re. la valeur pour } t = 0$, cf. le chapitre 3.4.3.

un article récent ([Gri95a]), David Griesinger avance qu'il faudrait prendre l'**EDT** par rapport à un temps fixe (il suggère 380 ms et appelle le critère correspondant **EDT380**), plutôt que par rapport à une décroissance énergétique fixe.

9.2.1 Seuils théoriques

rev	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.81	0.89	0.00	0.91	0.96	0.72
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.44	0.48	0.00	0.62	0.85	0.48

TAB. 9.10 - *Seuils théoriques des taux de corrélation, pour les sous-ensembles considérés, pour la question sur la réverbérance subjective. La première ligne indique les seuils calculés à partir du terme \mathcal{R} , calculé à partir du premier test d'écoute à la Villette. La deuxième ligne indique les seuils calculés à partir de la somme des termes \mathcal{R} et $\mathcal{I}(i_{m,k})$, calculée indépendamment à partir des tests de la campagne européenne et des tests à la Villette (cf. chapitre 5).*

Pour les tests à La Villette, la variation sur la question a été très faible, même inférieure au niveau de bruit résiduel. Le seuil théorique de la corrélation pour la matrice des données à la Villette est donc de 0%.

Pour les autres salles, en comparant les deux lignes du tableau 9.10, on s'aperçoit que l'effet de l'interaction acoustique/œuvre joue très fortement pour la question sur la réverbérance subjective. Ce phénomène indique qu'un changement de la directivité de l'effectif orchestral, ou de certains instruments importants de l'effectif orchestral, est clairement perçu.

9.2.2 Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la "réverbérance"

rev	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
G	-0.042	0.010	-0.316	-0.096	0.178	-0.053
OD[dB]	-0.116	-0.089	-0.248	-0.142	-0.275	-0.174
O40	-0.096	-0.059	-0.252	-0.120	-0.335	-0.173
O80	-0.089	-0.040	-0.296	-0.103	-0.226	-0.151
R80	0.029	0.052	-0.310	-0.074	0.395	0.018
C80	-0.134	-0.109	-0.262	-0.049	-0.543	-0.219
TR	-0.059	-0.096	0.260	-0.142	0.498	0.092
EDT15	0.084	0.031	0.324	-0.052	0.539	0.185

TAB. 9.11 - *Taux de corrélations entre la question sur la réverbérance et quelques critères "classiques", pour les différents sous-ensembles considérés, pour la plage fréquentielle des moyennes fréquences.*

En étudiant le tableau 9.11, on remarque que le temps de réverbération "classique" est un bon prédicteur pour la perception de la réverbérance subjective, mais cela uniquement lorsque l'on considère des *salles* différentes. Pour des changements à l'intérieur d'une même salle, le **TR** reste inchangé, et les corrélations avec la réverbérance sont proches de zéro. La performance du critère de l'**EDT** (ici **EDT15**) est meilleure, si l'on considère plusieurs salles comme à l'intérieur d'une salle. Les taux de corrélation pour différents emplacements à l'intérieur d'une même salle restent pourtant extrêmement faibles. Sinon, on constate que les performances du critère de l'indice de clarté **C80**, habituellement plus lié à la notion de précision d'écoute, sont sensiblement identiques à celles du critère de l'**EDT**. Les faibles taux de corrélations pour les changements de places à l'intérieur d'une salle s'expliquent probablement par la différence d'occupation entre les mesures (salles vides) et les tests d'écoute (salles occupées).

On a donc essayé quelques autres critères du groupe des temps de réverbération et du groupe de la clarté, cf. tableau 9.12.

rev	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
TR	-0.059	-0.096	0.260	-0.142	0.498	0.092
EDT20	0.076	0.019	0.331	-0.065	0.535	0.179
EDT15	0.084	0.031	0.324	-0.052	0.539	0.185
EDT10	0.092	0.043	0.317	-0.038	0.541	0.191
EDT5	0.098	0.054	0.307	-0.022	0.525	0.192
EDT380	0.116	0.073	0.320	0.006	0.570	0.217
EDT280	0.124	0.086	0.315	0.017	0.574	0.223
EDT230	0.128	0.093	0.311	0.023	0.575	0.226
tr160	0.138	0.107	0.305	0.033	0.573	0.231
C80	-0.134	-0.109	-0.262	-0.049	-0.543	-0.219
DirERev	-0.123	-0.100	-0.242	-0.050	-0.553	-0.214
DirERevR3	-0.119	-0.094	-0.248	-0.033	-0.553	-0.209
C40	-0.118	-0.106	-0.198	-0.103	-0.547	-0.214
C20	-0.143	-0.135	-0.210	-0.146	-0.425	-0.212
ts	0.139	0.108	0.288	0.045	0.584	0.233

TAB. 9.12 - Taux de corrélations entre la question sur la réverbérance subjective et quelques critères, pour les différents sous-ensembles considérés, pour la plage fréquentielle des moyennes fréquences.

Les résultats ne sont généralement pas très concluants. De manière générale, les performances d'un EDT calculé sur une plage *temporelle* sont très légèrement meilleures que celles d'un EDT calculé sur une plage *énergétique*. Par contre, nous remarquons la bonne performance du critère tr160 (temps de réverbération sur les premiers 160 ms) et celle du critère de temps central (ts, pour "Schwerpunktzeit").

A l'intérieur d'une salle, la perception de la réverbérance est liée à des effets relativement précoces dans la réponse de la salle (performances des critères du groupe de la clarté meilleures que celles des critères du groupe des temps de réverbération, "bonnes" performances des critères de C80, C40 et C20).

Dépendance fréquentielle

Le tableau 9.13 donne les taux de corrélations entre la réverbérance et le critère de l'EDT. On remarque que le maximum de corrélation apparaît, de manière cohérente, pour des plages fréquentielles *aiguës*. Pour des changements entre différentes salles, le maximum apparaît pour la bande d'octave de 2 kHz (et pour différents ensembles de salles, cf. [KJ94]), pour des changements à l'intérieur des salles parfois même pour des octaves plus élevées. Cette confusion perceptive entre la réverbération globale et la réverbération des fréquences aiguës a déjà été constatée lors des tests en laboratoire, et se trouve confirmée dans les tests en salles réelles.

La même dépendance fréquentielle peut être constatée pour d'autres critères, par exemple le temps central, cf. tableau 9.14.

Comparé avec un seuil théorique de 85%, le taux de corrélation de 67%, entre le critère du temps central et les réponses à la question sur la réverbérance, pour les réponses moyennes par place dans les salles de concert, peut être considéré comme assez satisfaisant. Par contre, pour les changements à l'intérieur d'une salle, les performances restent toujours insatisfaisantes. Les taux de corrélation pour la bande d'octave de 8 kHz et pour la bande MF soulignent l'importance de la confusion perceptive entre la réverbérance large-bande et celle des fréquences aiguës.

rev	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
63	-0.082	-0.069	-0.156	-0.048	-0.223	-0.115
125	0.011	-0.050	0.261	-0.113	0.117	0.045
250	-0.013	-0.053	0.165	-0.176	0.441	0.073
500	0.065	0.012	0.355	-0.086	0.501	0.169
1k	0.096	0.048	0.294	-0.017	0.561	0.196
2k	0.155	0.127	0.306	0.110	0.621	0.264
4k	0.161	0.158	0.247	0.143	0.465	0.235
8k	0.158	0.124	0.327	0.105	0.245	0.192
BF	-0.007	-0.075	0.252	-0.169	0.322	0.065
MF	0.084	0.031	0.324	-0.052	0.539	0.185
HF	0.167	0.150	0.290	0.136	0.613	0.271
delBF	-0.091	-0.074	-0.202	-0.039	-0.321	-0.146
delHF	0.082	0.066	0.194	-0.030	-0.231	0.016

TAB. 9.13 - Taux de corrélations entre la question sur la réverbérance subjective et le critère de l'EDT15, pour les différents sous-ensembles considérés, pour différentes plages fréquentielles.

rev	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
500	0.126	0.091	0.298	0.013	0.537	0.213
1k	0.135	0.109	0.270	0.065	0.607	0.237
2k	0.155	0.142	0.261	0.141	0.672	0.274
4k	0.153	0.151	0.226	0.145	0.487	0.232
8k	0.175	0.161	0.273	0.170	0.303	0.216
BF	0.066	0.040	0.187	-0.016	0.441	0.143
MF	0.139	0.108	0.288	0.045	0.584	0.233
HF	0.166	0.158	0.257	0.159	0.650	0.278

TAB. 9.14 - Taux de corrélations entre la question sur la réverbérance et le critère du temps central, t_s , pour les différents sous-ensembles considérés, pour différentes plages fréquentielles.

Dépendance temporelle

Comme pour la question sur la puissance sonore, une régression multiple sur les contributions énergétiques des différentes plages temporelles a été effectuée, mais aucune amélioration par rapport aux taux de corrélations avec le critère du temps central n'a été trouvée. Les résultats peuvent être résumés comme suit : l'énergie du son direct (**OD**) diminue toujours la perception de la réverbérance; l'énergie très tardive (**R4**) augmente toujours la perception de la réverbérance. Pour les autres plages temporelles, l'influence sur la perception de la réverbérance reste ambiguë et semble dépendre du contexte exact. On discutera un exemple de la dépendance du contexte dans le résumé concernant la question sur la réverbérance.

En orthogonalisant les réponses par rapport aux critères de l'EDT15 ou du temps central (les deux pour la bande d'octave autour de 2 kHz), on a constaté deux influences supplémentaires sur la question concernant la réverbérance: pour la matrice **CONCplaces** des salles réunies, il s'agit surtout du critère **D2**. Ce critère, défini dans l'équation 3.6, dans le chapitre sur les travaux antérieurs à l'Ircam, décrit un effet de "cassure" de la décroissance de la salle. Une valeur de **D2** importante, donc une forte énergie de la plage **R2** par rapport à l'énergie du champ tardif, *augmente* la perception de la réverbérance.⁹

Pour les changements à l'intérieur des salles, on a trouvé un lien avec le critère **CONTR**,

9. Un fort effet du contexte est apparu : pour les salles de concert, avec des champs tardifs relativement forts, l'énergie contenue dans **R2** peut être intégrée dans le champ tardif et augmente ainsi la perception de la réverbérance. Par contre, pour les salles d'opéra, avec un champ tardif nettement moins important, l'énergie de **R2** peut contribuer à masquer le champ tardif de la salle presque intégralement, diminuant ainsi la perception de la réverbérance.

lié à la question sur le contraste (cf. le paragraphe suivant).

Les critères de **D2** et de **CONTR** sont liés à d'autres questions ou d'autres aspects de la perception (surtout aux notions de l'intelligibilité et du contraste). A nouveau, ces résultats pointent la confusion sémantique qui existe entre différentes questions. Une diminution de la précision d'écoute ainsi qu'une diminution du contraste mènent à une augmentation de la perception de la réverbérance. Le lien doit être situé au niveau des *questions*. Le problème persiste si la bonne performance du critère du temps central (**ts**) est imputée à une confusion sémantique entre la question sur la réverbérance et celle de la précision d'écoute. Le chapitre 9.11 étudiera plus en détail cette question.

Direction d'émission et emplacement des sources

Pour toutes les matrices, les taux de corrélations sont très sensibles à une pondération des différentes directions d'émission. Les améliorations étant très instables et celle des taux de corrélation plutôt modeste, les résultats ne seront pas reproduits ici.

Le chapitre 9.10 montrera que la considération d'une directivité optimisée *par œuvre* permet d'améliorer nettement la correspondance objectif/perceptif pour les œuvres individuelles.

9.2.3 Résumé : réverbérance

dépendance temporelle : pour les changements entre *salles*, les réponses à la question sur la "réverbérance" sont assez bien liées au critère du temps de réverbération classique (**TR**). La correspondance est meilleure en considérant le critère de l'**EDT**, calculé soit sur une plage énergétique fixe soit sur une plage temporelle fixe. Une correspondance encore meilleure a été trouvée pour le critère du temps central, **ts**, mais sans savoir si cette amélioration est due ou non à une confusion sémantique entre la question sur la réverbérance et celle sur la précision d'écoute. L'amélioration est cohérente pour la comparaison entre salles comme pour la comparaison des places à l'intérieur d'une même salle, mais les taux de corrélations pour les changements à l'intérieur d'une salle restent très faibles. On a également essayé les formules proposées par David Griesinger dans [Gri95a], consistant à "décaler" le temps zéro de la réponse impulsionnelle pour fixer le "début" de la réponse au moment du début subjectif de la note ("start time", **ST**), mais aucune amélioration n'a pu être trouvée;¹⁰

dépendance fréquentielle : la meilleure correspondance apparaît pour les fréquences aiguës, particulièrement pour la bande d'octave autour de 2 kHz. Les améliorations sont nettes et très constantes, donnant un poids très fort à ce résultat.¹¹

Pour les changements à l'intérieur des salles, les taux de corrélations restent toujours extrêmement faibles. Plusieurs raisons peuvent y contribuer :

occupation de la salle : les mesures étaient effectuées salles vides, c.-à-d. sans présence du public. L'occupation de la salle influence très fortement le temps de réverbération de la salle. Les critères de l'**EDT** et du temps central seront affectés différemment selon les zones d'écoute dans la salle ;

occupation de la scène : dans le sous-chapitre concernant la question sur la puissance sonore, l'importance de la direction d'émission vers le plafond a été constatée, indiquant l'effet important du masquage entre musiciens. La direction d'émission influence les valeurs des critères de l'**EDT** et du temps central ;

10. Cf. la discussion de l'importance du contexte à la fin de ce résumé sur la réverbérance.

11. Autrement que par les tests en laboratoire, cette dépendance fréquentielle de la perception de la réverbérance est corroborée par une expérience personnelle : pendant une séance de mesures dans un studio de répétition à la Cité de la Musique à Paris, où l'acoustique peut être variée à l'aide d'un rideau, j'ai joué sur mon alto dans la configuration absorbante comme dans la configuration réfléchissante. La différence sur la réverbérance a été très nettement perceptible. Les mesures objectives montrent que le rideau ne commence à avoir un effet qu'à partir d'environ 1 kHz, diminuant le temps de réverbération uniquement pour les fréquences aiguës.

interaction acoustique/œuvre : l'effet de l'interaction entre l'acoustique et l'œuvre musicale est très prononcé sur la question concernant la réverbérance, comme l'indique par exemple la comparaison entre les deux lignes du tableau 9.10. Le paragraphe 9.10 montrera que la correspondance s'améliore nettement en considérant l'effet de la directivité de chaque effectif orchestral.

On terminera ce paragraphe en donnant les coefficients d'une régression sur les réponses à la question sur la réverbérance (tableau 9.15), ainsi que des graphiques de la correspondance, pour les salles de concert (**CONCplaces**, figure 9.2).

puiss	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	ts_{fit}
EDT15[s]	0.57	0.61	0.54	0.56	0.82 + 2.4	0.62
C80[dB]	-0.03	-0.03	-0.04	-0.01	-0.14 + 4.2	-0.05
ts[s]	4.13	4.91	3.27	5.08	9.97 + 2.8	5.47

TAB. 9.15 - Coefficients de la régression linéaire $rev = a*x + b$, pour les critères de l'**EDT15** (en secondes, première ligne), de l'indice de clarté **C80** (en dB, deuxième ligne) et du temps central **ts** (en secondes, troisième ligne). La bande fréquentielle considérée est la bande d'octave autour de 2 kHz. Sauf pour la matrice **CONCplaces** il s'agit de matrices centrées, le coefficient b étant égal à zéro pour ces cas.

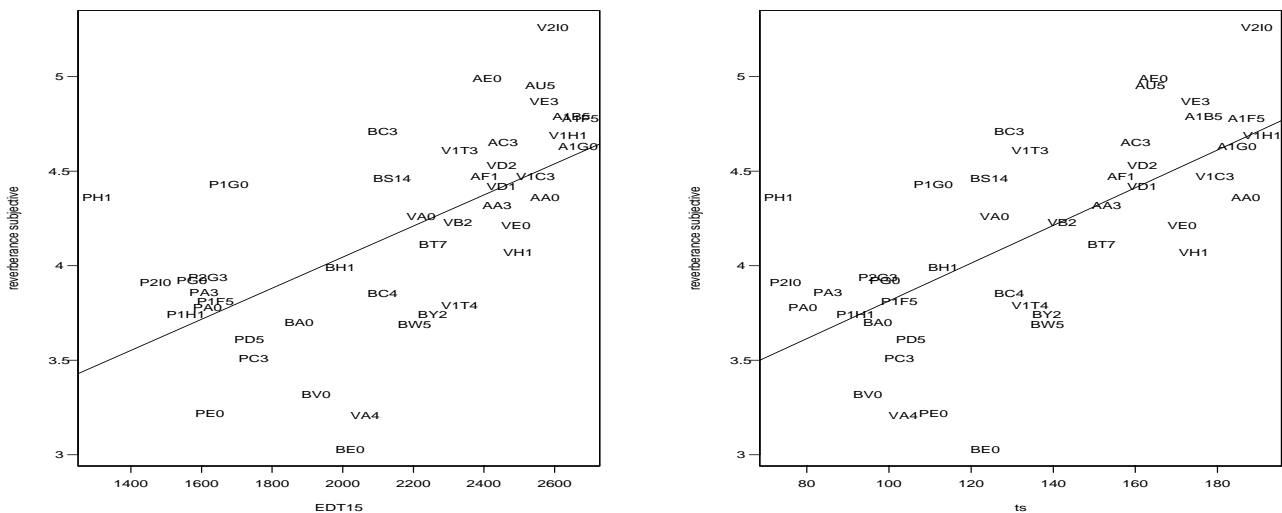


FIG. 9.2 - Correspondance entre les réponses à la réverbérance et les critères de l'**EDT15** [ms] (figure de gauche) et du temps central, ts [ms] (figure de droite), pour la matrice **CONCplaces** des places individuelles dans les salles de concerts. La bande fréquentielle considérée est la bande d'octave autour de 2 kHz.

On a observé un phénomène intéressant en étudiant la correspondance entre le critère de **C80** (bande d'octave de 2 kHz) et les réponses à la réverbérance, cf. figure 9.3.

Il s'agit de comparer les places "E0" dans les quatre salles de concerts. Pour les deux places "BE0" et "PE0", les réponses à la réverbérance sont extrêmement faibles ; pour la place "VE0", les réponses correspondent aux valeurs prédites par le modèle de la correspondance ; tandis que pour la place "AE0", les réponses sont très élevées. Pourtant, les mesures objectives sur le critère de **C80**, au moins pour les trois places "PE0", "VE0" et "AE0", sont sensiblement identiques.

Pour les places "E0", situées à 24 m du milieu de la scène (dernier tiers du parterre), le son direct est faible par rapport à l'énergie des réflexions.¹² Mais l'effet de l'énergie des réflexions sur

12. Pour la distinction entre l'énergie du son direct perçue et le son direct objectif, et les implications sur la

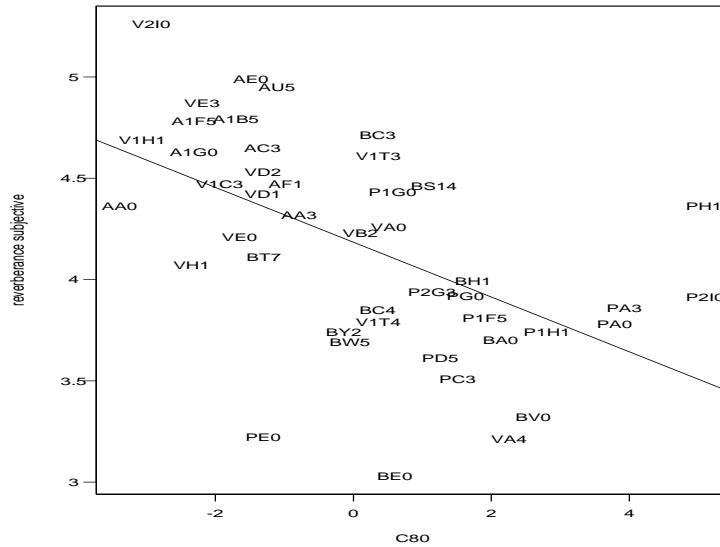


FIG. 9.3- Correspondance entre les réponses à la réverbérance et le critère de l'indice de clarté **C80**, pour la matrice **CONCplaces** des places individuelles dans les salles de concerts. La bande fréquentielle considérée est la bande d'octave autour de 2 kHz.

la perception de la réverbérance est ambiguë et semble dépendre d'un paramètre géométrique de la salle: les salles d'Amsterdam et de Vienne ont un parterre plat, avec une scène surélevée, tandis que la salle de Berlin et la Salle Pleyel ont un parterre en gradins.

Le tableau suivant donne l'énergie des différentes plages temporelles (en dB) pour la bande d'octave autour de 2 kHz :

2 kHz	AE0	BE0	PE0	VE0
OD [dB]	-31.7	-30.7	-31.4	-31.4
R1 [dB]	-31.5	-28.6	-27.9	-31.6
R2 [dB]	-27.3	-30.2	-31.1	-28.4
R3 [dB]	-27.5	-29.1	-25.4	-28.4
R4 [dB]	-25.6	-28.1	-28.7	-25.7

On remarque que le maximum de l'énergie précoce (le critère **DirE'**), pour les salles d'Amsterdam et de Vienne, apparaît pour **R2**, tandis que pour Berlin et Pleyel, il apparaît pour **R1**. L'échange des contributions énergétiques des deux plages temporelles ne change pas la valeur du critère **C80**, mais produit des effets perceptifs vraiment non négligeables.

Par contre, ces valeurs ne donnent aucune indication permettant d'expliquer la différence dans la perception de la réverbérance entre les places à Vienne et à Amsterdam (VE0 et AE0). Pour cela, il faut également considérer les valeurs équivalentes pour la bande fréquentielle des moyennes fréquences: pour cette bande fréquentielle à Amsterdam, l'onde directe est relativement forte, tandis qu'à Vienne les réflexions (latérales) précoces sont nettement plus fortes (à cause de la largeur plus faible de cette salle):

perception de la puissance sonore, cf. la discussion dans le paragraphe de résumé concernant la question sur la puissance sonore, chapitre 9.1.3.

MF	AE0	BE0	PE0	VE0
OD [dB]	-31.1	-30.1	-34.5	-34.5
R1 [dB]	-33.6	-30.6	-31.2	-32.3
R2 [dB]	-29.0	-29.7	-31.2	-28.8
R3 [dB]	-27.4	-29.0	-28.6	-27.0
R4 [dB]	-25.5	-28.6	-28.0	-23.8

Comment peut-on relier ces résultats avec la structure du processus auditif? On sait, d’une part que l’oreille décompose le signal en bandes critiques. On a constaté, par ailleurs, l’importance du critère **DirE**, le maximum de l’énergie dans les plages temporelles précoces — où l’on n’effectue aucune séparation en bandes critiques. La détermination du maximum est-elle effectuée *séparément* par bandes critiques, ou de manière globale, dans les niveaux supérieurs du processus auditif?

9.3 Contraste

9.3.1 Seuils théoriques

contr	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.80	0.86	0.00	0.86	0.92	0.69
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.75	0.80	0.00	0.80	0.89	0.65

TAB. 9.16 - *Seuils théoriques des taux de corrélation, pour les sous-ensembles considérés, pour la question sur le contraste. La première ligne indique les seuils calculés à partir du terme \mathcal{R} , calculé à partir du premier test d’écoute à la Villette. La deuxième ligne indique les seuils calculés à partir de la somme des termes $\mathcal{R} + \mathcal{I}$, calculée individuellement à partir des tests de la campagne européenne et des tests à la Villette (cf. chapitre 5).*

On constate que pour la question sur le contraste, comme pour la question sur la réverbérance, les variations des réponses sur ces questions ont été très faible lors des tests d’écoute à La Villette, et même inférieures au niveau de bruit résiduel. Le seuil théorique de la corrélation est donc de 0%, pour la matrice des données à la Villette.

Par ailleurs, on constate de très faibles différences entre le cas où l’effet de l’interaction acoustique/œuvre est considéré et le cas où il ne l’est pas. L’interaction acoustique/œuvre semble avoir une très faible influence sur les réponses à la question sur le contraste.

9.3.2 Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur le “contraste”

En analysant le tableau 9.17, on s’aperçoit que les taux de corrélation les plus élevés apparaissent avec le critère **G**, l’amplification de la salle. La question sur le contraste, donc sur la perception des attaques (ou la *définition* des attaques) n’est pas indépendante du niveau sonore global. Le mot “contraste” étant légèrement ambiguë, on reproduit la question exacte du questionnaire :

RELIEF SONORE (1) (définition des attaques)			
plat	assez plat	assez contrasté	contrasté
←----- 1 -----	----- 2 -----	----- 3 -----	----- 4 ----->

Dans le chapitre 7 sur le modèle de réduction du nombre des questions, donc des variables indépendantes, on a décidé que la question sur le contraste serait gardée parmi les questions d’entrée du modèle. Néanmoins, la possibilité de prédire les réponses à la question sur le contraste

contr	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
G	0.328	0.331	0.354	0.360	0.460	0.367
OD[dB]	0.248	0.238	0.369	0.236	0.326	0.284
O40	0.274	0.277	0.364	0.287	0.255	0.292
O80	0.294	0.304	0.348	0.322	0.329	0.319
R80	0.316	0.319	0.303	0.257	0.441	0.327
C80	0.039	-0.028	0.330	0.136	-0.170	0.061
TR	-0.026	-0.030	0.014	-0.014	0.363	0.062
EDT15	0.037	0.116	-0.307	0.063	0.362	0.054

TAB. 9.17 - Taux de corrélations entre la question sur le contraste et quelques critères "classiques", pour les différents sous-ensembles considérés, pour la plage fréquentielle des moyennes fréquences.

à partir des réponses aux autres questions d'entrée a été évoquée, ce qui amènerait à une réduction supplémentaire du nombre de variables indépendantes. Les coefficients optimisés sont redonnés et discutés ci-après :

coefs pour question: contr	puiss	rev	paig	pgrav	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.15	-0.05	0.20	0.00	0.00	-0.50	0.15

Les réponses à la question sur le contraste sont fortement liées aux réponses à la question sur la puissance sonore, particulièrement la puissance dans les aigus. Par contre, les coefficients *negatifs* des questions concernant la réverbérance et le défaut de pâteux indiqueraient une influence néfaste de l'importance du champ tardif de la salle. Il est donc surprenant, à première vue, de constater des taux de corrélation plus faibles avec les critères liés à la réponse précoce de la salle (**OD**, **O40**, **O80**) et de ne pas constater de corrélations négatives avec le critère de l'**EDT15**.¹³

Dépendance temporelle

Il est nécessaire de mieux comprendre l'influence des différentes plages temporelles de la réponse impulsionnelle sur la perception du contraste. Un premier élément se trouve dans les forts taux de corrélation entre les réponses à la question sur le contraste et la date d'arrivée du son direct (**DSAT**, pour "Direct Sound Arrival Time"), donc la distance du récepteur par rapport à la source (cf. le tableau 9.18 ci-après). Par contre, la corrélation avec l'énergie de l'onde directe (**OD**, l'énergie entre 0 ms et 20 ms, ici en dB) est nettement moins forte — bien que la corrélation objective entre les deux critères de **DSAT** et de **OD** soit très élevée. Deux autres critères, décrivant l'énergie de l'onde directe perçue et déjà évoqués dans le paragraphe sur la question concernant la puissance sonore, ont donc été essayés: les critères de **d** et de **DirE'**.

contr	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
DSAT[ms]	-0.333	-0.331	-0.378	-0.372	-0.574	-0.398
OD[dB]	0.248	0.238	0.369	0.236	0.326	0.284
d	0.288	0.297	0.374	0.339	0.340	0.328
DirE'	0.314	0.335	0.364	0.337	0.448	0.360

TAB. 9.18 - Taux de corrélations entre la question sur le contraste et les critères de la date d'arrivée du son direct (distance source — récepteur, **DSAT**), l'énergie du son direct, **OD** (en dB), et les critères de **d** et de **DirE'**, également en dB.

¹³. Le taux de corrélation, fortement positif, entre le contraste et le critère de **R80** (l'énergie après 80 ms), peut s'expliquer par la corrélation entre l'énergie tardive et la proximité par rapport à la source.

La corrélation avec le critère de **d** est nettement supérieure à celle avec le critère de **OD**.¹⁴ La corrélation avec le critère de **DirE'** ($\mathbf{DirE}' = \max(\mathbf{OD}, \mathbf{R1}, \mathbf{R2})$) est encore plus élevée. Cette observation confirme un constat important, déjà évoqué dans le sous-chapitre concernant la question sur la puissance sonore :

L'énergie du son direct perçue n'est pas identique à l'énergie du son direct (OD, l'énergie entre 0 ms et 20 ms) mais au maximum énergétique du son direct (énergie entre 0 ms et 20 ms), des premières réflexions (énergie entre 20 ms et 40 ms) et des deuxièmes réflexions (énergie entre 40 ms et 80 ms).

On donne ici les définitions du critère de **d**, du critère de **d1**, qui remplace l'énergie **R1**, et des critères **DirE'**, **ddd1** et **ddd2** :

$$d = 10 * \log_{10}(\max(OD, R1)) \quad (9.5)$$

$$d1 = 10 * \log_{10}(\min(OD, R1)) \quad (9.6)$$

$$DirE' = 10 * \log_{10}(\max(OD, R1, R2)) \quad (9.7)$$

$$ddd1 = 10 * \log_{10}(\min(OD, R1, R2)) \quad (9.8)$$

$$ddd2 = 10 * \log_{10}(\min(\max(OD, R1), R2)) \quad (9.9)$$

Le tableau 9.19 suivant donne les coefficients d'une régression multiple sur les différentes plages temporelles de la réponse impulsionnelle. Trois régressions différentes ont été effectuées : une sur le découpage temporel comme le donne le programme AMS (cf. tableau 4.3), une deuxième en prenant les énergies **d** et **d1** au lieu de **OD** et **R1**, et une troisième en prenant les énergies **DirE'**, **ddd1** et **ddd2** au lieu de **OD**, **R1** et **R2**. Les régressions ont été effectuées sur les énergies *en dB*, en intégrant la correction de **R4** par la date d'arrivée du son direct (cf. chapitre 9.1). Les régressions n'étant effectuées que sur la matrice totale (**toutes salles**) — et sur les énergies *en dB* —, les valeurs de la régression ne peuvent être que des indicateurs de la correspondance objectif/perceptif.

plages	OD	R1	R2	R3	R4DSATout
coefs dB	0.030	0.007	-0.013	-0.026	0.139
plages	d	d1	R2	R3	R4DSATout
coefs dB	0.045	-0.009	-0.005	-0.037	0.139
plages	DirE'	ddd1	ddd2	R3	R4DSATout
coefs dB	0.068	-0.018	-0.016	-0.042	0.134

TAB. 9.19 - Coefficients des régressions multiples sur l'énergie des plages temporelles (en dB), pour la question sur le contraste. Les lignes "plages" indiquent les découpages utilisés, cf. texte.

En observant le tableau 9.19, on remarque que la séparation entre l'énergie du son direct et celle des premières réflexions est beaucoup plus nette lorsque l'on considère les énergies de **d** et **d1**, au lieu des énergies de **OD** et de **R1**, et encore plus lorsque l'on considère les énergies **DirE'**, **ddd1** et **ddd2** — ce qui confirme le constat énoncé ci-dessus, que l'énergie perçue du son direct est déterminée par le maximum des contributions énergétiques de **OD**, **R1** et **R2**.

L'influence de l'énergie **R2**, ou de **ddd2**, reste ambiguë. Le coefficient étant relativement petit, cela peut s'interpréter par le fait que l'énergie dans cette zone temporelle n'a que peu d'influence sur la perception du contraste, ou que son influence dépend du contexte exact. Le

14. Alors que la corrélation — objective — entre la date d'arrivée du son direct (**DSAT**) et le critère **OD** est plus forte que celle entre **DSAT** et le critère de **d**.

maximum de l'énergie a une forte influence positive, et le minimum une assez forte influence négative, sur le contraste. Par contre, l'influence de l'énergie intermédiaire est plus faible.

On en conclura que le contraste est, au moins partiellement, déterminé par le rapport entre l'énergie du son direct perçue (maximum de **OD**, **R1** et **R2**) et l'énergie avoisinant des "réflexions" (pour le cas où **R1** > **OD** ou **R2** > **OD**, l'énergie contenue dans les 20 premières millisecondes doit être interprétée comme l'énergie des réflexions, dans ce cas les "réflexions" précèdent le son direct). La question persiste de savoir si cette comparaison s'effectue par rapport à la totalité des énergies voisines ou seulement par rapport à la contribution la plus faible. On constate :

Pour la perception d'un son contrasté (donc une bonne perception des attaques), il est préférable que l'énergie, soit du son direct, soit des premières réflexions, prédomine par rapport aux énergies voisines.

Pour l'énergie du champ tardif, une séparation très nette apparaît :

L'énergie R3 (énergie contenue entre 80 ms et 160 ms) est nuisible pour la perception du contraste. Cette énergie tardive "concentrée", parfois d'un niveau considérable et étalée sur un temps relativement court, peut empêcher la perception détaillée des attaques. L'énergie de R4, plus lointaine par rapport au son direct et plus étalée dans le temps, est beaucoup moins gênante pour la perception du contraste. Elle a même un effet fortement bénéfique et il semble que ce "fond" continu, de niveau suffisamment faible, aide à mettre en relief les attaques des notes suivantes.

On donnera les coefficients (tableau 9.20) et les performances (tableau 9.21) d'une optimisation finale, en utilisant les différentes définitions des plages temporelles et de leurs contributions énergétiques (toutes énergies en *linéaire*) :

- 1° le découpage des énergies, comme l'effectue le logiciel AMS : **OD**, **R1**, **R2**, **R3** et **R4** ;
- 2° en utilisant le critère d_{lin} ($\max(\mathbf{OD}, \mathbf{R1})$) : d_{lin} , $d1_{lin}$, **R2**, **R3** et **R4** ;
- 3° en utilisant le critère \mathbf{DirE}'_{lin} ($\max(\mathbf{OD}, \mathbf{R1}, \mathbf{R2})$), et en définissant $\mathbf{ddd1}_{lin} = \min(\mathbf{OD}, \mathbf{R1}, \mathbf{R2})$ et $\mathbf{ddd2}_{lin}$, l'énergie "intermédiaire" : \mathbf{DirE}'_{lin} , $\mathbf{ddd1}_{lin}$, $\mathbf{ddd2}_{lin}$, **R3** et **R4**.

Il s'agit de la somme des énergies *linéaires* pondérées, transformées en valeurs dB, donc d'une sorte de puissance pondérée, adaptée à la perception du contraste.

plages	OD	R1	R2	R3	R4
coefs lin	1,0	0,4	0,4	-0,6	1,8
plages	d	d1	R2	R3	R4
coefs lin	1,0	-0,7	0,2	-0,8	1,5
plages	DirE'	ddd1	ddd2	R3	R4
coefs lin	1,0	-0,5	-0,3	-0,9	1,4

TAB. 9.20 - Coefficients des énergies des plages temporelles, donnant les meilleurs taux de corrélation avec la question sur le contraste. La ligne "plages" indique le découpage utilisé, cf. texte.

contr	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
OD, R1, R2, R3, R4	0.360	0.371	0.368	0.436	0.540	0.415
d, d1, R2, R3, R4	0.368	0.380	0.372	0.494	0.604	0.444
DirE', ddd1, ddd2, R3, R4	0.402	0.416	0.371	0.495	0.609	0.459

TAB. 9.21 - Taux de corrélations entre la question sur le contraste et les sommes pondérées des énergies des plages temporelles de la réponse impulsionnelle. La sommation est effectuée sur les énergies en linéaire, le résultat est transformé en dB. Les pondérations sont données dans le tableau 9.20

Dépendance fréquentielle

Afin d'étudier la dépendance fréquentielle, on reviendra au critère de l'amplification de la salle, les coefficients du modèle de réduction du nombre de variables d'entrée ayant montré une forte influence de la puissance des aiguës. Le tableau 9.22 suivant donne les taux de corrélation entre les réponses à la question sur le contraste et le critère de G , mesuré pour les différentes plages fréquentielles.

contr	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
63	0.132	0.136	0.137	0.219	-0.063	0.112
125	0.267	0.283	0.298	0.158	0.205	0.243
250	0.286	0.281	0.365	0.150	0.244	0.265
500	0.309	0.307	0.358	0.293	0.378	0.329
1k	0.334	0.340	0.343	0.413	0.531	0.392
2k	0.337	0.338	0.360	0.375	0.539	0.390
4k	0.339	0.353	0.317	0.390	0.500	0.380
8k	0.352	0.359	0.342	0.391	0.434	0.376
BF	0.292	0.300	0.347	0.176	0.248	0.272
MF	0.328	0.331	0.354	0.360	0.460	0.367
HF	0.345	0.352	0.343	0.395	0.541	0.395
delBF	0.061	0.026	0.253	-0.162	-0.260	-0.016
delHF	0.170	0.182	0.100	0.204	0.190	0.169

TAB. 9.22 - Taux de corrélations entre la question sur le contraste et le critère de G , pour les différents sous-ensembles considérés, pour différentes plages fréquentielles.

En concordance avec les coefficients du modèle de réduction, la perception du contraste est liée à l'amplification de la salle, surtout pour les fréquences aiguës. On choisira la plages des hautes fréquences (HF, la moyenne des deux bandes d'octaves autour de 2 kHz et autour de 4 kHz).

Direction d'émission et emplacement des sources

Aucune amélioration significative n'a été trouvée en prenant des pondérations de différentes directions d'émission ou de différents emplacements de source.

9.3.3 Résumé : contraste

La perception du contraste n'est pas liée à un seul critère objectif. Par contre, les résultats évoqués dans ce sous-chapitre ont permis de dégager différentes influences sur la correspondance entre les mesures objectives et les réponses à la question sur le contraste. Il s'agit de :

amplification de la salle : la perception du contraste n'est pas indépendante du niveau sonore et donc de l'amplification de la salle, G ;

dépendance fréquentielle : la perception du contraste est surtout augmentée par l'amplification de la salle pour les fréquences aiguës (moyenne des bandes d'octave autour de 2 kHz et autour de 4 kHz) ;

comparaison des différentes contributions précoces : la prépondérance de l'énergie d'une plage temporelle précoce dans la réponse de la salle, par rapport aux énergies des plages temporelles avoisinantes, augmente la perception du contraste. Cet effet est traduit par la définition d'un critère **DirE'**, le maximum d'énergie des plages temporelles précoces ;

influence de l'énergie du champ tardif : l'énergie "précoce" du champ réverbéré, **R3** (entre 80 ms et 160 ms), a un effet fortement nuisible sur la perception du contraste. Par contre, l'énergie tardive du champ réverbéré augmente la perception du contraste ;

énergie "intermédiaire : l'influence de la plage temporelle entre 40 ms et 80 ms, ou de l'énergie "intermédiaire **ddd2**, reste ambiguë. Une optimisation des bornes temporelles, la prise en compte de phénomènes éventuelles d'intégration *conditionnelle* ou *partielle* et des détails de rapport de "voisinage" des énergies **DirE'**, **ddd1** et **ddd2**, pourra améliorer la correspondance entre les mesures objectives et les données subjectives.

Ayant isolé les différents effets, on peut ajouter les influences et définir un nouveau critère nommé **CONTR**, directement lié aux réponses sur le contraste. Deux formules seront données, la première utilisant les énergies **d** et **d1**, la seconde utilisant les énergies **DirE'**, **ddd1** et **ddd2**. On donne les définitions ainsi que les performances de la correspondance objectif/perceptif obtenues avec ces nouveaux critères :

$$CONTR_d = G_{HF} + 0,5 * (d - d1) + (R4[dB] - R3[dB]), \quad (9.10)$$

$$CONTR = G_{HF} + 0,5 * (DirE' - ddd1) + (R4[dB] - R3[dB]), \quad (9.11)$$

où toutes les énergies sont exprimées en dB et, sauf pour l'amplification de la salle, **G**, les fréquences moyennes considérées.

Avec les énergies exprimées en linéaire (**G** reste toujours en dB), les formules deviennent :

$$CONTR_d = G_{HF} + 0,5 * 10 * \log_{10}\left(\frac{d_{lin}}{d1_{lin}}\right) + 10 * \log_{10}\left(\frac{R4}{R3}\right), \quad (9.12)$$

$$CONTR = G_{HF} + 0,5 * 10 * \log_{10}\left(\frac{DirE'_{lin}}{ddd1_{lin}}\right) + 10 * \log_{10}\left(\frac{R4}{R3}\right), \quad (9.13)$$

Les taux de corrélations sont les suivants :

contr	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
CONTR_d	0.376	0.392	0.371	0.448	0.641	0.446
CONTR	0.396	0.414	0.382	0.456	0.651	0.460

9.4 Balance générale

9.4.1 Seuils théoriques

Comme l'indique le tableau 9.23, à l'exception des tests à La Villette, les sujets évaluaient cette question avec fiabilité. L'influence de l'interaction acoustique/œuvre semble étonnamment faible sur cette question.

bal gal	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	moy concert	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.76	0.81	0.00	0.78	0.92	0.66
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.71	0.75	0.00	0.71	0.90	0.62

TAB. 9.23 - *Seuils théoriques des taux de corrélation, pour les sous-ensembles considérés, pour la question sur la balance générale. La première ligne indique les seuils calculés à partir du terme \mathcal{R} , calculé à partir du premier test d'écoute à la Villette. La deuxième ligne indique les seuils calculés à partir de la somme des termes \mathcal{R} et $\mathcal{I}(i_{m,k})$, calculée indépendamment pour les tests de la campagne européenne et les tests à la Villette (cf. chapitre 5).*

9.4.2 Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la “balance générale”

Les correspondances entre les réponses à cette question et les critères objectifs sont mauvaises — ce qui n'est pas très surprenant, compte tenu du fait que l'on étudie principalement une source omnidirectionnelle située au milieu de la scène. Comme le montre le tableau 9.24, la seule influence nette qui se dégage est l'effet bénéfique du champ tardif, surtout lorsque l'on compare différentes salles (**CONCplaces**).

bal gal	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	moy concert	\overline{cor}
G	0.114	0.153	-0.102	0.008	0.104	0.055
OD[dB]	-0.038	-0.018	-0.137	-0.145	-0.116	-0.091
O40	0.025	0.056	-0.090	-0.043	-0.151	-0.041
O80	0.066	0.105	-0.076	-0.016	-0.135	-0.011
R80	0.156	0.171	-0.096	0.020	0.249	0.100
C80	-0.075	-0.084	-0.060	-0.031	-0.337	-0.118
R20	0.168	0.181	0.026	0.082	0.146	0.120
OD/R20	-0.135	-0.139	-0.167	-0.191	-0.184	-0.163
TR	-0.044	-0.067	0.183	-0.054	0.378	0.079
EDT15	0.088	0.091	0.102	0.093	0.417	0.158

TAB. 9.24 - *Taux de corrélations entre la question sur la balance générale et quelques critères “classiques”, pour les différents sous-ensembles considérés, pour la plage fréquentielle des moyennes fréquences.*

Pour analyser plus en détail les correspondances avec des critères objectif, on rencontre deux principaux obstacles, déjà évoqués ci-dessus :

- étant donné la variabilité des tailles de scène selon les salles, très peu d'emplacement de sources étaient mesurés dans *toutes* les salles ;
- pour tous les emplacements autres que T0, seules quelques directions d'émission ont été mesurées.

Les possibilités de calculer des *différences* énergétiques entre les contributions de différents emplacements de source sont donc limitées. Par ailleurs, les *réponses* à la question sur la balance générale peuvent être traitées au même titre que les valeurs des critères objectifs. On arriverait à un modèle *mixte* d'explication des réponses aux questionnaire à partir de critères objectifs *et* à partir des réponses à un nombre très limité de questions.

On se limitera donc à donner les quelques influences qui ont pu être identifiées. Les meilleures correspondances avec les réponses à la question sur la balance générale ont été trouvées en considérant un mélange de paramètres acoustiques et géométriques :

influence du champ tardif : l'énergie du champ très tardif (**R4**) a un effet bénéfique, en “homogénéisant” la réponse des différents instruments sur scène et en les mélangeant ;

influence de l'énergie précoce : dans le tableau 9.24, on observe une corrélation négative entre l'énergie du son direct objectif (énergie entre 0 et 20 ms, **OD**, en dB) et les réponses sur la balance générale. Lorsque le son direct est très fort, on se trouve très proche de la source et les différences de distance par rapport aux différents instruments deviennent importantes. Toute autre contribution énergétique, même dans la réponse précoce de la salle, peut aider à limiter le déséquilibre entre les différents emplacements des sources ;

angle par rapport à l'axe de symétrie : la balance est généralement meilleure pour les places situées dans l'axe de symétrie de la salle (et pour les places situées devant l'orchestre, donc dans la direction d'émission principale de la plupart des instruments d'orchestre). Une bonne correspondance entre les réponses subjectives et cet angle, par rapport à cette "direction d'émission privilégiée", a été constatée ;

distance par rapport aux sources : la balance est généralement meilleure pour les places plus lointaines — surtout parce que, pour ces places, un écartement par rapport à l'axe de symétrie est moins critique ;

élévation : deux éléments peuvent expliquer ce "bonus" pour les places en hauteur, le moindre effet de masquage entre les musiciens sur scène et l'émission privilégiée vers le plafond de certains instruments. On avait déjà constaté l'importance de la direction d'émission vers le plafond dans le paragraphe sur la question sur la puissance sonore.

9.5 Puissance des aiguës

La question sur la puissance sonore des aiguës n'a pas été posée lors des tests d'écoute à la Philharmonie de Berlin, cf. chapitre 4.4. La salle de Berlin a donc dû être exclue de l'analyse, et quelques changements mineurs interviendront dans l'analyse de cette question.

9.5.1 Seuils théoriques

Les bornes supérieures des taux de corrélation seront uniquement données pour le bruit résiduel seul (\mathcal{R}). La question n'ayant pas été posée lors des tests à la Philharmonie de Berlin, les seuils intégrant le terme d'interaction ($\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$) ne sont plus accessibles pour la campagne européenne. Le tableau 9.25 donne les seuils théoriques des corrélations, calculés à partir du premier test d'écoute à La Villette.

paig	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.71	0.78	0.00	0.81	0.92	0.64

TAB. 9.25 - *Seuils théoriques des taux de corrélation, pour les sous-ensembles considérés, pour la question sur la puissance sonore des aiguës. Les seuils calculés à partir du terme \mathcal{R} , calculé à partir du premier test d'écoute à la Villette.*

On remarque que le bruit sur cette question a été supérieur à la variance utile pour les tests à La Villette. Pour les tests de la campagne européenne, les réponses à cette question sont très significatives et les bornes supérieures des taux de corrélation s'approchent de celles pour la question sur la puissance sonore (globale).

Dans le chapitre 7 sur le modèle de réduction du nombre des questions, donc des variables indépendantes, on a décidé que la question sur la puissance sonore des aiguës serait gardée comme une question d'entrée du modèle. Néanmoins, la possibilité d'exprimer les réponses à la question sur la puissance des aiguës à partir des réponses aux autres questions d'entrée a été évoquée, ce qui amène à une réduction supplémentaire du nombre de variables indépendantes. Les coefficients optimisés et réduits (c.-à-d. en minimisant le nombre de coefficients non nuls) sont redonnés et discutés ci-après :

coefs pour question: paig	puiss	rev	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.3	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0

La question sur la puissance sonore dans les aiguës est très fortement influencée par la question sur la puissance. Le lien entre les questions sur la puissance dans les aiguës et sur le contraste a été vu et discuté dans le paragraphe sur le contraste. On peut alors s'attendre à trouver des correspondances avec des critères objectifs proches de ceux pour la question sur la puissance sonore.

9.5.2 Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la “puissance des aiguës”

paig	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
G	0.226	0.217	0.325	0.328	0.459	0.311
OD[dB]	0.166	0.147	0.312	0.111	0.200	0.187
O40	0.200	0.190	0.330	0.275	0.305	0.260
O80	0.217	0.217	0.306	0.364	0.409	0.303
R80	0.202	0.198	0.290	0.070	0.322	0.216
C80	0.054	0.005	0.283	0.287	0.009	0.128
TR	-0.144	-0.176	0.160	-0.239	0.222	-0.035
EDT15	-0.001	0.057	-0.264	-0.091	0.208	-0.018

TAB. 9.26 - Taux de corrélations entre la question sur la puissance sonore des aiguës et quelques critères “classiques”, pour les différents sous-ensembles considérés, pour la plage fréquentielle des moyennes fréquences.

En analysant le tableau 9.26, on remarque que la tendance des taux de corrélations avec les quelques critères “classiques” est sensiblement identique à celle observée pour la question sur la puissance sonore; par contre, les taux sont nettement plus faibles.

Dépendance fréquentielle

Le tableau 9.27 donne les taux de corrélations entre la question sur la puissance des aiguës et le critère de l'amplification de la salle, **G**, pour les différentes plages fréquentielles.

paig	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
63	0.136	0.135	0.171	0.044	0.081	0.113
125	0.282	0.323	0.250	0.263	0.334	0.291
250	0.204	0.183	0.358	0.162	0.378	0.257
500	0.216	0.202	0.338	0.257	0.410	0.285
1k	0.228	0.221	0.306	0.385	0.495	0.327
2k	0.211	0.198	0.322	0.178	0.368	0.256
4k	0.240	0.242	0.274	0.229	0.303	0.258
8k	0.257	0.260	0.272	0.227	0.272	0.257
BF	0.253	0.262	0.315	0.237	0.398	0.293
MF	0.226	0.217	0.325	0.328	0.459	0.311
HF	0.231	0.225	0.302	0.213	0.354	0.265
delBF	0.133	0.121	0.227	-0.028	-0.027	0.085
delHF	0.106	0.113	0.064	0.000	-0.055	0.046

TAB. 9.27 - Taux de corrélations entre la question sur la puissance sonore des aiguës et le critère de **G**, pour les différents sous-ensembles considérés, pour différentes plages fréquentielles.

On s'aperçoit que les taux de corrélation les plus élevés apparaissent toujours pour les fréquences moyennes, surtout pour la bande d'octave de 1 kHz. Les seules différences par rapport à la question sur la puissance sont que les taux pour la bande d'octave autour de 1 kHz sont nettement plus élevés que ceux pour la bande autour de 500 Hz (pour la question sur la puissance, les taux de ces deux bandes étaient sensiblement identiques, avec des taux encore supérieurs pour la bande **MF**), et que les corrélations pour la pente vers les hautes fréquences sont très légèrement positives.

On a tenté d'exprimer la correspondance comme une somme pondérée de l'amplification de la salle (aux fréquences moyennes) et la pente vers les fréquences aiguës. Mais aucune amélioration n'a été obtenue (la corrélation positive avec la pente vers les hautes fréquences était due à un effet résiduel de la corrélation objective entre **G** pour les fréquences moyennes et la pente de **G** vers les hautes fréquences).

Dans le chapitre 3.4 sur l'interprétation des tests en laboratoire par J.-P. Jullien, les pentes fréquentielles ont été calculées sur l'énergie précoce (**DirE**) au lieu de l'énergie totale. Effectuer les corrélations entre les réponses à la question sur la puissance des aiguës et le critère de **DirE**, en fonction des plages fréquentielles, donne des résultats sensiblement identiques, surtout en ce qui concerne la dépendance fréquentielle. Les taux de corrélations sont, de manière générale, légèrement plus faibles.

Dépendance temporelle

Les coefficients du modèle de réduction montrent un rapprochement entre la question sur la puissance des aiguës et celles sur la puissance sonore et sur le contraste. Les taux de corrélations sont meilleurs pour les critères **PUISS** (cf. chapitre 9.1) et **CONTR** (critère optimisé pour la correspondance objectif/perceptif sur le contraste) :

paig	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
G[1kHz]	0.228	0.221	0.306	0.385	0.495	0.327
PUISS	0.291	0.298	0.317	0.380	0.508	0.359
CONTR	0.348	0.375	0.299	0.398	0.523	0.389

Une *nette* amélioration de la correspondance peut être trouvée si l'on effectue une somme pondérée des énergies des différentes plages temporelles. Les optimisations ont donné les meilleurs résultats lorsque la bande des moyennes fréquences était considérée.

On donne les coefficients des optimisations pour les énergies **OD**, **R1**, **R2** etc., les énergies **d**, **d1**, **R2**, etc. et les énergies **DirE'**, **ddd1**, **ddd2**, etc. :

plages	OD	R1	R2	R3	R4
coefs lin	1,0	3,0	3,0	-3,0	3,0
plages	d	d1	R2	R3	R4
coefs lin	1,0	-1,0	1,8	-1,5	0,7
plages	DirE'	ddd1	ddd2	R3	R4
coefs lin	1,0	-6,0	6,0	-2,0	2,5

TAB. 9.28 - Coefficients des énergies des plages temporelles, donnant les meilleurs taux de corrélation avec la question sur la puissance des aiguës. La ligne "plages" indique le découpage utilisé, cf. texte.

Ces résultats indiquent que la perception de la puissance dans les aiguës est fortement influencée par la distribution *temporelle* de l'énergie. La comparaison des performances montre une forte amélioration lorsqu'on prend l'énergie du son direct *perçue* et non pas l'énergie **OD**. Les coefficients soulignent l'importance des réflexions: le coefficient pour **R1** est nettement supérieur à celui d'**OD**, cf. également le fort coefficient de **ddd2** (l'énergie "intermédiaire").

Comment peut-on interpréter ces résultats? D'une part, il s'agit d'une très forte influence des

paig	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
OD, R1, R2, R3, R4	0.228	0.228	0.281	0.546	0.581	0.373
d, d1, R2, R3, R4	0.262	0.318	0.201	0.603	0.705	0.418
DirE', ddd1, ddd2, R3, R4	0.352	0.388	0.239	0.630	0.725	0.467

TAB. 9.29 - Taux de corrélations entre la question sur la puissance des aiguës et les sommes pondérées des énergies des plages temporelles de la réponse impulsionnelle. La sommation est effectuée sur les énergies en linéaire, le résultat est transformé en valeur en dB. Les pondérations sont données dans le tableau 9.28.

réflexions.¹⁵ Il s'agit alors de l'énergie hautes fréquences — ainsi que d'éventuelles colorations — apportées par ces réflexions. D'autre part, on remarque la différence entre les coefficients pour **R3** et **R4**. Le traînage tardif du son augmente la perception de la puissance des aiguës, tandis que l'énergie "précoce" du champ tardif, surtout quand elle est trop importante, peut nuire à la perception des aiguës.

On a également vérifié que l'équilibre fréquentiel de la réponse impulsionnelle ne dépende pas trop fortement de la date d'arrivée de l'énergie. Le tableau suivant indique la pente vers les hautes fréquences pour les différentes plages temporelles, moyennée sur toutes les places dans la totalité des salles testées.

plage temporelle	OD	R1	R2	R3	R4
delHF (dB)	-0.96	-0.59	-0.74	-1.34	-1.99

Les différences sont faibles, mais on remarque que le spectre des réflexions est au moins aussi riche en fréquences aiguës que le spectre du son direct. Par contre, le spectre du champ tardif est atténué dans les fréquences aiguës, à cause de l'absorption sélective de l'air.

Direction d'émission et emplacement des sources

Aucune dépendance significative de la direction d'émission n'a été trouvée pour cette question.

9.5.3 Résumé : puissance des aiguës

dépendance fréquentielle : la perception de la puissance sonore des aiguës n'est pas directement liée à l'amplification de la salle pour les fréquences aiguës. Pour l'amplification de la salle, les taux de corrélation sont maximales pour la bande d'octave autour de 1 kHz. Il y a une faible influence fréquentielle, car les meilleurs taux de corrélation pour la question sur la puissance ont été constatés pour les fréquences autour de 500 Hz. De plus, pour la puissance, la pente vers les fréquences aiguës avait une corrélation légèrement négative, cette influence devenant nulle pour la question sur la puissance des aiguës ;

dépendance temporelle : une influence très forte des réflexions a pu être mise en évidence. Les réflexions dans **R1** et dans **R2** accroissent la perception de la puissance des aiguës ; par contre, l'énergie arrivant entre 80 ms et 160 ms peut nuire à la perception du son direct et des réflexions, et diminue ainsi la perception de la puissance dans les aiguës ;¹⁶

liens avec d'autres questions : comme l'indiquent les coefficients du modèle de réduction du nombre de variables d'entrée, de forts liens existent entre la question sur la puissance

15. Les résultats sont parfois difficiles à interpréter à cause des coefficients négatifs pour **d1** et **ddd1**, surtout parce que les rapports de "voisinage" ne sont pas toujours connus. On est tenté d'avancer l'interprétation suivante : le maximum des contributions énergétiques est l'énergie du son direct perçue. Une faible énergie min(**OD**, **R1**, **R2**) augmente la perception du contraste et influence par ce biais la perception de la puissance des aiguës. C'est donc l'énergie intermédiaire qui prime dans la perception des "réflexions" (ou les réflexions peuvent précéder le son direct) et augmente la perception de la puissance des aiguës.

16. La même dépendance ayant été trouvée pour la question sur le contraste, il reste à vérifier s'il s'agit d'une influence résiduelle de la question sur le contraste.

des aiguës et celles sur le contraste et sur la puissance sonore. Les performances de correspondance sont presque aussi bonnes quand on utilise les critères **PUISS** et **CONTR**, spécifiquement liés à ces questions. Ce point sera de nouveau abordé dans le chapitre 9.7.

La forte importance des réflexions peut en partie être interprétée de la manière suivante : dans une situation de concert, avec public, le son direct est partiellement obstruit par les gens assis devant. Il ne s'agit pas de l'effet de l'incidence rasante, également présent pour les mesures salles vides, mais d'une obstruction partielle du chemin direct, pour les hautes fréquences. Les réflexions prennent davantage d'importance dans une salle occupée.

On tentera de définir, de manière expérimentale, un critère objectif correspondant à la question sur la puissance des aiguës, que l'on a nommé **PAIG** :

$$PAIG = 10 * \log_{10}(DirE'_{lin} - 6 * ddd1_{lin} + 6 * ddd2_{lin} - 2 * R3 + 2,5 * R4), \quad (9.14)$$

avec toutes les énergies *en linéaire*. Les taux de corrélation pour ce critère sont de :

paig	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
PAIG	0.352	0.388	0.239	0.630	0.725	0.467

On terminera ce paragraphe en donnant graphiquement la correspondance entre les réponses à la question sur la puissance des aiguës et le critère **PAIG**, pour les salles de concert (**CONCplaces**, figure 9.4).

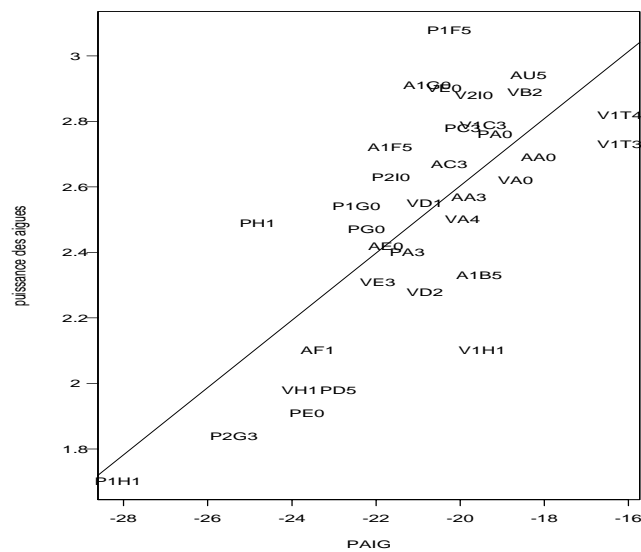


FIG. 9.4 - Correspondance entre les réponses sur la puissance des aiguës et le critère **PAIG**, pour la matrice **CONCplaces** des places individuelles dans les salles de concerts.

9.6 Puissance des graves

La question sur la puissance sonore des graves, comme celle sur la puissance sonore des aiguës, n'a pas été posée lors des tests d'écoute à la Philharmonie de Berlin.

9.6.1 Seuils théoriques

Les bornes supérieures des taux de corrélation seront uniquement données pour le bruit résiduel seul (\mathcal{R}). La question n'ayant pas été posée lors des tests à la Philharmonie de Berlin, les seuils intégrant le terme d'interaction ($\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$) ne sont plus accessibles pour la campagne européenne. Le tableau 9.25 donne les seuils théoriques des corrélations, calculés à partir du premier test d'écoute à La Villette.

pgrav	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.78	0.80	0.71	0.58	0.85	0.74

TAB. 9.30 - *Seuils théoriques des taux de corrélation, pour les sous-ensembles considérés, pour la question sur la puissance sonore des graves. Les seuils calculés à partir du terme \mathcal{R} , calculé à partir du premier test d'écoute à la Villette.*

Dans le chapitre 7 sur le modèle de réduction du nombre des questions, donc des variables indépendantes, il a été décidé que la question de la puissance sonore des graves serait gardée comme une question d'entrée du modèle. Néanmoins, la possibilité d'exprimer les réponses à la question sur la puissance des graves à partir des réponses aux autres questions d'entrée a été évoquée, menant à une réduction supplémentaire du nombre de variables indépendantes. Les coefficients optimisés seront redonnés et discutés ci-après :

coefs pour question: pgrav	puiss	rev	paig	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1

La question sur la puissance sonore dans les graves est donc également très fortement influencée par la question sur la puissance. De plus, on observe une légère influence des questions sur la réverbérance et sur la balance générale.

9.6.2 Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur la "puissance des graves"

pgrav	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
G	0.226	0.190	0.387	0.136	0.383	0.264
OD[dB]	0.256	0.222	0.398	0.100	0.097	0.214
O40	0.245	0.210	0.392	0.166	0.088	0.220
O80	0.219	0.175	0.385	0.222	0.182	0.236
R80	0.180	0.169	0.365	-0.056	0.381	0.208
C80	0.079	-0.005	0.354	0.247	-0.218	0.091
TR	-0.157	-0.154	-0.180	-0.100	0.544	-0.010
EDT15	-0.133	-0.073	-0.347	-0.342	0.416	-0.096

TAB. 9.31 - *Taux de corrélations entre la question sur la puissance sonore des graves et quelques critères "classiques", pour les différents sous-ensembles considérés, pour la plage fréquentielle des moyennes fréquences.*

En analysant le tableau 9.31, on remarque que les corrélations avec le critère de l'amplification de la salle, **G**, sont positives, de manière cohérente, mais que les taux restent très faibles. Pour les salles de concert réunies, les taux sont très élevés pour les critères de **TR** et d'**EDT**, soulignant une importance de la réverbération tardive. Mais cette influence différencie surtout les *salles* individuelles : la Musikvereinssaal à Vienne a le temps de réverbération le plus long et le champ tardif le plus important. Cette salle est également perçue comme ayant la puissance des graves la plus élevée.

Dépendance fréquentielle

pgrav	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{COT}
63	0.186	0.193	0.169	-0.104	-0.084	0.072
125	0.179	0.119	0.383	0.049	0.064	0.159
250	0.190	0.151	0.347	0.117	0.331	0.227
500	0.239	0.209	0.374	0.164	0.382	0.273
1k	0.202	0.160	0.389	0.091	0.369	0.242
2k	0.196	0.149	0.420	-0.041	0.195	0.184
4k	0.164	0.104	0.416	-0.096	-0.022	0.113
8k	0.183	0.121	0.466	0.095	0.000	0.173
BF	0.204	0.153	0.391	0.096	0.237	0.216
MF	0.226	0.190	0.387	0.136	0.383	0.264
HF	0.180	0.125	0.425	-0.082	0.086	0.147
delBF	0.044	-0.022	0.302	-0.016	-0.196	0.022
delHF	-0.003	-0.049	0.226	-0.236	-0.351	-0.083

TAB. 9.32 - Taux de corrélations entre la question sur la puissance sonore des graves et le critère de \mathbf{G} , pour les différents sous-ensembles considérés, pour différentes plages fréquentielles.

Comme pour les questions sur la puissance sonore et sur la puissance des aiguës, les meilleurs taux apparaissent pour les fréquences moyennes. Une légère influence fréquentielle peut néanmoins être constatée : premièrement, les taux de corrélation sont supérieurs pour la bande d'octave autour de 500 Hz que pour celle autour de 1 kHz (contrairement à la question sur la puissance des aiguës). Deuxièmement, la corrélation avec la pente vers les fréquences aiguës est négative (à l'exception de la matrice **Villette**).

Une différence de perception se manifeste entre les salles de la campagne européenne et la salle de La Villette : pour les salles de la campagne, il existe une assez forte influence *négative* de la pente vers les fréquences aiguës, tandis que pour la salle de La Villette, on remarque une influence *positive* de la pente vers les fréquences graves.

Comme pour la question sur la puissance des aiguës, une analyse portant sur le critère **DirE**, au lieu de \mathbf{G} , donne des résultats sensiblement identiques.

Dépendance temporelle

En étudiant la dépendance temporelle de la question sur la puissance des graves, une certaine complémentarité avec la question sur la puissance des aiguës a été constatée. Ces résultats sont sujets à caution car ils se sont avérés très instables lors d'un changement de définition des plages temporelles (**OD**, **R1**, etc. ; **d**, **d1**, etc. ; **DirE**[?], **ddd1**, **ddd2**, etc.). La meilleure correspondance a été observée pour le découpage **d**, **d1**, **R2**, etc. et en considérant les basses fréquences (**BF**). Les influences suivantes se sont dégagées :

- l'énergie du son direct perçue, **d** a une influence fortement positive ;
- les réflexions, précoces comme intermédiaires (**d1** et **R2**) diminuent la perception de la puissance des graves ;
- l'énergie de **R3** augmente la perception de la puissance des graves, tandis que l'énergie **R4** a tendance à la diminuer.

En intégrant la correspondance avec l'amplification de la salle, la meilleure correspondance a été trouvée pour le critère suivant :

$$P_{GRAV} = G_{MF} + 0,3 * \frac{d_{lin_{BF}}}{d1_{lin_{BF}} + R2_{BF}} + 0.6 * \frac{R3_{BF}}{R4_{BF}}. \quad (9.15)$$

Les taux de corrélations avec ce critère sont les suivants :

pgrav	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
PGRAV	0.305	0.271	0.452	0.259	0.426	0.343

Direction d'émission et emplacement des sources

Une légère amélioration de la correspondance a été trouvée en considérant une source directive, avec un lobe de directivité orienté vers la salle, et en donnant un poids plus élevé à l'emplacement S2 (côté cour) qu'à l'emplacement S1 (côté jardin).

Critères liés à l'impression d'espace

Plusieurs chercheurs ont évoqué des liens entre la perception des fréquences graves et l'impression d'espace. Sur les données étudiées ici, aucune influence — sinon une très légère influence *négative* — des critères liés à une augmentation de l'impression d'espace (**LE**, **dANG1**, **dANG2**) sur la perception de la puissance des graves n'a été constatée.

9.6.3 Résumé : puissance des aiguës

dépendance fréquentielle : il existe une légère influence de la variation fréquentielle de l'amplification de la salle pour les fréquences graves. Les taux de corrélation sont maximales pour la bande d'octave autour de 500 Hz (pour la question sur la puissance des aiguës, les meilleurs taux de corrélation apparaissaient pour la bande d'octave autour de 1 kHz). De plus, une influence de la pente de **G** vers les fréquences graves et vers les fréquences aiguës a pu être observée, mais différemment pour les salles de la campagne européenne et la salle de La Villette ;

dépendance temporelle : la dépendance temporelle reste incertaine. Une certaine complémentarité avec la dépendance temporelle de la correspondance sur la puissance des aiguës a été constatée.

9.7 Puissance des aiguës moins celle des graves (paig - pgrav)

Les paragraphes précédents montraient des liens très forts entre les questions sur la puissance dans les aiguës et la puissance dans les graves d'un côté, et la question sur la puissance sonore de l'autre côté. Ces liens peuvent être observés autant dans les coefficients du modèle de réduction du nombre des variables d'entrée (cf. le chapitre 7 ou les chapitres 9.5 et 9.6), que dans la proximité des critères objectifs expliquant les réponses aux différentes questions. De plus, les taux de corrélation entre les réponses à ces questions et les critères objectifs sont restés faibles. Revenant aux matrices de départ, il s'avère qu'une *indépendance* entre ces deux questions n'existe que pour les changements de l'œuvre et de son effectif orchestral. Ce constat ne surprend guère : en première lieu, une salle de concert est une sorte de filtre all-pass, laissant passer toutes les fréquences de manière équivalente. Les détails des matériaux utilisés et leurs coefficients d'absorption acoustique dans les fréquences graves et aiguës peuvent changer le spectre de la réponse de la salle. Par contre, un changement d'œuvre et de son effectif orchestral introduit des différences nettement plus grandes et de manière plus indépendante pour les fréquences graves et aiguës.

On conclura donc qu'il est nécessaire de garder ces deux questions comme des questions indépendantes d'entrée sur les changements de l'œuvre musicale et de son effectif orchestral :

- utilisation d'instruments riches en harmoniques aiguës (cuivres, quelques instruments de percussion) ;

- utilisation d’instruments riches en basses fréquences (tuba, quelques percussions, également le piano); ou utilisation d’instruments avec peu de graves (par exemple instruments baroques).

Pour les changements de *l’acoustique*, les correspondances avec les critères objectifs trouvées dans les paragraphes précédents ne sont que des *effet secondaires* — mais néanmoins fort intéressants. En ce qui concerne l’acoustique même, on se demande s’il ne suffirait pas d’étudier la *différence* des réponses aux questions sur la puissance des aiguës et celle des graves: **paig - pgrav**.

Résumé sur la différence paig moins pgrav

Aucune amélioration de la correspondance n’a été trouvée par rapport aux critères **PAIG** et **PGRAV**, définis dans les paragraphes précédents. Néanmoins, l’étude a permis de confirmer les influences suivantes :

énergie des réflexions: l’énergie des réflexions (**R1** et **R2**), particulièrement l’énergie des fréquences aiguës, augmente la perception de la puissance des aiguës (augmentant la différence paig - pgrav);

énergie du champ tardif: une séparation assez nette apparaît pour l’énergie du champ réverbéré, l’énergie *très* tardive **R4** augmentant la différence (paig - pgrav), l’énergie **R3** (énergie arrivant entre 80 ms et 160 ms) augmentant la perception de la puissance des fréquences graves. L’effet peut être traduit en adaptant la définition du critère **D2** (critère de la “cassure” de la décroissance, cf. le chapitre 3.4.4) en utilisant une borne temporelle de 160 ms :

$$D3 = 10 * \log_{10} \left(\frac{R2 + R3 + R4}{R4} \right) \quad (9.16)$$

$$= 10 * \log_{10} \left(\frac{\int_{t=40ms}^{\infty} p^2 dt}{\int_{t=160ms}^{\infty} p^2 dt} \right) \quad (9.17)$$

L’influence du critère **D3** sur la perception de la puissance des graves peut être observée dans toutes les plages fréquentielles, et ce critère pourrait traduire ce que l’on appelle en anglais “boomy” (grondant) ou “boomieness” d’une salle: une forte réponse relativement précoce de la salle, qui peut être perceptivement confondue avec la réponse tardive de la salle (traînage des sons);

importance de la réponse précoce: en ce qui concerne les pentes vers les fréquences graves et aiguës, l’influence est plus marquée pour l’énergie *précoce* (**DirE**, également **C80**): pour le critère **DirE**, la corrélation de la différence (paig - pgrav) est positive avec la pente vers les fréquences aiguës, et négative pour la pente vers les fréquences graves. Pour le critère de l’amplification de la salle, **G**, la corrélation est *positive* pour *toutes* les bandes fréquentielles ainsi que pour les pentes, indiquant qu’une variation de **G**, pour toutes les fréquences, a un effet plus grand pour la question sur la puissance des aiguës que pour celle sur la puissance des graves.

9.8 Pâteux

9.8.1 Seuils théoriques

On constate que les seuils théoriques pour la question sur pâteux sont légèrement moins élevés que pour les questions sur la puissance, sur la réverbérance et sur le contraste. Par

pat	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.63	0.67	0.16	0.79	0.87	0.62
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.51	0.58	0.00	0.74	0.84	0.53

TAB. 9.33 - *Seuils théoriques des taux de corrélation, pour les sous-ensembles considérés, pour la question sur pâteux. La première ligne indique les seuils calculés à partir du terme \mathcal{R} , calculé à partir du premier test d'écoute à la Villette. La deuxième ligne indique les seuils calculés à partir de la somme des termes $\mathcal{R} + \mathcal{I}$, calculée individuellement à partir des tests de la campagne européenne et des tests à la Villette (cf. chapitre 5).*

contre, si l'on tient compte de l'échelle proposée (échelle binaire avec les valeurs 0 [défaut non remarqué] et 1 [défaut observé]) les performances doivent être considérées comme très bonnes et on conclura que les sujets étaient capables d'évaluer cette question avec certitude.

9.8.2 Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur "pâteux"

pat	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
G	-0.126	-0.099	-0.277	-0.197	-0.314	-0.203
OD[dB]	-0.128	-0.107	-0.239	-0.177	-0.302	-0.191
O40	-0.128	-0.103	-0.255	-0.191	-0.308	-0.197
O80	-0.141	-0.109	-0.295	-0.195	-0.310	-0.210
R80	-0.085	-0.078	-0.208	-0.104	-0.214	-0.138
C80	-0.083	-0.033	-0.295	-0.121	-0.031	-0.113
TR	0.072	0.078	0.019	0.145	-0.155	0.032
EDT15	0.050	0.002	0.256	0.044	-0.130	0.044

TAB. 9.34 - *Taux de corrélations entre la question sur pâteux et quelques critères "classiques", pour les différents sous-ensembles considérés, pour la plage fréquentielle des moyennes fréquences.*

En analysant le tableau 9.34, on s'aperçoit que les taux de corrélation les plus élevés apparaissent pour le critère **G**, l'amplification de la salle. La question sur pâteux n'est pas indépendante du niveau sonore global. En comparant les taux de corrélation pour les critères de **OD** et **O40** à ceux pour **R80**, on remarque une influence prédominante de la réponse précoce de la salle. Ce résultat est confirmé par la corrélation négative du défaut de pâteux avec le critère de **C80**, indiquant qu'une augmentation de l'indice de clarté diminue le danger d'un son pâteux.

Dans le chapitre 7 sur le modèle de réduction du nombre des questions, donc des variables indépendantes, il a été décidé que la question sur pâteux serait gardée comme une question d'entrée du modèle. Néanmoins, la possibilité d'exprimer les réponses à la question sur pâteux à partir des réponses aux autres questions d'entrée a été évoquée, menant à une réduction supplémentaire du nombre de variables indépendantes. Les coefficients optimisés seront redonnés et discutés ci-après :

coefs pour question: pat	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heure	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.19	0.16	-0.10

L'influence de l'énergie précoce se traduit par un fort coefficient de la question sur le contraste. De plus, on constate les influences de la question sur la réverbérance (une augmentation de la réponse sur la réverbérance amène à augmenter le risque d'un son pâteux) et du défaut de heurté.

On donne les correspondances en utilisant les critères optimisés pour les questions sur le

contraste et sur la réverbérance:¹⁷

pat	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
CONTR _d	-0.168	-0.162	-0.223	-0.240	-0.391	-0.237
ts	0.048	-0.008	0.234	0.050	-0.089	0.047
C80	-0.083	-0.033	-0.295	-0.121	-0.031	-0.113

L'influence du temps central est moins forte que celle de l'indice de clarté C80. On essaye une somme pondérée du critère CONTR et de C80, menant aux corrélations suivantes:

pat	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
CONTR _d + 0,5 * C80	-0.177	-0.170	-0.249	-0.259	-0.406	-0.252

Dépendance fréquentielle

Le tableau 9.35 donne la dépendance fréquentielle de la correspondance entre la question sur pâteux et le critère de G.

pat	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
63	-0.004	0.019	-0.119	-0.061	-0.022	-0.037
125	-0.064	-0.036	-0.182	0.030	-0.073	-0.065
250	-0.105	-0.076	-0.251	-0.031	-0.135	-0.119
500	-0.126	-0.095	-0.295	-0.153	-0.258	-0.185
1k	-0.121	-0.097	-0.258	-0.233	-0.363	-0.214
2k	-0.108	-0.086	-0.240	-0.152	-0.272	-0.171
4k	-0.083	-0.072	-0.149	-0.104	-0.197	-0.121
8k	-0.099	-0.080	-0.211	-0.151	-0.175	-0.144
BF	-0.087	-0.058	-0.219	-0.014	-0.124	-0.101
MF	-0.126	-0.099	-0.277	-0.197	-0.314	-0.203
HF	-0.098	-0.081	-0.195	-0.133	-0.250	-0.151
delBF	0.022	0.045	-0.086	0.225	0.268	0.095
delHF	0.009	-0.004	0.091	0.014	0.054	0.033

TAB. 9.35 - Taux de corrélations entre la question sur pâteux et le critère de G, pour les différents sous-ensembles considérés, pour différentes plages fréquentielles.

On remarque qu'une influence de G persiste surtout pour les fréquences moyennes — contrairement à la question sur le contraste, liée surtout au critère de G dans les fréquences aiguës. De plus, on remarque, pour les salles de concert, une influence assez forte de la pente vers les basses fréquences (delBF).

Intégrer la dépendance fréquentielle nous amène à la correspondance suivante:

pat	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
CONTR _d + 0.5*C80 - 1.5*GdelBF	-0.170	-0.159	-0.241	-0.321	-0.461	-0.270

Dépendance temporelle

Mais ne faudrait-il pas étudier séparément les influences de l'énergie précoce et de l'énergie tardive? En étudiant les influences des pentes fréquentielles de l'énergie avant 80 ms (O80) et de l'énergie après 80 ms (R80), une optimisation a été trouvée en utilisant le critère suivant, nommé PAT:

17. La performance de la correspondance est légèrement meilleure en utilisant le critère CONTR_d (en utilisant les plages d et d1) au lieu de CONTR (en utilisant les plages DirE' et ddd1). Les correspondances seront donc données en utilisant le critère CONTR_d.

$$\text{PAT} = \text{CONTR}_d + 0.5 * \text{C80} - 1.5 * \text{O80}_{\Delta BF} + 0.5 * \text{R80}_{\Delta BF} - 2 * \text{R80}_{\Delta HF}. \quad (9.18)$$

Les taux de corrélation avec ce nouveau critère sont donnés dans le tableau suivant :

pat	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
PAT	-0.222	-0.231	-0.241	-0.414	-0.635	-0.348

Cette optimisation met en évidence que la question sur pâteux est aussi liée à un déséquilibre fréquentiel de la réponse temporelle de la salle. On différencie les influences suivantes :

- en étudiant la pente fréquentielle du critère de **G**, on constate qu’un surplus de fréquences graves par rapport aux fréquences moyennes accroît le danger de pâteux ;
- en séparant les énergies précoce et tardive, on constate qu’un surplus de graves dans l’énergie *précoce* à des effets négatifs. Ce résultat peut être interprété comme un effet du rapprochement sémantique constaté entre les questions sur pâteux et sur la lourdeur. Une énergie précoce trop déséquilibrée vers les fréquences graves risque de créer un son lourd et pâteux ;
- aucune influence de la pente de l’énergie précoce vers les hautes fréquences n’a été constatée ;
- pour l’énergie après 80 ms, un surplus de graves *diminue* le risque de l’apparition du défaut de pâteux. Ceci doit être interprété par rapport au déséquilibre fréquentiel de l’énergie précoce : un surplus de graves dans la réponse tardive peut équilibrer un surplus de graves dans la réponse précoce. Le coefficient pour la pente de l’énergie tardive vers les basses fréquences est relativement faible ;
- pour la réponse tardive de la salle, un excès d’aiguës accentue le défaut de pâteux. Cet excès d’énergie des hautes fréquences dans la réponse tardive de la salle nuit à la perception du début des notes suivantes, cf. la question sur le contraste.

Une optimisation similaire a été essayée en utilisant les critères de **DirE** et **Rev** comme énergies précoce et tardive perçues, ce qui a donné une correspondance nettement moins bonne. Ceci met en évidence une influence de l’énergie intermédiaire (**R2** et **R3**), cette énergie ne contribuant que peu — ou exceptionnellement — dans la perception des énergies précoce et tardive.

9.8.3 Résumé : pâteux

Plusieurs facteurs influençant la perception du défaut de pâteux ont été dégagés. Une forte amplification de la salle décroît le danger de perception de ce défaut. Plus intéressant encore est la dépendance fréquentielle pour les énergies précoce et tardive. On remarque que cette dépendance rappelle ce qui se passe lorsque l’on est assis *derrière* un instrument directif ayant le lobe de directivité orienté vers l’avant : l’énergie précoce est déséquilibrée vers les graves, le rayonnement étant moins directionnel pour les fréquences graves ; l’énergie tardive a plus d’aiguës par rapport à l’énergie précoce, et un surplus d’aiguës dans l’énergie tardive augmente encore le déséquilibre fréquentiel entre l’énergie précoce et l’énergie tardive. On avait constaté dans le chapitre 6.3 que les places derrière l’orchestre, à la Philharmonie de Berlin, ont été jugées “pâteux” pour le concerto de piano de Brahms. Par contre, la dépendance fréquentielle de la correspondance entre les mesures objectives et les réponses à la question sur pâteux a été constatée en considérant une source *omnidirectionnelle* située au centre de la scène. L’utilisation d’instruments directifs augmentera encore le risque de ce défaut pour les places situées à l’extérieur du lobe de directivité de ces instruments.

9.9 Heurté/fluidité

En ce qui concerne cette question, ou plutôt ce couple de questions, le questionnaire a été transformé entre les tests d'écoute de la campagne européenne et les tests à La Villette. Lors de la campagne, la question sur la "fluidité" a été posée, avec une échelle comportant quatre unités perceptives et les attributs heurté — assez heurté — assez fluide — fluide. Lors des tests à La Villette, cet aspect perceptif a été placé parmi les questions liées aux éventuels défauts (question binaire sur "heurté", oui ou non). Dans le chapitre 7 sur le modèle de réduction du nombre de questions, on a constaté que cette question doit être considérée indépendamment des autres. Ce changement sur la question pose certains problèmes pour l'analyse, car les deux parties du corps de données peuvent difficilement être traitées ensembles.

9.9.1 Seuils théoriques

heurte	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	-	-	0.00	-	-	-
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	-	0.76	0.00	0.79	0.92	0.62

TAB. 9.36 - *Seuils théoriques des taux de corrélation, pour les sous-ensembles considérés, pour la question sur fluidité/heurté. La première ligne indique les seuils calculés à partir du terme \mathcal{R} , calculé à partir du premier test d'écoute à la Villette. La deuxième ligne indique les seuils calculés à partir de la somme des termes \mathcal{R} et $\mathcal{I}(i_{m,k})$, calculée indépendamment à partir des tests de la campagne européenne et des tests à la Villette (cf. chapitre 5).*

Pour la campagne européenne et la questions sur la fluidité, les bornes supérieures des taux de corrélation, ne peuvent être calculée que pour la somme des termes $\mathcal{I}(i_{m,k})$. Lors du premier test d'écoute à La Villette, l'importance du bruit résiduel seul n'a été déterminée que pour la question sur heurté. Pour les tests à La Villette, et pour cette question, la variance due au bruit résiduel est supérieure à la variance utile.

9.9.2 Correspondance des critères objectifs avec les réponses à la question sur "heurté/fluidité"

Dans le chapitre 7, une prédiction des réponses à la question sur "heurté" (à La Villette) et sur la "fluidité" (campagne européenne) a été effectuée. Les coefficients optimisés pour les deux cas sont les suivants :

coefs pour question:	puiss	rev	paig	pgrav	contr	pat	bal gal
(VIL): heurte	0.08	0.00	0.00	0.00	-0.08	0.00	-0.15
(CAMPAGNE): fluid	0.00	0.00	0.00	0.00	0.20	0.00	0.40

On s'attendrait à trouver une influence du critère lié à la perception du contraste ainsi que, pour la question sur heurté, une influence de l'amplification de la salle. La question sur la balance reste encore difficile à intégrer.

Les premières analyses effectuées sur cette question montrent plutôt qu'il faut les analyser *séparément*.

9.9.3 fluidité

On traitera les différentes influences sur la question sur la fluidité indépendamment :

énergie précoce : il s'agit de "l'émergence" du son direct perçu — ou plutôt d'une "gêne potentielle" par les réflexions précoces. Plusieurs critères de rapport entre l'énergie du son direct (objectif, **OD**, ou perçu, **d** ou **DirE**) et l'énergie des réflexions ont été essayées :

fluid	Campagne	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
OD[dB] - R1[dB]	0.079	0.061	0.174	0.105
OD[dB] - R2[dB]	0.024	-0.128	-0.032	-0.046
d[dB] - d1[dB]	0.257	0.332	0.351	0.313
DirE' - ddd1[dB]	0.205	0.293	0.407	0.302
DirE' - ddd2[dB]	0.174	0.150	0.479	0.268
DirE' - (ddd1[lin] + ddd2[lin])[dB]	0.195	0.238	0.504	0.313

énergie précoce latérale : un autre élément permet d'affirmer qu'il s'agit d'une influence des réflexions précoces. L'énergie arrivant *latéralement* (mesurée avec un microphone figure 8, pour la bande fréquentielle des fréquences moyennes) et *précocement* (entre 20 ms et 40 ms) a une influence *négative* sur la perception de la fluidité. Ce résultat montre également que la sensibilité à l'écho est accrue pour les directions d'arrivée *latérales*, cf. les travaux de Wettschurek, chapitre 2.10.2. Cette influence peut également être décrite en utilisant le critère **dANG1** proposé dans les analyses des tests en laboratoire :

fluid	Campagne	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
d[dB] - d1[dB] - 0.5 * R1 _{fig.8} [dB]	0.256	0.345	0.400	0.334
DirE' - ddd2[dB] - 0.3 * R1 _{fig.8} [dB]	0.210	0.240	0.490	0.314
DirE' - (ddd1[lin] + ddd2[lin])[dB] - 0.2 * R1 _{fig.8} [dB]	0.216	0.280	0.515	0.337
DirE' - (ddd1[lin] + ddd2[lin])[dB] - 0.2*dANG1	0.226	0.253	0.519	0.333

énergie tardive : l'énergie tardive diminue la "gêne potentielle" des réflexions précoces isolées. Cette énergie peut être exprimée soit comme l'énergie du champ tardif (**R4**), soit comme temps de réverbération (**EDT**). La meilleure correspondance a été trouvée en utilisant le critère **EDT10** :

fluid	Campagne	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
d[dB]-d1[dB]-0.5*R1 _{fig.8} [dB]+0.006*EDT10[ms]	0.264	0.392	0.591	0.416
DirE'-(ddd1[lin]+ddd2[lin])[dB]-0.2*R1 _{fig.8} [dB]+0.004*EDT10[ms]	0.234	0.352	0.608	0.398
DirE' - (ddd1[lin] + ddd2[lin])[dB] - 0.2*dANG1+0.004*EDT10[ms]	0.252	0.358	0.620	0.410

9.9.4 heurté

Comme l'indique le tableau 9.36, les variations des réponses à la question sur heurté ne sont pas significatives. De plus, en étudiant attentivement les réponses, il s'avère que les sujets ont remarqué ce défaut pour certaines combinaisons œuvre/place. Si l'on ne prend pas en compte l'interaction œuvre/acoustique, on ne peut pas s'attendre à trouver une bonne correspondance. En fait, les taux de corrélations restent extrêmement faibles et ne seront pas rapportés ici. On donnera seulement les quelques influences que l'on a tenté de dégager :

énergie totale et énergie précoce : une corrélation négative a été trouvée entre le critère de l'amplification de la salle, **G**, et les réponses à la question sur heurté: une bonne puissance permet donc de limiter le risque d'apparition de ce défaut. Une corrélation négative a également été trouvée avec le critère de l'énergie du son direct perçue, **DirE'**. La corrélation avec le critère **DirE'** est plus forte que celles avec les critères **d** et **OD**. Par contre, aucune amélioration n'a été constatée quand on a étudié les *rappports* entre l'énergie du son direct et celle des réflexions ;

énergie précoce latérale : comme pour la question sur la fluidité, une influence des réflexions précoces (surtout entre 20 ms et 40 ms) arrivant latéralement a été constatée. Cette influence peut être exprimée en utilisant le critère **dANG1**. Une *faible* valeur de ce critère, donc une faible diffusion de l'énergie très précoce, limite le danger du défaut de heurté ;

temps central des réflexions : une autre influence permet d'affirmer que la question sur heurté est liée à une sensibilité à l'écho : les réponses sont *positivement* corrélées avec le temps central des réflexions (réflexions comprises entre 20 ms et 160 ms).

Dépendance fréquentielle

Pour les influences de l'énergie précoce, aucune dépendance fréquentielle n'a été constatée. Par contre, l'influence de l'énergie des réflexions précoces arrivant latéralement, et pour le temps central des réflexions (pour la question sur heurté), est encore plus marquée pour les fréquences aiguës, surtout pour la bande d'octave autour de 2 kHz.

9.10 Intégration de l'effet de l'interaction

L'effet de l'interaction acoustique/œuvre est dû principalement à la directivité de l'effectif orchestral employé (directivité moyenne ou celle de certains instruments jouant un rôle important dans la partition).¹⁸ Afin de traduire cet effet dans les mesures objectives effectuées, il faut considérer, pour chaque œuvre musicale, une autre pondération des différents emplacements et directions d'émission de la source de mesures. Pour chaque œuvre musicale et chaque salle, un nombre restreint de places a été écouté, et il faut donc restreindre le nombre de paramètres libres et donc des directions d'émission considérées. Pour chaque œuvre musicale, une régression multiple *par œuvre* a été effectuée, en considérant les directivités suivantes :

- T0o, la source omnidirectionnelle reconstituée, située au milieu de la scène/de la fosse d'orchestre ;
- T0f, la direction d'émission frontale de la même source ;
- T0p, la direction d'émission vers le plafond.

Pour effectuer cette optimisation de la directivité par œuvre, on ne considère que les œuvres et/ou les salles pour lesquelles au moins 7 places différentes ont été écoutées — les coefficients de la régression multiple devenant trop instables autrement. Les taux de corrélation moyenne peuvent donc différer, et les taux moyens pour le critère choisi seront redonnés pour la source omnidirectionnelle ainsi que pour l'optimisation par œuvre. Bien que seulement trois directivités soient considérées pour la régression multiple — et seules les œuvres pour lesquelles un nombre suffisant de places a été écouté sont incluses dans l'analyse —, les résultats de l'optimisation de la directivité de la source orchestrale par œuvre sont souvent très instables. Dans la plupart des cas, on se limitera donc à donner un résultat "sommaire" : il s'agit du taux moyen de corrélation pour une source omnidirectionnelle, du taux moyen de corrélation pour l'optimisation de la directivité de l'ensemble orchestral et du *quotient* des deux taux moyens. Ce quotient donne un indice de l'importance de l'effet de l'interaction : s'il est proche de 1, c.-à-d. que le fait de considérer une directivité différente par œuvre n'améliore que peu la correspondance objectif/perceptif, l'effet de l'interaction acoustique/œuvre est faible. Par contre, si le quotient est élevé, c'est indicateur d'un fort effet de l'interaction.

puissance

Pour la question sur la puissance, l'effet de l'interaction acoustique/œuvre n'est pas très important.

18. L'effet de *l'écriture musicale* a été étudié dans l'article [KJ94], en utilisant les "déviations" du temps de réverbération par rapport à des valeurs optimales trouvées dans la littérature (par exemple [Ber62], [Kuh54]). L'effet de l'écriture musicale est — pour les données analysées dans ce document — moins important que l'effet de la directivité de l'effectif orchestral.

Une optimisation automatique, indépendamment par œuvre a été effectuée. Le tableau suivant donne les résultats pour la question sur la puissance sonore (le critère utilisé est l'amplification de la salle, pour la bande fréquentielle des fréquences moyennes, en dB),¹⁹ ces valeurs peuvent être considérés comme “benchmark” pour les autres questions.

cor par œuvre	global	avec interaction	quotient
\overline{cor} , avec G_{HF}	0.458	0.704	1.5

Un quotient de 1,5 doit donc être considéré comme une “faible” amélioration — cette amélioration s’explique par le “fitting” inévitable du bruit contenu dans les réponses aux questions par les paramètres libres de la régression multiple.

réverbérance

En comparant les bornes théoriques des taux de corrélations pour la question sur la réverbérance, il a déjà été supposé que l’effet de l’interaction est très important pour cette question.

Une optimisation automatique, indépendamment par œuvre, a été effectuée. Les résultats sont donnés dans le tableau suivant pour le critère du temps central (ts , pour la bande d’octave de 2 kHz) et peuvent être comparés avec ceux de la question sur la puissance sonore.

cor par œuvre	global	avec interaction	quotient
\overline{cor} , avec ts_{2k}	0.157	0.653	4.2

Le quotient (de 4,2) est nettement supérieur à celui de la question sur la puissance sonore (quotient de 1,5). Ce résultat confirme l’importance de l’effet de l’interaction acoustique/œuvre pour la question sur la réverbérance. Les coefficients de la régression multiple sont néanmoins difficilement interprétables en tant que tels. Pour plusieurs œuvres, des coefficients *négatifs* apparaissent pour au moins une directivité, et l’ordre de grandeur des coefficients est très variable.

contraste

Pour la question sur le contraste et le critère **CONTR**, le quotient est de 1,8 et l’amélioration du taux de corrélation est évidente; l’effet de l’interaction acoustique/œuvre doit donc être considéré comme assez important, sans néanmoins l’être autant que pour la question sur la réverbérance.

cor par œuvre	global	avec interaction	quotient
\overline{cor} , avec CONTR	0.415	0.731	1.761

pâteux

Pour la question sur pâteux et le critère **PAT**, le quotient est de 2,5 et l’amélioration du taux de corrélation est très nette; l’effet de l’interaction acoustique/œuvre doit donc être considéré comme assez important, comme cela a été supposé dans le paragraphe 9.8. Le taux de corrélation de $r = -0,621$ doit même être considéré comme excellent, par rapport au seuil théorique de 0,63 pour la matrice **toutes salles**, dans le tableau 9.33.

cor par œuvre	global	avec interaction	quotient
\overline{cor} , avec PAT	-0.250	-0.621	2.488

Les questions sur la balance générale, la puissance des aiguës et des graves et la question sur fluidité/heurté ne sont pas traitées. Pour la balance générale, aucun critère objectif directement lié aux réponses sur cette questions n’a été trouvé. Pour les autres questions, le changement de questionnaire intervenu entre les différents tests a rendu l’analyse extrêmement difficile.

19. Le critère de l’amplification de la salle, **G** est préféré au critère **DirE** car le dernier fait intervenir des choix conditionnels, fortement dépendants de la direction d’émission considérée.

Etude par œuvre

Il est intéressant de revenir à une analyse *par œuvre*. Le tableau 9.37 suivant donne, pour chaque question, la direction d'émission ayant le poids le plus élevé (positif pour les questions sur la puissance, la réverbérance et le contraste, négatif sur pâteux).

question	puiss	rev	contr	pat	influence privilégiée
A : Britten_1	plafond	omni	plafond	plafond	plafond
A : Britten_2	plafond	face	omni	face	face
A : Mozart	plafond	omni	plafond	omni	plafond
A : bruckner	plafond	face	omni	plafond	plafond
B : Brahms	omni	omni	omni	omni	omni
B : Schubert	omni	omni	plafond	plafond	omni/plafond
B : Berg	omni	omni	plafond	plafond	omni/plafond
C : Falstaff_1	face	face	face	plafond	face
C : Falstaff_2	omni	omni	omni	omni	omni
C : Falstaff_3	omni	omni	omni	plafond	omni
G : Mendelssohn_1	face	face	face	face	face
G : Mendelssohn_2	face	face	omni	plafond	face
G : Mozart_1	face	face	omni	face	face
G : Mozart_2	face	omni	omni	face	omni/face
L : Beethoven	omni	omni	plafond	omni	omni
L : Schumann	omni	plafond	plafond	face	plafond
L : Martinu	omni	face	omni	plafond	omni
L : Bloch	omni	face	omni	omni	omni
M : Attila_1	omni	omni	omni	omni	omni
M : Attila_2	omni	omni	face	plafond	omni
O : Brahms_cordes	omni	face	omni	face	omni/face
P : Mozart	omni	omni	omni	omni	omni
P : Beethoven	omni	omni	plafond	face	omni
P : Dutilleux	omni	plafond	face	omni	omni
P : Rossini	omni	omni	omni	omni	omni
P : Prokofiev	omni	face	omni	omni	omni
V : Bach	plafond	omni	omni	omni	omni
V : Concerto	plafond	omni	plafond	face	plafond
V : Pastorale	plafond	omni	face	omni	omni
VIL : Mozart	face	face	omni	plafond	face
VIL : Cuivres	omni	face	omni	omni	omni
VIL : Piano	plafond	omni	omni	face	omni
VIL : Bartok	plafond	plafond	omni	omni	omni/plafond
VIL : Charpentier	omni	face	face	face	face
VIL : Intégrales	plafond	omni	plafond	omni	omni/plafond
VIL : Offrandes	omni	omni	omni	omni	omni
VIL : Stravinski	omni	face	plafond	face	face

TAB. 9.37 - Direction d'émission privilégiée pour les œuvres individuelles. Il s'agit, pour chaque question étudiée, de la direction d'émission ayant le poids le plus élevé parmi les trois directions omnidirectionnelle, face et vers le plafond. Pour une description plus complète des œuvres cf. le chapitre 4.6. Les chiffres indiquent les différentes parties d'une même œuvre. La dernière colonne rapporte la direction d'émission ayant le plus d'occurrence pour les quatre questions d'entrée.

On ne peut pas rentrer dans les détails de ce tableau. Il est néanmoins intéressant de noter que la direction d'émission privilégiée ne semble pas uniquement dépendre de l'œuvre et de son effectif instrumental, mais également des salles ou des types de salles. Par exemple, on note une forte importance de l'émission vers le plafond surtout pour les salles de concert "classiques" ayant un parterre plat, et donc souvent une mauvaise visibilité de la totalité des instruments sur la scène.

9.11 Choix d'une base de critères objectifs

Dans les paragraphes précédents traitant les questions d'entrée l'une après l'autre, on avait donné, pour chaque question, la formule du critère menant à la meilleure correspondance avec les réponses. En même temps, on avait vu que des confusions sémantiques apparaissaient sur presque toutes les questions, c.-à-d. que les sujets avaient tendance à amalgamer différentes questions, et qu'il était donc parfois difficile d'effectuer ce choix du "meilleur" critère.

Dans ce paragraphe, on procédera à une approche *globale*, en traitant toutes les questions d'entrée *ensemble*. Le modèle de réduction du nombre de questions indépendantes a montré qu'il y a (au maximum) huit aspects perceptifs *indépendants* dans les données recueillies. De plus, on avait vu que certains de ces aspects perceptifs (par exemple la puissance des aiguës et des graves, ou au moins leur indépendance) sont davantage influencés par un changement d'œuvre que par un changement de l'acoustique.

On ne peut donc pas s'attendre à faire apparaître plus de huit critères acoustiques *indépendants*, liés aux réponses aux questions. Compte tenu de l'influence de l'œuvre, un nombre plus réaliste sera de quatre à six critères acoustiques indépendants. Le but de ce paragraphe est d'effectuer un choix entre les différents "critères candidats" et de proposer une base finale des critères acoustiques :

- 1° établir la *pertinence* des différents critères "candidats". Il ne s'agit plus de prédire des réponses aux questionnaires à partir des mesures objectives, mais d'"expliquer" un critère objectif par les réponses aux questionnaires. Si une plus grande partie de la variance d'un critère est expliquée par les réponses aux questionnaires (c.-à-d. que les variations de ce critère ont été perçues), cela indique que ce critère est plus pertinent du point de vue perceptif ;
- 2° trouver la *base* de critères objectifs qui permet d'expliquer l'espace perceptif de manière optimale. On revient à l'espace issu d'une analyse multidimensionnelle sur *toutes les questions*, fournissant un espace subjectif avec des axes orthogonaux. On essaiera d'établir la meilleure base de critères objectifs correspondant à cette base subjective. A cause des corrélations entre les critères objectifs, une hiérarchie des critères objectifs doit être effectuée : tous les critères postérieurs doivent être orthogonalisés par rapport aux critères figurant plus haut dans la hiérarchie.

9.11.1 Pertinence perceptive des critères objectifs

Pour les différents critères "candidats" évoqués tout le long de ce chapitre sur la correspondance objectif/perceptif, on calcule le *pourcentage* de la variance expliquée par une régression linéaire multiple sur les variables d'entrée du modèle de réduction du nombre des questions. Différentes matrices sont considérées, surtout à cause du changement de questionnaire (questions sur la puissance des aiguës et des graves non posées à la Philharmonie de Berlin, transformation de la question sur la fluidité en défaut de heurté à La Villette) :

toutes salles : la grande matrice d'analyse, avec toutes les réponses centrées *par œuvre musicale*. A cause des changements intervenus dans le questionnaire, seulement *cinq* des variables d'entrée sont considérées : puissance sonore, réverbérance, contraste, balance générale et pâteux ;

Campagne : le sous-ensemble de salles de la campagne européenne. Six questions d'entrée sont considérées dans ce cas : les cinq mentionnées ci-dessus et la question sur la fluidité ;

CONCpl(4) : la matrice de la moyenne des réponses (sans prendre en compte l'œuvre) pour les salles de concert (Concertgebouw Amsterdam, Philharmonie de Berlin, Salle Pleyel, Musikvereinsaal Vienne). Pour la matrice **CONCpl(4)**, la régression multiple est effectuée en utilisant *quatre* des variables d'entrée : puissance sonore, réverbérance, contraste et balance générale ;

CONCpl(8) : pour la matrice **CONCpl(8)**, la régression multiple est effectuée en utilisant la totalité des *huit* variables d'entrée : puissance sonore, réverbérance, contraste, balance générale, pâteux, fluidité, puissance des aiguës et des graves. La Philharmonie de Berlin est donc *exclue* de cette analyse. Une différence entre les résultats pour les matrices **CONCpl(8)** et **CONCpl(6)** peut indiquer autant une influence particulière des questions sur la puissance des aiguës et des graves qu'une influence particulière de la salle de Berlin ;

CONCpl(6) : pour la matrice **CONCpl(6)**, la régression multiple est effectuée en utilisant la totalité des *six* variables d'entrée disponibles pour *toutes* les salles de concert : puissance sonore, réverbérance, contraste, balance générale, pâteux et fluidité.

Les performances de l'explication des variations des critères objectifs, par une somme linéaire pondérée des réponses aux variables d'entrée, sont finalement données en termes de *corrélations* entre critère objectif et prédiction, à partir des variables subjectives. Comme l'ensemble de ce chapitre est basé sur une analyse des corrélations (et tous les résultats étaient donnés en taux de corrélations), on a décidé d'indiquer les taux de corrélations afin de faciliter la comparaison avec les résultats antérieurs de ce chapitre. Dans le cas traité ici, où toutes les matrices sont considérées indépendamment, le pourcentage de la variance expliquée est le carré du taux de corrélation (ou, plus exactement, cent fois le carré du taux de corrélation).

Energie précoce

Dans le chapitre 9.1 sur l'analyse des réponses à la question sur la puissance sonore, l'hypothèse d'une séparation perceptive entre l'énergie précoce et l'énergie tardive a été avancée. Les analyses des tests en laboratoire ainsi que tous les résultats de ce chapitre corroborent cette hypothèse. On analysera donc d'abord les critères liés à l'énergie précoce, puis ceux liés à l'énergie tardive et, enfin, on comparera les résultats obtenus avec les résultats trouvés en analysant les critères liés à l'énergie totale.

En comparant les performances des critères de l'énergie du son direct objectif (**OD**[dB], l'énergie entre 0 et 20 ms), de **d**[dB] = max(**OD**[dB], **R1**[dB]) et de **DirE'** = max(**OD**[dB], **R1**[dB], **R2**[dB]), on observe que le critère **DirE'** est de loin le plus pertinent d'un point de vue perceptif :

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
OD [dB]	0.417	0.401	0.521	0.614	0.556	0.502
d [dB]	0.469	0.479	0.625	0.704	0.661	0.588
DirE'	0.502	0.534	0.734	0.783	0.739	0.658

Les taux d'explication restent également plus faibles pour les critères **DirE** (son **DIR**Etendu) et **DirEt** proposés par Jean-Pascal Jullien (dans les différentes définitions, respectivement sans et avec élongation de la plage temporelle de **R2**) :

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
DirE	0.458	0.475	0.625	0.734	0.666	0.591
DirEt	0.467	0.485	0.646	0.752	0.681	0.606

Energie tardive

En comparant les performances de **R3**[dB] (énergie arrivant entre 80 et 160 ms) et **R4**[dB] (énergie arrivant après 160 ms), on observe que la pertinence perceptive de **R3** reste faible, tandis que celle de **R4** est très élevée et celle de **R4DSATout** (pour une discussion sur la corrélation objective entre **R4** et la distance source/récepteur, menant à la définition de **R4DSATout**, cf. le chapitre 9.1) est nettement supérieure à celle de **R3**. Ce résultat confirme l'hypothèse que l'influence de l'énergie de **R3** est amoindrie par l'effet de masquage sur le début du champ tardif : l'énergie réverbérée est d'autant plus perceptible qu'elle arrive tardivement. Le pouvoir

explicatif du critère **Rev**, intégrant les phénomènes de masquage, est inférieur à celui du critère **R4**, mais supérieur à celui de **R4DSATout**. Le pouvoir explicatif est encore légèrement plus élevé pour le critère **RevR3** (cf. Annexe A), critère appliquant un masquage plus fort à l'énergie **R3** qu'à l'énergie **R4** :

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
R3 [dB]	0.385	0.398	0.578	0.641	0.592	0.519
R4 [dB]	0.493	0.502	0.703	0.763	0.714	0.635
R4DSATout [dB]	0.410	0.432	0.678	0.760	0.685	0.593
Rev	0.418	0.439	0.689	0.776	0.709	0.606
RevR3	0.453	0.468	0.698	0.774	0.714	0.621

Energie totale

Ce paragraphe a deux projets :

- 1° vérifier si les différentes optimisations effectuées dans le paragraphe sur la correspondance entre critères acoustiques et réponses à la question sur la "puissance sonore" restent pertinentes lorsque l'on considère toutes les questions d'entrée ;
- 2° comparer le pouvoir explicatif des critères liés à l'énergie totale avec celui des critères liés à l'énergie précoce et à l'énergie tardive.

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
G	0.494	0.502	0.710	0.720	0.713	0.627
GDirERev	0.490	0.502	0.708	0.723	0.714	0.627
GDirEtRev	0.493	0.505	0.719	0.736	0.725	0.636
GDirE'Rev	0.521	0.539	0.778	0.776	0.780	0.679
GDirE'R80	0.521	0.530	0.754	0.754	0.757	0.663
DirE [dB] + Rev [dB]	0.524	0.533	0.733	0.748	0.734	0.654
DirEt [dB] + Rev [dB]	0.525	0.533	0.742	0.762	0.745	0.661
DirE' [dB] + Rev [dB]	0.538	0.549	0.784	0.790	0.789	0.690
DirE' [dB] + R80 [dB]	0.533	0.546	0.784	0.777	0.785	0.685
1.5*DirE'+Rev = PUISS	0.541	0.558	0.796	0.792	0.798	0.697

Premièrement, en étudiant le tableau précédent, on s'aperçoit que toutes les optimisations restent pertinentes :

- la définition du critère **DirE'**, l'énergie du son direct perçue ;
- l'intégration des phénomènes de masquage de l'énergie du champ réverbéré par l'énergie du son direct ;
- la sommation des deux contributions énergétiques de l'énergie précoce et de l'énergie tardive en *valeurs de sensation perceptive* plutôt qu'en énergie ;
- le pouvoir explicatif le plus élevé apparaît pour le critère **PUISS** = 1,5 * **DirE'** + **Rev**, le critère lié à la perception de la puissance sonore.

Deuxièmement, on s'aperçoit que le pouvoir explicatif du critère optimisé **PUISS** est supérieur à celui des critères de l'énergie précoce et l'énergie tardive. Mais l'augmentation reste relativement faible et s'explique par les faits que :

- 1° la somme pondérée et optimisée de deux critères a toutes les chances d'avoir un meilleur pouvoir explicatif que les deux contributions isolées ;

2° dans le questionnaire, aucune question spécifique n'a été posée sur l'énergie précoce ni l'énergie tardive. La question sur la puissance sonore étant une des questions d'entrée du modèle de réduction du nombre de variables, il n'est pas surprenant de voir apparaître le meilleur pouvoir d'explication pour un critère directement lié à cette question.

La faiblesse de l'augmentation du pouvoir explicatif corrobore l'hypothèse que l'énergie précoce et l'énergie tardive de la réponse de la salle sont perçues *de manière indépendante*.

9.11.2 Réverbération, rapports énergétiques énergie précoce/énergie tardive

On donne ci-après les performances de quelques critères du groupe de réverbération et du groupe de clarté:

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
TR(MF)	0.120	0.216	0.671	0.759	0.680	0.489
EDT20(MF)	0.158	0.180	0.680	0.776	0.697	0.498
EDT15(MF)	0.161	0.176	0.677	0.779	0.697	0.498
EDT10(MF)	0.163	0.173	0.667	0.780	0.693	0.495
EDT5(MF)	0.165	0.172	0.630	0.776	0.670	0.482
EDT380(MF)	0.190	0.197	0.678	0.783	0.700	0.509
EDT280(MF)	0.191	0.196	0.669	0.782	0.695	0.507
EDT230(MF)	0.191	0.197	0.662	0.781	0.691	0.504
tr160(MF)	0.192	0.201	0.647	0.777	0.680	0.499
TR(2kHz)	0.096	0.118	0.769	0.866	0.793	0.528
EDT20(2kHz)	0.175	0.171	0.784	0.881	0.807	0.564
EDT15(2kHz)	0.179	0.182	0.780	0.882	0.804	0.566
EDT10(2kHz)	0.182	0.192	0.768	0.880	0.792	0.563
EDT5(2kHz)	0.183	0.199	0.724	0.866	0.748	0.544
EDT380(2kHz)	0.199	0.200	0.783	0.888	0.807	0.576
EDT280(2kHz)	0.201	0.213	0.775	0.886	0.800	0.575
EDT230(2kHz)	0.203	0.221	0.768	0.884	0.793	0.574
tr160(2kHz)	0.206	0.236	0.751	0.876	0.779	0.570
C80(MF)	0.193	0.166	0.581	0.781	0.650	0.474
DirE'/Rev (MF)	0.249	0.175	0.547	0.756	0.586	0.462
ts(MF)	0.236	0.201	0.651	0.788	0.684	0.512
C80(2kHz)	0.193	0.169	0.643	0.825	0.713	0.509
DirE'/Rev (2kHz)	0.233	0.177	0.698	0.850	0.729	0.537
ts(2kHz)	0.243	0.212	0.767	0.881	0.794	0.580

En étudiant les performances pour les matrices **toutes salles** et **Campagne**, on remarque que les taux de corrélation restent toujours faibles et on conclura:

Pour les données étudiées dans cette thèse, la pertinence des critères de clarté et de réverbération habituellement utilisés, et mesurés avec une source omnidirectionnelle située au milieu de la scène, reste très faible lorsque l'on considère les changements de place à l'intérieur d'une salle.

Deux éléments principaux contribuent à ce résultat, mais il est difficile d'évaluer leur importance respective:

directivité de l'orchestre : pour chaque œuvre musicale et son effectif orchestral, la directivité moyenne de l'ensemble ainsi qu'une sorte de directivité perceptive (due à l'importance donnée dans l'œuvre à quelques instruments très directifs), change, et d'autres directions

d'émission et zones d'écoutes dans la salle s'en trouvent privilégiées (effet de l'interaction acoustique/œuvre). Il est évident que, lorsque l'on considère un changement de la directivité de la source, les valeurs des critères de clarté (par exemple **C80**), mais également des critères de réverbération (calculés comme proposé dans ce document ou par D. Griensinger) vont changer. Le paragraphe 9.10 montrait l'augmentation significative des taux de corrélation pour la question sur la réverbérance, lorsque l'on considère une directivité optimisée pour chaque œuvre musicale ;

occupation de la salle : les mesures objectives étaient effectuées salle vide, tandis que les tests d'écoute avaient lieu lors de concerts publiques, donc salle pleine.²⁰ Le changement d'occupation provoque deux effets : premièrement, la différence entre les valeurs des critères salle vide et salle occupée dépend de la situation de la place à l'intérieur d'une salle (cet effet affecte les matrices **toutes salles** et **Campagne**) ; deuxièmement, due à la différence d'absorption acoustique des sièges *vides* dans les différentes salles, la différence entre salle vide et salle pleine dépend de la salle (cet effet affecte les matrices **CONCpl**). Ce deuxième effet se remarque très clairement dans les différences de performance entre les matrices **CONCpl(6)** et **CONCpl(8)** — la deuxième exclut la Philharmonie de Berlin, où l'absorption des sièges vides est très proche de l'absorption du public : la pertinence des critères **ts(2kHz)** et **EDT15(2kHz)** est nettement supérieure lorsqu'on exclut la salle de Berlin de l'analyse (le taux de corrélation avec six variables d'entrée, correspondant à la matrice **CONCpl(6)**, mais en excluant les places à la Philharmonie de Berlin est de $r = 0.830$ pour le critère de temps central, **ts(2kHz)**, et de $r = 0.869$ pour le critère **EDT15(2kHz)**).

Il en résulte une interrogation concernant la pertinence des critères de **ts(2kHz)** et de **EDT15(2kHz)** : ces critères, sont ils pertinents en eux-mêmes, ou sont-ils, au contraire, pertinents parce qu'ils mesurent — salle vide — un effet qui apparaît salle pleine et qui est très pertinent perceptivement ? En effectuant une analyse uniquement sur la Philharmonie de Berlin et la Salle Pleyel — deux salles pour lesquelles l'influence du public est moins forte à cause des caractéristiques absorbantes des sièges vides —, les pouvoirs explicatifs des critères sont sensiblement identiques pour la bande fréquentielle des fréquences moyennes et la bande d'octave autour de 2 kHz.

Rapports énergétiques entre les différentes contributions énergétiques de l'énergie précoce

On commence en étudiant la pertinence des contributions énergétiques **R1**, **R2**, **d1**, **ddd1** et **ddd2**, en dB, en valeurs absolues :

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
R1 [dB]	0.204	0.239	0.330	0.623	0.443	0.368
R2 [dB]	0.303	0.335	0.563	0.778	0.583	0.513
d1 [dB]	0.165	0.253	0.332	0.631	0.499	0.376
ddd1 [dB]	0.160	0.210	0.314	0.606	0.465	0.351
ddd2 [dB]	0.377	0.390	0.583	0.730	0.657	0.548

On observe que la pertinence des critères **R1**, **d1** et **ddd1** en tant que tels est très faible et l'on peut en conclure que ces critères ne sont pas perçus en tant que tels. La bonne performance de **R2** et de **ddd2** est due à une corrélation résiduelle avec la force sonore **G**.

20. Pour tous les concerts pendant lesquels des tests d'écoute ont eu lieu, les salles étaient soit totalement, soit quasiment pleines. Il ne restait jamais plus de quelques places libres.

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
OD/R1 [dB]	0.320	0.295	0.429	0.583	0.461	0.418
d/d1 [dB]	0.385	0.430	0.524	0.717	0.630	0.537
DirE'/ddd1 [dB]	0.427	0.440	0.596	0.737	0.657	0.571
DirE'/ddd2 [dB]	0.348	0.357	0.522	0.753	0.590	0.514
DirE'/(ddd1+ddd2) [dB]	0.403	0.408	0.561	0.780	0.631	0.557

La pertinence des *rapports* entre les différentes contribution énergétique est nettement plus élevée. Les taux de corrélation sont supérieurs si l'on considère l'énergie du son direct perçue, confirmant le résultat qui indique que l'énergie perçue du son direct n'est pas identique à l'énergie du son direct objectif. Le choix entre les critères **d** et **DirE'**, pour mesurer l'énergie perçue du son direct, est plus délicat, mais la pertinence semble optimale en considérant le critère **DirE'**, soit par rapport à **ddd1**, le minimum des contributions énergétiques, soit par rapport à la somme des deux autres contributions énergétiques (la somme étant exprimée en dB).

Critères fréquentiels

Pour ces critères, la méthode atteint ses limites, car le pouvoir explicatif est *fortement* influencé par des corrélations résiduelles avec les critères discutés ci-dessus et liés aux questions sur la puissance sonore, la réverbérance et le contraste. Afin d'étudier la pertinence des critères fréquentiels, on doit impérativement les orthogonaliser par rapport aux critères discutés ci-dessus. Ces critères seront donc discuté dans le prochain paragraphe, où l'on cherchera une base objective.

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
delGHF	0.238	0.259	0.553	0.650	0.575	0.455
delGBF	0.180	0.199	0.327	0.625	0.413	0.349
delPUISSHf	0.149	0.188	0.522	0.588	0.547	0.399
delPUISSBF	0.138	0.179	0.430	0.613	0.453	0.362
delDirEHF	0.172	0.203	0.341	0.585	0.411	0.342
delDirEBF	0.132	0.138	0.208	0.544	0.489	0.302

Orthogonalisé par rapport à **G(MF)** :

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
delGHF	0.223	0.250	0.555	0.650	0.578	0.451
delGBF	0.170	0.193	0.332	0.634	0.417	0.349
delPUISSHf	0.152	0.191	0.541	0.597	0.567	0.410
delPUISSBF	0.139	0.181	0.434	0.617	0.456	0.365
delDirAMSHf	0.161	0.194	0.322	0.551	0.398	0.325
delDirAMSBF	0.153	0.153	0.214	0.552	0.502	0.315

TR:

<i>cor</i>	toutes salles	Campagne	CONCpl(4)	CONCpl(8)	CONCpl(6)	\overline{cor}
delTRHF	0.191	0.222	0.426	0.479	0.433	0.350
delEDT15HF	0.190	0.240	0.349	0.444	0.353	0.315
delEDT10HF	0.186	0.231	0.314	0.439	0.323	0.299
delC80HF	0.035	0.056	0.209	0.277	0.220	0.159
deltshf	0.135	0.175	0.283	0.386	0.298	0.256
delTRBF	0.256	0.319	0.682	0.834	0.703	0.559
delEDT15BF	0.156	0.189	0.662	0.790	0.688	0.497
delEDT10BF	0.142	0.208	0.623	0.758	0.653	0.477
delC80BF	0.133	0.126	0.324	0.688	0.521	0.358
deltshf	0.169	0.178	0.571	0.751	0.633	0.460

9.11.3 Choix d'une base

Dans le dernier paragraphe, la pertinence des critères **DirE'** et **Rev** a déjà pu être prouvée. Par contre, surtout pour les critères **CONTR** et **PAT**, la question persiste de savoir si les critères sont pertinents en tant que tels ou s'il faut plutôt considérer les différentes influences sur ces critères *individuellement* : pour le critère **CONTR**, la force sonore des fréquences aiguës et les rapports énergétiques entre **DirE'** et la somme de **ddd1** et **ddd2** ainsi qu'entre **R4** et **R3** ; pour le critère de **PAT**, les pentes fréquentielles de l'énergie précoce et de l'énergie tardive.

On utilisera l'ACP sur la matrice **toutes salles**, en utilisant *toutes* les questions qui ont été posées de manière identique dans tous les tests. On étudiera les corrélations avec les *six* premiers axes de l'ACP.

On choisira comme base de départ les critères **DirE'**, **Rev**, **ts2k**, **CONTR** et **PAT**. Tous les critères postérieurs doivent être orthogonalisés par rapport aux critères antérieurs afin de former une base au sens mathématique.

CONTR

L'influence des différentes contributions influençant le critère **CONTR** a été étudiée en gardant les autres critères constant. Le tableau 9.38 indique que, sauf pour le troisième axe, les corrélations cumulées sur tous les critères sont supérieures en utilisant les critères $DirE'_{lin}/ddd1_{lin}$ ou $DirE'_{lin}/(ddd1_{lin} + ddd2_{lin})$ au lieu de **CONTR**. Un de ces rapports énergétiques doit être gardé dans la base des critères objectifs.

<i>cor, cumulée</i>	axe1	axe2	axe3	axe4	axe5	axe6
DirE', Rev, ts2k, PAT	0.369	0.200	0.341	0.089	0.161	0.123
plus CONTR	0.408	0.201	0.433	0.089	0.161	0.163
plus $DirE'_{lin}/ddd1_{lin}$	0.451	0.264	0.437	0.171	0.191	0.182
plus $DirE'_{lin}/(ddd1_{lin} + ddd2_{lin})$	0.445	0.240	0.415	0.160	0.163	0.143
plus R4/R3	0.385	0.213	0.379	0.090	0.166	0.133
plus G_{HF}	0.386	0.221	0.358	0.124	0.159	0.120
toutes influences	0.447	0.255	0.440	0.166	0.172	0.151

TAB. 9.38 - Taux de corrélation avec les six premiers axes de l'ACP sur toutes les questions posées de manière identique dans toutes les salles. Les noms de chaque ligne indiquent les critères ayant été ajoutés aux quatre critères de départ.

Critères fréquentiels

Pour les effets d'un déséquilibre fréquentiel de la réponse impulsionnelle, le choix s'avère extrêmement difficile. Le tableau 9.39 montre, d'une part, que le critère de **PAT** n'augmente que faiblement les taux de corrélation avec les différents axes de l'ACP. Par contre, le choix entre les pentes des critères de **G**, **DirE**, **Rev**, **TR** et **EDT** s'avère difficile: les différents critères influencent d'autres axes de l'ACP, parfois de manière significative. Les pentes sur les énergies précoce et tardive semblent être plus significatives que les pentes sur l'énergie globale. Les critères de **PGRAV** et **PAIG** montrent des performances ni meilleurs ni moins bonnes que les critères de pentes fréquentielles.

9.12 Les "autres" questions

Dans ce sous-chapitre, on se limitera à donner, pour chaque question, le tableau des seuils théoriques et le tableau des coefficients du modèle de réduction du nombre des questions. Pour certaines questions, les coefficients du modèle seront également discutés. On aurait pu être tenté d'optimiser, pour chaque question, la correspondance objectif/perceptif — mais, ayant

<i>cor</i> cumulée	axe1	axe2	axe3	axe4	axe5	axe6
DirE', Rev, ts2k, CONTR	0.401	0.200	0.417	0.047	0.153	0.159
plus PAT	0.408	0.201	0.433	0.089	0.161	0.163
plus G_{BF}	0.413	0.210	0.423	0.058	0.156	0.162
plus PGRAV	0.430	0.210	0.436	0.127	0.154	0.176
plus $DirE_{BF}$	0.401	0.200	0.426	0.049	0.181	0.160
plus Rev_{BF}	0.420	0.217	0.417	0.203	0.153	0.234
plus TR_{BF}	0.402	0.276	0.425	0.050	0.154	0.165
plus EDT_{BF}	0.437	0.201	0.427	0.048	0.156	0.178
plus G_{HF}	0.410	0.211	0.431	0.059	0.153	0.163
plus PAIG	0.407	0.206	0.417	0.060	0.161	0.182
plus $DirE_{HF}$	0.434	0.208	0.423	0.075	0.158	0.167
plus Rev_{HF}	0.436	0.203	0.444	0.060	0.164	0.159
plus TR_{HF}	0.418	0.200	0.512	0.047	0.159	0.177
plus EDT_{HF}	0.413	0.213	0.491	0.050	0.157	0.159

TAB. 9.39 - Taux de corrélation avec les six premiers axes de l'ACP sur toutes les questions posées de manière identique dans toutes les salles. Les noms de lignes indiquent les critères ayant été ajoutés aux quatre critères de départ.

déjà prouvé que ces questions ne sont pas indépendantes des questions d'entrée, nous n'irons pas chercher d'information supplémentaire là où nous venons de prouver qu'il n'y en a pas.

Dynamique

dyn	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.87	0.90	0.61	0.91	0.97	0.85
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.69	0.73	0.00	0.75	0.92	0.62

dyn	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.43	0.10	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.20

On constate surtout le fort coefficient de — et donc la proximité par rapport à — la question sur la puissance sonore. L'influence positive de la réverbérance indique qu'un champ très tardif important peut augmenter la perception de la dynamique. Le coefficient élevé de la balance générale indique l'importance d'être dans l'axe privilégié du rayonnement des instruments.

Dimension subjective

dim sub	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.81	0.86	0.20	0.88	0.93	0.74
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.58	0.62	0.00	0.69	0.83	0.54

dim sub	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2

La question sur la dimension subjective de la salle est très fortement liée à la question sur la réverbérance. Le coefficient positif de la puissance des aiguës souligne encore l'importance de la confusion perceptive entre la réverbérance et la réverbérance des fréquences aiguës.

Enveloppement sonore

env son	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.67	0.73	0.00	0.67	0.89	0.59
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.68	0.73	0.00	0.66	0.89	0.59

env son	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.20	0.15	0.00	0.20	0.10	-0.20	0.00	0.00

Les poids élevés des questions sur la puissance et la réverbérance montrent que la question sur l'enveloppement sonore est fortement liée à l'énergie de la réponse impulsionnelle, surtout à l'énergie tardive. Une étude sur la correspondance avec les critères objectifs menait à de meilleurs taux de corrélation pour le critère de **R4**, l'énergie arrivant après 160 ms. Ce critère intègre encore la corrélation avec la proximité par rapport aux sources, et donc avec le niveau global. De fortes corrélations ont également été constatées avec les critères de **EDT** et **TR**, confirmant les résultats récents dans [BS95] à ce propos. Par contre, aucune influence de la *direction d'arrivée* de cette énergie très tardive n'a été trouvée.

D'ailleurs, on constate un rapprochement entre la perception de l'enveloppement sonore et la perception de la puissance des graves.

Intimité

int	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.71	0.74	0.42	0.70	0.92	0.70
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.65	0.70	0.12	0.64	0.91	0.60

int	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.10	0.00	0.00	0.20	0.20	-0.49	-0.55	0.15

Les coefficients du modèle de réduction démontrent la complexité sémantique de cette question. D'une part, on constate une influence de la notion d'intimité physique et visuelle : bonne perception du contraste, absence de heurté et de pâteux. D'autre part, un lien avec la réponse spectrale, ou au moins avec la perception de la réponse spectrale, apparaît dans les coefficients des questions sur la puissance des graves et sur pâteux. Le coefficient de la question sur la réverbérance est nul.

Chaleur

chal	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.67	0.73	0.00	0.72	0.93	0.61
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.64	0.70	0.00	0.69	0.93	0.59

chal	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.20	0.12	0.00	0.50	0.00	-0.60	-0.55	0.00

Les réponses à la question sur la chaleur sont fortement influencées par la perception de la puissance sonore, surtout des fréquences graves. Une forte réverbérance augmente la perception de la chaleur.

Vivacité

vie	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.86	0.93	0.00	0.94	0.98	0.74
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.59	0.66	0.00	0.70	0.90	0.57

vie	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.17	0.20	0.13	0.14	0.00	0.00	-0.20	0.15

Le fort coefficient de la question sur la réverbérance confirme le lien entre la perception de la vivacité et la perception de la réverbérance. En ce qui concerne le spectre, les réponses à la question sur la vivacité sont influencées autant par la perception de la puissance des aiguës que celle de la puissance des graves.

Brillance

brill	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.63	0.69	0.00	0.71	0.87	0.58
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.64	0.71	0.00	0.73	0.87	0.59

brill	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.24	0.16	0.31	-0.26	0.30	0.00	-0.35	0.00

Les réponses à la question sur la brillance sont fortement liées au niveau sonore. Le lien privilégié avec la perception des fréquences aiguës apparaît très clairement : coefficient fortement positif de la question sur la puissance des aiguës, coefficient fortement négatif de celle sur la puissance des graves. Ces résultats indiquent, comme cela a été évoqué dans le chapitre 3.4.6, qu’un manque de niveau dans les fréquences graves peut conduire à des effets similaires qu’un excès de niveau dans les fréquences aiguës.

Lourdeur

lourd	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.22	0.43	0.00	0.67	0.75	0.42
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.65	0.71	0.00	0.82	0.86	0.61

lourd	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.00	-0.04	0.00	0.11	-0.08	0.00	0.42	-0.04

La question sur la lourdeur est liée à la question sur pâteux.

Acide

ac	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.71	0.84	0.29	0.90	0.95	0.74
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.52	0.64	0.00	0.80	0.90	0.57

ac	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.00	0.00	0.28	-0.28	-0.08	0.00	-0.14	-0.11

Les coefficients des questions sur la puissance des aiguës et des graves indiquent qu’il s’agit de la perception d’un déséquilibre de la réponse spectrale. D’ailleurs, les réponses à la question sur acide sont “opposées” aux réponses à la question sur pâteux ; le lien entre la question pâteux et un déséquilibre fréquentiel de la réponse de la salle a été constaté dans le chapitre 9.8.

Agressivité

agr	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.79	0.89	0.17	0.91	0.93	0.74
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.42	0.63	0.00	0.73	0.79	0.51

agr	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.20	0.00	0.00	-0.10	-0.10	0.16	0.00	0.00

La variabilité des réponses à la question sur l’agressivité a été très faible, comme l’indique surtout la faiblesse des coefficients dans le modèle de réduction. D’autre part, les seuils théoriques indiquent que l’influence de l’effet de l’interaction acoustique/œuvre était assez élevé sur cette question. On constate qu’un risque de heurté augmente le risque d’un son agressif. Sinon, il s’agit des influences d’un manque de contraste et de perception de la puissance des graves.

Dureté

dur	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.90	1.00	0.48	1.00	1.00	0.88
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.54	0.68	0.00	0.80	0.85	0.57

dur	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.12	-0.03	-0.10	-0.10	0.00	0.13	0.00	0.00

On constate surtout les deux influences suivantes sur la question sur la dureté : d'une part, du lien avec le défaut de heurté et, d'autre part, du couple opposé, puissance sonore et réverbérance. Quand une très forte puissance sonore n'est pas accompagnée d'un champ tardif suffisamment audible, cette combinaison peut mener à un son exagérément dur.

Distance subjective

Comme cette question n'a pas été posée lors des tests d'écoute à La Villette, elle n'a pas été incluse dans le modèle de réduction.

Les analyses de correspondances ont démontré que la meilleure corrélation apparaît, de manière cohérente, pour le critère de la *distance objective* par rapport aux sources, mesurée par le temps d'arrivée de l'onde directe.

Deux éléments permettent d'expliquer ce résultat :

l'interaction vision/audition : comme les sujets peuvent *voir*, et donc évaluer, la distance réelle par rapport aux sources, il est probable que cette évaluation visuelle influencera leurs jugements auditifs ;

processus de la localisation : la localisation des sources sonores, et donc également l'évaluation de la distance, est un des buts primordiaux du système auditif. L'importance de la tâche laisse supposer que le système auditif utilise *tous* les indices acoustiques accessibles pour arriver au jugement le plus cohérent et le plus probable possible. La perception de la distance auditive ne peut donc pas être ramenée à *un seul* critère acoustique.

Présence

pres	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.12	0.00	0.68	0.36	0.59	0.70	0.00	0.00

Pour la question sur la présence, un changement d'échelle est intervenu entre les tests dans les salles européennes et les tests à La Villette. Les seuils théoriques ne sont pas accessibles pour cette question.

Le changement d'échelle a été intégré dans le modèle de réduction. Comme il ne s'agit que d'un agrandissement de l'échelle proposée, seules les valeurs *absolues* des coefficients sont affectées.

Les coefficients du modèle de réduction sont néanmoins difficiles à interpréter. On remarque surtout un lien avec les réponses à la question sur le contraste, mais également avec les réponses à la question sur la puissance, surtout celle des fréquences aiguës et graves.

Précision d'écoute

prec d'ec	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.85	0.88	0.58	0.90	0.95	0.83
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.74	0.78	0.31	0.83	0.92	0.72

prec d'ec	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.30	-0.10	0.00	-0.50	0.27	-0.30	-0.47	0.31

On remarque particulièrement les coefficients très élevés des questions sur la puissance et sur le contraste. Les réponses à la question sur la précision sont surtout liées à l'énergie *précoce* de la réponse de la salle, comme l'indique le coefficient négatif de la question sur la réverbérance. D'ailleurs, il est intéressant de noter l'influence *négative* de la perception de la puissance des graves.

En étudiant, pour la question sur la précision d'écoute, la correspondance objectif/peceptif, on observe que les réponses à cette question sont très fortement corrélées avec les critères objectifs de **DirE'** et surtout de **CONTR**.

Réverbérance des graves

rgrav	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.86	0.92	0.58	0.92	0.97	0.85

rgrav	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.00	0.15	0.00	0.52	-0.20	0.00	0.20	0.00

Les réponses à la question sur la réverbérance des graves sont liées, d'une part, aux réponses à la question sur la réverbérance et, d'autre part, aux réponses à la question sur la puissance des graves. On constate donc l'influence de l'énergie du champ tardif perçue ainsi que l'influence du déséquilibre spectral perçu.

Les coefficients indiquent des influences supplémentaires, dues à un manque de contraste et au défaut de pâteux.

Réverbérance des aiguës

raig	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.85	0.92	0.00	0.92	0.98	0.73

raig	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	-0.12	0.28	0.26	-0.07	0.24	0.00	0.27	0.00

Les réponses à la question sur la réverbérance des aiguës sont liées, d'une part, aux réponses à la question sur la réverbérance et, d'autre part, aux réponses à la question sur la puissance des aiguës et des graves. On constate donc l'influence de l'énergie du champ tardif perçue ainsi que l'influence du déséquilibre spectral perçu.

Les coefficients indiquent des influences supplémentaires, dues à un excès de contraste et au défaut de pâteux.

Impression générale (préférence subjective)

IMGAL	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	CONCplaces	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.89	0.91	0.61	0.92	0.97	0.86
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.75	0.79	0.00	0.81	0.94	0.66

IMGAL	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.16	0.08	0.00	0.23	0.33	-0.30	-0.11	0.43

En étudiant les coefficients du modèle de réduction du nombre des questions d'entrée, on constate que les coefficients sont *négatifs* pour les défauts et *positifs* pour toutes les autres questions d'entrée (à l'exception du coefficient nul pour la question sur la puissance des aiguës). On conclura donc que la préférence subjective est influencée par *la totalité* des questions indépendantes.

D'ailleurs, en comparant les coefficients du modèle de réduction pour les questions sur la précision d'écoute et sur la préférence subjective, on remarque des différences importantes. Il

est donc impossible d'optimiser la préférence subjective en seulement optimisant l'aspect de la précision d'écoute.

La qualité excellente d'une salle ne peut donc être garantie qu'en assurant une valeur adaptée sur tous les facteurs perceptifs structurant notre perception de la qualité acoustique d'une salle. On reviendra sur ce point dans le chapitre de conclusion de ce document.

La préférence subjective ne peut donc pas être liée à un seul aspect objectif, il est nécessaire, au contraire, de lier les réponses sur cette question à tous les différents aspects objectifs.

Adaptation de l'œuvre musicale à la salle

adaptation	toutes salles	Campagne	Villette	salles concert	moy concert	\overline{cor}
\mathcal{R}	0.97	0.98	0.84	0.98	0.99	0.95
$\mathcal{R} + \mathcal{I}(i_{m,k})$	0.75	0.77	0.42	0.76	0.89	0.72

adaptation	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
coefs réduits et optimisés	0.00	0.10	0.38	0.27	0.00	0.00	-0.39	0.55

Les réponses à la question sur l'adaptation de l'œuvre musicale à la salle (et aux questions sur l'interprétation et l'appréciation de l'œuvre musicale, posées lors de la campagne européenne et à la question sur l'appréciation de la performance musicale, posée lors des tests à La Villette), sont liées à la question concernant la préférence subjective. Les coefficients du modèle de réduction sur les deux questions (à l'exception de l'échange entre la question sur la puissance et celle sur la puissance des aiguës) sont proches.

Les questions ont d'abord été posées en tant que questions de "contrôle". Les taux de corrélations entre les réponses à ces questions et les réponses aux autres questions du questionnaire restent relativement faibles, indiquant une indépendance partielle de ces questions.

On avait vu, lors de la discussion des tests d'écoute à La Villette, qu'un changement de chef d'orchestre peut produire des variations significatives dans les réponses. On imagine alors aisément combien la qualité acoustique peut influencer les impressions sur l'appréciation et l'interprétation de l'œuvre musicale. Les corrélations entre la question sur la préférence subjective à propos de l'acoustique de la salle et les questions sur l'appréciation ne contredisent pas les analyses présentées dans ce document, il démontrent plutôt la réelle influence de la qualité acoustique sur l'appréciation de la performance musicale.

Chapitre 10

Modèle mixte de l'influence de l'acoustique et de l'œuvre

10.1 Introduction

Pendant la campagne européenne, les mesures objectives des salles étaient effectuées en utilisant une source acoustique (haut-parleur) de puissance constante. Par contre, lors des tests d'écoute, le nombre de musiciens sur scène — donc la puissance de la source acoustique — était variable. Cette différence est particulièrement importante lorsque l'on considère, d'un côté, les grandes salles de concerts (avec comme effectif un grand orchestre symphonique d'environ 100 musiciens) et, de l'autre, les salles de musique de chambre (“auditoriums”, avec des effectifs de 2 jusqu'à 20 musiciens). Pour étudier les liaisons entre la perception et les mesures objectives dans les salles, il faut tenir compte de cette variabilité de la puissance acoustique de l'effectif musical écouté dans les tests d'écoute subjectifs.

Suffit-il d'effectuer une correction globale pour les auditoriums par rapport aux salles de concerts? Ou faut-il, au contraire, introduire des corrections plus fines, en tenant compte de la puissance acoustique de chaque effectif orchestral sur scène? Pendant les tests d'écoute, à l'intérieur d'une même salle, des œuvres ayant des formations de tailles très différentes ont été écoutées (concerto pour piano de Mozart et symphonie de Bruckner, à Amsterdam; *Rosamunde* de Schubert et les pièces pour orchestre de Berg, à Berlin). Dans ce chapitre, on montrera qu'il faut, même à l'intérieur d'une salle, tenir compte des différentes puissances sonores de la source, ce que multiplie les “salles” écoutées.

La variabilité de la puissance acoustique est due à l'effectif orchestral déployé sur scène ainsi qu'à la manière dont cet effectif est utilisé dans l'œuvre musicale. L'influence du deuxième facteur est très difficilement mesurable, et seule l'influence de l'effectif orchestral est prise en compte. Dans la littérature, on peut trouver des mesures de la puissance, ainsi que de la directivité des instruments d'orchestre [Rei68, Ahn84, Mey72, Mey90, Mey93]. Les effectifs orchestraux étaient en partie notés lors des tests d'écoute, sinon, les partitions étaient consultées. La puissance totale de l'orchestre est calculée par addition linéaire des puissances des instruments individuels, ce qui revient à considérer qu'ils jouent tous en même temps. Il s'avère que cette approximation, certes grossière, suffit à améliorer nettement la correspondance objectif/perceptif.

10.2 La puissance des instruments d'orchestre

La première étape consiste à calculer les forces sonores des différents effectifs orchestraux. Meyer [Mey72, Mey90, Mey93] rapporte des mesures de dynamique, c'est-à-dire du niveau le plus bas (*pianissimo*) et du niveau le plus élevé (*fortissimo*), de la plupart des instruments d'orchestre, effectuées par lui-même ainsi que par d'autres chercheurs. Ces niveaux sont, pour

chaque instrument, une fonction de la tessiture (hauteur de note). Pour ne retenir qu'un seul chiffre par instrument, on prendra les valeurs d'un "bon forte" d'une tessiture "standard" de l'instrument, comme proposé par Meyer — en essayant d'éliminer les contradictions entre les mesures des différents chercheurs. Il en résulte les valeurs du tableau suivant :¹

instrument	vl	va	vc	cb	fl	hb	cl	fg	cor	tromp	tromb	tuba	timb
puissance (dB)	89	87	90	92	94	94	94	94	99	101	101	101	100

TAB. 10.1 - Puissance acoustique de différents instruments d'orchestre

Des mesures comparables n'existent ni pour le piano, ni pour certains instruments de percussion ni pour les chanteurs.² Faute de mesures,³ des arguments de comparaison sont donnés pour ces instruments : certains instruments de percussion (cymbales, grand tambour, marteau) approchent, s'ils ne dépassent pas, la puissance d'une timbale, mais ils sont utilisés bien moins souvent. Il paraît donc approprié d'utiliser une puissance comparable ou légèrement inférieure à celle d'une timbale.

Le cas du piano est plus difficile, et il convient d'ajouter que, du piano droit (ou piano accompagnateur à couvercle fermé ou semi-fermé) à un Steinway de concert, cet instrument peut couvrir une plage de forces assez étendue. Pour un piano de concert, on observe, par exemple dans un concerto pour piano et orchestre de Beethoven, un certain équilibre s'établir entre le piano et l'orchestre : si le piano est au moins aussi fort que la section des cordes, il est dépassé par la puissance totale de l'orchestre avec vents et cuivres. La section des cordes d'un orchestre de chambre de taille moyenne (6/5/4/3/2) émet une puissance de 102 dB.

10.2.1 Musique de chambre

Pour la musique de chambre, on fait les considérations suivantes : un piano à couvercle semi-fermé émet une puissance plus faible de 3 dB par rapport à un piano de concert. Cette réduction peut, dans le cas d'un piano accompagnant un instrument de puissance faible (souvent à couvercle totalement fermé), atteindre 6 à 9 dB. Par ailleurs, un instrumentiste soliste peut parfois, par exemple dans les passages forte ou fortissimo, jouer plus fort qu'un instrumentiste d'orchestre. Mais, pour ces analyses, il a été décidé de ne pas changer les puissances acoustiques pour les instrumentistes solistes.

10.2.2 Chanteurs et chœurs

En utilisant le même raisonnement pour un chanteur, on arrive à une puissance de 99 dB, en se souvenant que, comme pour le piano, des différences persistent entre un chanteur dans un opéra de Rossini et dans un opéra de Wagner. Par ailleurs, pour le calcul de la puissance totale, il ne faut pas considérer le nombre total des solistes, mais plutôt le plus grand nombre de chanteurs chantant ensemble au cours de l'œuvre.

Un chanteur choriste chantera en général moins fort qu'un chanteur soliste. Mais, beaucoup plus que pour les instrumentistes d'orchestre, le niveau sonore d'un chanteur dépendra aussi de sa qualité : un chanteur professionnel chantera nettement plus fort qu'un chanteur amateur. On comparera les différents hypothèses suivantes :

- en apportant une diminution de 3 ou de 6 dB par rapport à un chanteur soliste, la puissance d'un chanteur choriste est de 96 ou de 93 dB respectivement ;

1. Puissance émise L_w pour un "forte moyen" re. 10^{-12} W.

2. Des mesures de la *directivité* des chanteurs ont été publiées ([MM85]), mais aucune valeur absolue n'a été donnée.

3. Des mesures de puissance acoustique du piano sont actuellement en cours à l'Ircam, effectuées par René Caussé et Philippe Derogis.

- pour des œuvres avec un quatuor de solistes et un chœur on observe qu'un équilibre s'établit entre les quatre solistes et un petit chœur de 16 chanteurs (4 par voix). Cette considération mène à une diminution de 6 dB par rapport à un chanteur soliste et une puissance de 93 dB pour un chanteur choriste;
- en comparant avec un grand orchestre symphonique. On prendra comme exemple la 9^{ème} symphonie de Beethoven et la deuxième symphonie de Mahler, deux œuvres où, par la composition même, la puissance des chœurs est censée être au moins égale à celle de l'orchestre. Pour la symphonie de Beethoven, avec un bon chœur, cet équilibre s'établit avec environ 60 à 80 chanteurs. La force sonore de l'orchestre (semblable à la symphonie *Pastorale*) est de 113 dB. Pour la symphonie de Mahler (puissance orchestrale de 115 dB), le nombre nécessaire de chanteurs est certainement supérieur à 100 et devrait atteindre 150 (cette symphonie, surtout lorsqu'il s'agit de chœurs amateurs, est souvent montée avec un chœur de plusieurs centaines de chanteurs). En considérant les exponentielles de 2, on dira alors que 128 chanteurs ont une puissance de 115 dB, et 64 de 112 dB, et qu'un chanteur a une puissance de 93 dB, c.-à-d. une diminution de 6 dB par rapport avec un chanteur soliste.

La puissance acoustique d'un chanteur choriste est fixée à 93 dB, celle d'un chanteur soliste à 99 dB.

Au théâtre des Champs-Élysées, avec *Falstaff* de Verdi, le chœur de 16 chanteurs produisait une puissance acoustique de 105 dB, négligeable si l'on compare avec les 114 dB émis par l'orchestre. A la Scala de Milan, avec *Attila* de Verdi, le chœur, de qualité excellente, comportait environ 60 chanteurs. Sa puissance de 112 dB augmente d'au moins 1 dB la puissance orchestrale de 114 dB. Le *War Requiem* de Britten nécessite encore d'autres considérations et sera discuté plus en détail dans le paragraphe 10.4.2. Cette œuvre nécessite *quatre* groupes de sources sonores, utilisés surtout en *complimentarité* et en *juxtaposition*: un orchestre symphonique (avec deux chanteurs solistes), un orchestre de chambre (avec deux autres chanteurs solistes), un grand chœur, et un chœur d'enfants situé à l'autre bout de la salle, proche de la place 1G0. Il est donc difficile de déterminer la puissance globale de l'ensemble — faut-il considérer la somme des puissances des quatre ensembles, ou faut-il, au contraire, ne considérer que la puissance de l'ensemble le plus fort?

Le tableau suivant donne les puissances acoustiques de toutes les sources sonores (instruments et chanteurs) qui ont été considérées pour le calcul de la puissance acoustique des effectifs orchestraux :

violon	89 dB	flûte	94 dB	cor	99 dB
alto	87 dB	hautbois	94 dB	trompette	101 dB
violoncelle	90 dB	clarinette	94 dB	trombone	101 dB
contrebasse	92 dB	basson	94 dB	tuba	101 dB
timbales	100 dB	piano solo	102 dB	chanteur soliste	99 dB
percussion	99 dB	piano accompagnateur	96 dB	chanteur choriste	93 dB

10.3 Les œuvres écoutées et leurs forces sonores

Lors des tests d'écoute, une grande gamme d'œuvres employant des effectifs très variés était écoutée, reflétant la variabilité des partis architecturaux considérés (grandes salles de concerts, opéras et auditoriums). Les effectifs les plus petits étaient un piano seul, un duo violoncelle et piano ou un quatuor à cordes. Les œuvres avec un effectif très fourni étaient, par exemple, une symphonie de Bruckner, les pièces pour orchestre d'Alban Berg ou le *War Requiem* de Britten. La liste des œuvres écoutées, leurs effectifs employés et leur puissance acoustique totale a déjà été donnée dans le tableau final du chapitre 4.6. Les effectifs sont donnés dans la nomenclature standardisée des partitions de musique, légèrement élargie pour accommoder le piano et les chanteurs solistes: nombre total de violons, altos, violoncelles, contrebasses, flûtes, hautbois,

clarinettes, bassons, cors, trompettes, trombones, tubas, timbales, percussions, piano, chanteurs solistes et choristes. Les “//” séparent les différents groupes de l'orchestre. En utilisant les puissances acoustiques des instruments, déterminées dans le paragraphe précédent, on arrive aux puissances totales indiquées à droite en caractère gras.⁴

On remarque qu'une différence d'environ 20 dB apparaît entre la puissance la plus faible et la puissance la plus élevée des effectifs orchestraux. Ce chiffre est à comparer avec la variabilité dans les mesures objectives des salles : le critère objectif de l'amplification de la salle, G_{MF} , varie de 18 dB pour les places individuelles, pour la moyenne des salles la différence la plus grande est de 11 dB.

10.4 Correspondance entre la force sonore et la question concernant la “puissance sonore”

10.4.1 Toutes salles confondues

Utilisant les puissances acoustiques calculées dans le paragraphe précédent, un jeu de critères objectifs par œuvre et par salle a été calculé. Tous les paramètres objectifs mesurés dépendants de la puissance sonore de la source ont été multipliés par la puissance acoustique de l'effectif orchestral. De plus, des moyennes par œuvre ont été calculées, sur les critères acoustiques comme sur les réponses aux questionnaires. Pour les œuvres à plusieurs parties, induisant des changements de place, la moyenne était calculée pour chaque partie. Il est donc possible d'étudier les relations (et les corrélations) entre les réponses aux questionnaires et les mesures objectives, en intégrant l'effet de l'effectif orchestral variable. La figure 10.1 donne le résultat de la correspondance entre la question “puissance subjective” et le critère objectif de la force sonore (aux moyennes fréquences). La force sonore objective est calculée en multipliant la puissance de la source musicale par le facteur d'amplification de la salle, \mathbf{G} , aux moyennes fréquences.⁵

On remarque que, en général, la concordance entre la variation objective de la force sonore et l'impression subjective de puissance s'avère bonne. Mais, en étudiant la figure 10.1, on remarque également une différence de comportement entre les grandes salles de concerts et les opéras, d'un côté, et les salles pour la musique de chambre, de l'autre, indiquant un changement d'attitude pour l'écoute d'œuvres de musique de chambre. Pendant ces œuvres, le nombre de musiciens sur scène est clairement lisible, et il semble que les auditeurs comparent la force sonore à leurs places avec une “attente” en rapport avec leur connaissance préalable de la puissance acoustique des instruments sur scène.⁶ Cette stratégie n'est plus possible pour les œuvres symphoniques. La différence visuelle d'occupation de la scène entre un orchestre pour une symphonie de Mozart et pour une symphonie de Bruckner n'est pas très grande. Par contre, la différence entre les puissances acoustiques peut être très grande, car on ajoute surtout des instruments avec une puissance acoustique très élevée (cuivres, percussions).

Une autre observation peut être faite : dans les œuvres à plusieurs parties, les sujets ont souvent jugé les deuxième parties comme étant plus fortes. On serait tenté de l'expliquer par le fait qu'il faut un certain temps au sujet pour “s'installer” dans l'ambiance de la salle et du concert. Mais il nous semble qu'une raison plus objective permet de l'expliquer, indiquant l'extrême sensibilité des sujets à des changements — même mineurs — de l'effectif orchestral : il

4. Pour le calcul de la force sonore totale une addition linéaire était effectuée, équivalent à supposer que pour la force sonore totale tous les instruments jouent en même temps. Le tableau final du chapitre 4.6 donne les effectifs total. Par contre, le calcul de la puissance acoustique totale ne considère *que* l'effectif le plus grand jouant *en même temps*.

5. Le critère \mathbf{G} est souvent — sans précaution de langage — appelé force sonore. Dans notre cas, où la puissance acoustique de la source est variable, une distinction entre les termes “puissance acoustique” d'une source, “amplification” de la salle et, finalement, la “force sonore objective” chez l'auditeur est primordiale.

6. Il convient d'ajouter que la question exacte était : “puissance sonore” (“niveau sonore perçu dans la salle”), et qu'il était spécifié que, dans cette question, il s'agissait de juger la salle plutôt que les instruments. Ainsi s'explique aussi la relative stabilité de l'impression de puissance subjective à l'Auditorium du Louvre, où deux tests, avec des effectifs orchestraux de tailles très différentes, étaient effectués. Lors du premier test, les sujets écoutaient un duo de violoncelle et piano, lors du second, un petit orchestre de chambre.

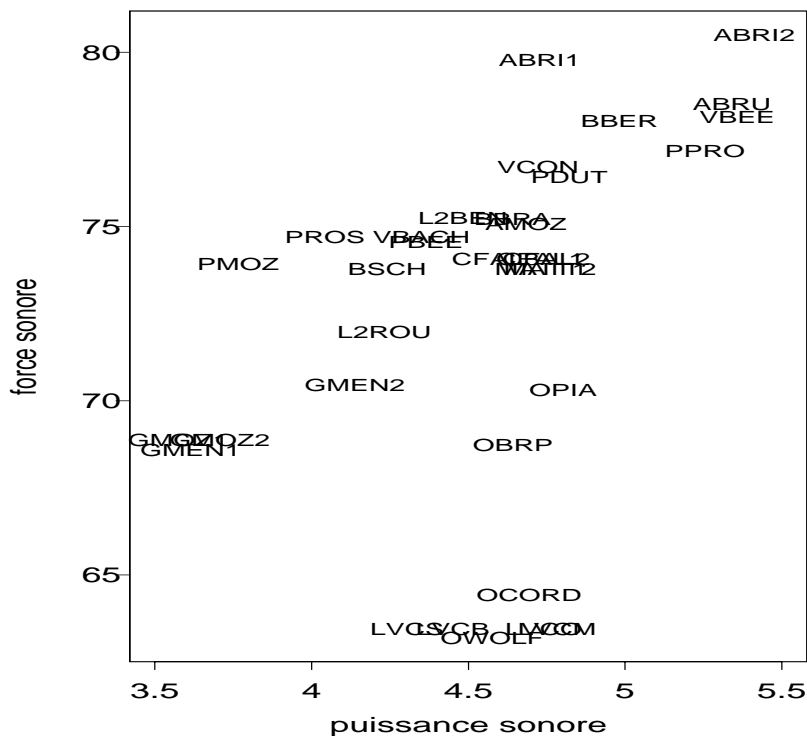


FIG. 10.1 - Force sonore objective vs. puissance subjective, par salle et par œuvre

y a souvent, dans l’écriture musicale d’une œuvre, une évolution qui fait que le climax, et alors les forces sonores les plus élevées, parviennent vers la fin de l’œuvre. Une étude plus détaillée des partitions révèle, par exemple, pour le “Songe d’une nuit d’été” de Mendelssohn, une différence de l’effectif instrumentale, où l’effectif est agrandi pour la deuxième moitié par des trombones et un orphéum (tuba). Dans le *War Requiem* de Britten, la totalité de l’effectif, y compris la grande orgue, n’est utilisée que pour la dernière partie. Les changements de la force sonore en résultant ont été inclus dans la figure 10.1.

Afin d’étudier ce changement d’attitude dans l’écoute, on étudiera la correspondance entre les réponses aux questionnaires et les mesures objectives *par type de salle*.

10.4.2 Les salles de concerts

La figure 10.2 montre graphiquement la correspondance entre les réponses à la question sur la “puissance sonore” et les mesures objectives, pour les moyennes par œuvre. Avec le critère de l’amplification de la salle, **G** (figure de gauche), il n’y a pas de véritable correspondance et le taux de corrélation est d’environ 0,3. En intégrant les puissances acoustiques des différents effectifs orchestraux et en considérant la force sonore, la correspondance est très bonne et le taux de corrélation est de $r = 0,82$.

Par contre, en étudiant la figure de droite, on a l’impression que la force sonore est *surévaluée* pour le *War Requiem* de Britten. En effet, la somme des puissances acoustiques de *tous* les instruments jouant dans la partie a été considérée. Comme déjà évoqué ci-dessus, dans cette œuvre, les différents ensembles orchestraux sont surtout utilisés de manière complémentaire et ne jouent quasiment jamais tous en même temps. Si l’on calcule la puissance acoustique seulement sur l’orchestre symphonique, la puissance acoustique totale est plus faible de presque

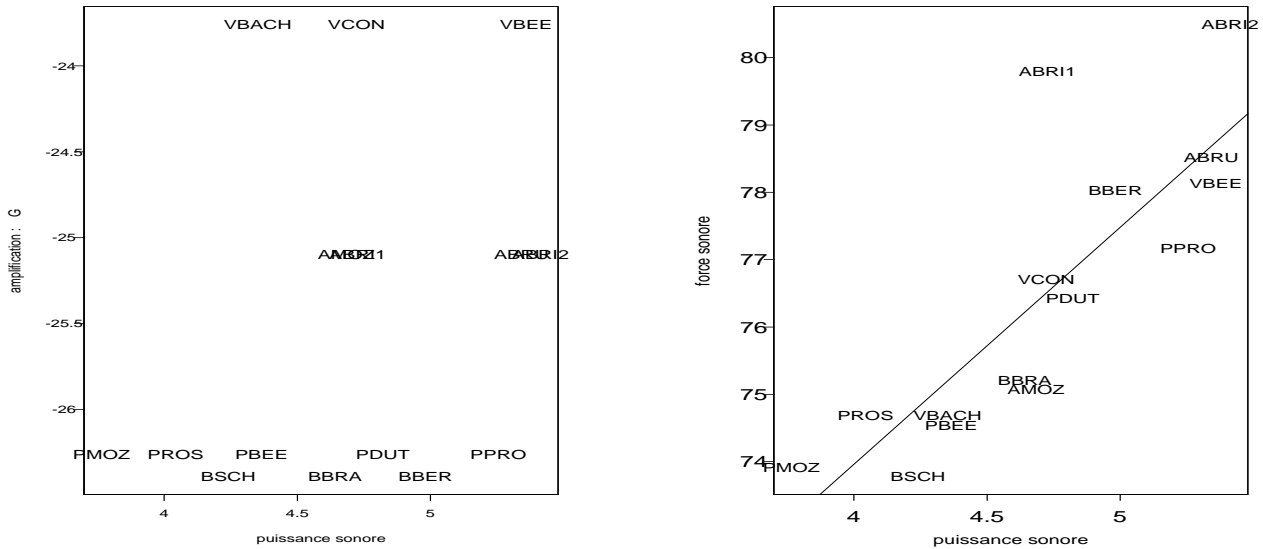


FIG. 10.2 - Correspondance entre les réponses sur la puissance sonore et les critères de l'amplification de la salle (G , figure de gauche) et la force sonore (figure de droite), pour les salles de concerts, moyennes par œuvre.

2 dB.⁷ La correspondance objectif/perceptif s'améliore nettement et le taux de corrélation final est de $r = 0.90$.

Dans le chapitre 9, la matrice des réponses par place dans les salles de concert (**CONCplaces**) a été considérée, sans accommoder les forces sonores variables.

Quelles ont été les puissances moyennes⁸ des effectifs dans les différentes salles? En intégrant le changement sur le *War Requiem* de Britten,⁹ les puissances moyennes par salle sont de :

Amsterdam :	113.7 dB
Berlin :	113.1 dB
Pleyel :	112.6 dB
Vienne, avec l'oratoire de Noël de Bach :	111.2 dB
Vienne, sans l'oratoire de Noël de Bach :	112.2 dB

En moyennant sur les différentes œuvres musicales écoutées, mais en excluant l'oratoire de Noël de Bach écouté à Vienne, les forces sonores à l'intérieur des salles de concerts étaient constantes à environ 1 dB près. Ceci justifie à posteriori les analyses effectuées sur la matrice **CONCplaces** dans le chapitre 9.

La différence restante a-t-elle des effets sur les réponses aux questionnaires? Le tableau suivant donne, pour les quatre salles de concerts, les valeurs du critère de l'amplification de la salle, G_{MF} , de la force sonore et les réponses subjectives à la question "puissance". La figure 10.3 montre l'amélioration de la correspondance objectif/perceptif pour la question sur la puissance sonore.

7. On pourrait encore diminuer la puissance acoustique de l'effectif si l'on considérait qu'il s'agissait d'un orchestre *amateur*. La qualité de l'orchestre était très bonne, mais on pourrait supposer que les musiciens produisaient une puissance acoustique moins forte qu'un orchestre équivalent professionnel.

8. Ici, puissance moyenne signifie la puissance acoustique de l'effectif orchestral, pour un "bon forte", moyennée sur les différentes œuvres, donc les effectifs orchestraux. Il ne s'agit pas d'une puissance moyenne sur la durée d'une œuvre.

9. Seule la puissance acoustique de l'orchestre symphonique et des deux chanteurs solistes "liés" à cet ensemble a été considérée.

SALLE	G_{MF} : amplification	force sonore	puissance
Amst	-25.1	77.6	4.98
Berlin	-26.4	75.7	4.67
Pleyel	-26.3	75.4	4.50
Vienne	-23.8	77.4	5.07
cor avec “puissance”	$r = 0.90$	$r = 0.97$	

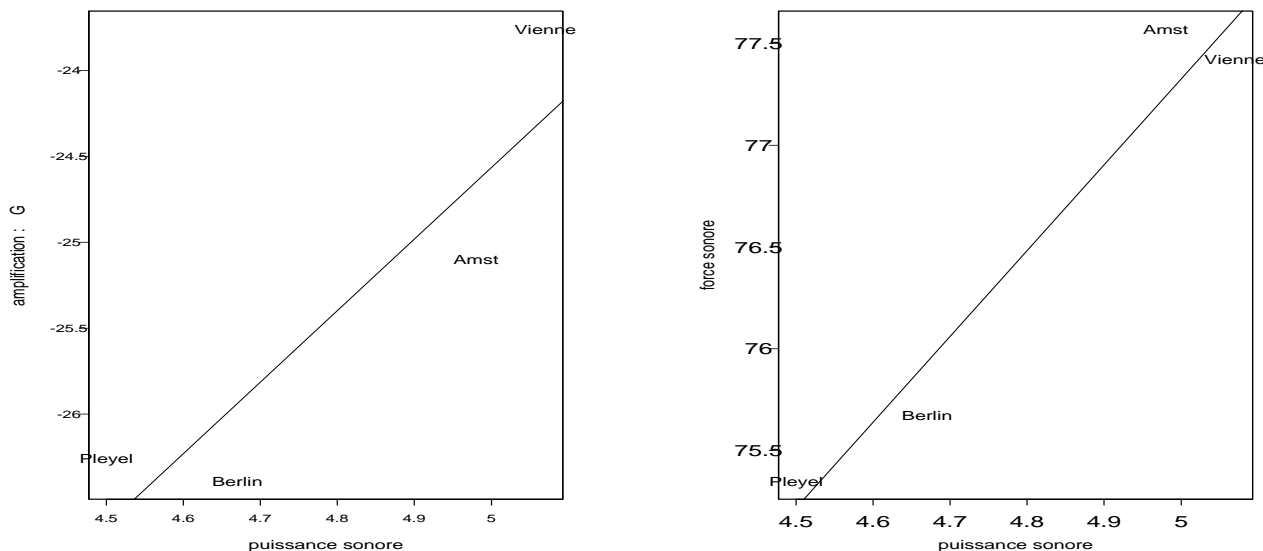


FIG. 10.3 - Correspondance entre les réponses sur la puissance sonore et les critères de l’amplification de la salle (G , figure de gauche) et la force sonore (figure de droite), pour les salles de concerts, moyennes par salles.

La Musikvereinsaal de Vienne étant la plus petite des salles de concerts testées, l’amplification de la salle est plus forte dans cette salle. La force sonore de l’orchestre, légèrement plus faible, ne parvient qu’à diminuer cet écart. Il est possible qu’avec une œuvre comme les pièces pour orchestre d’Alban Berg cette salle atteindrait un niveau de saturation. Par contre, l’effet de la réduction de l’effectif orchestral se remarque sur la Salle Pleyel, jugée la moins forte subjectivement tout en étant légèrement plus forte que Berlin au niveau des mesures objectives de l’amplification de la salle.

En principe, il faudrait également changer la matrice **CONCplaces**, considérée dans le chapitre 9 sur la correspondance objectif/perceptif. Il s’avère que les changements, ne dépassant pas 1 dB, sont négligeables par rapport à la variation des critères à l’intérieur des salles (jusqu’à 5 dB) et que les taux de corrélation sont sensiblement identiques.

Par contre, il faut absolument intégrer les variations de la puissance acoustique des effectifs orchestraux lorsque l’on considère les réponses aux questionnaire par œuvre et par place.

Considérons une seule salle: pour l’ensemble des tests à la Philharmonie de Berlin, le taux de corrélation entre le critère objectif de l’amplification de la salle aux fréquences moyennes (G_{MF}) et les moyennes des réponses à la question sur la puissance subjective par place, est de $r = 0.67$. Pour les œuvres individuelles de Brahms, Schubert et Berg les taux sont, respectivement, de $r = 0.67$, $r = 0.59$ et $r = 0.68$. Considérant ensemble les œuvres individuelles, ce que revient à prendre en compte trois fois plus de places (ou trois salles différentes), le taux de corrélation entre le facteur d’amplification G_{MF} et la puissance subjective est de $r = 0.557$. Intégrant les puissances acoustiques variables des œuvres, le taux de corrélation entre la force sonore résultant et la puissance acoustique est de $r = 0.748$.

La figure 10.4 montre, graphiquement, les différences entre la relation de la puissance sub-

jective avec l'amplification de la salle, d'une part, et avec la force sonore, d'autre part.

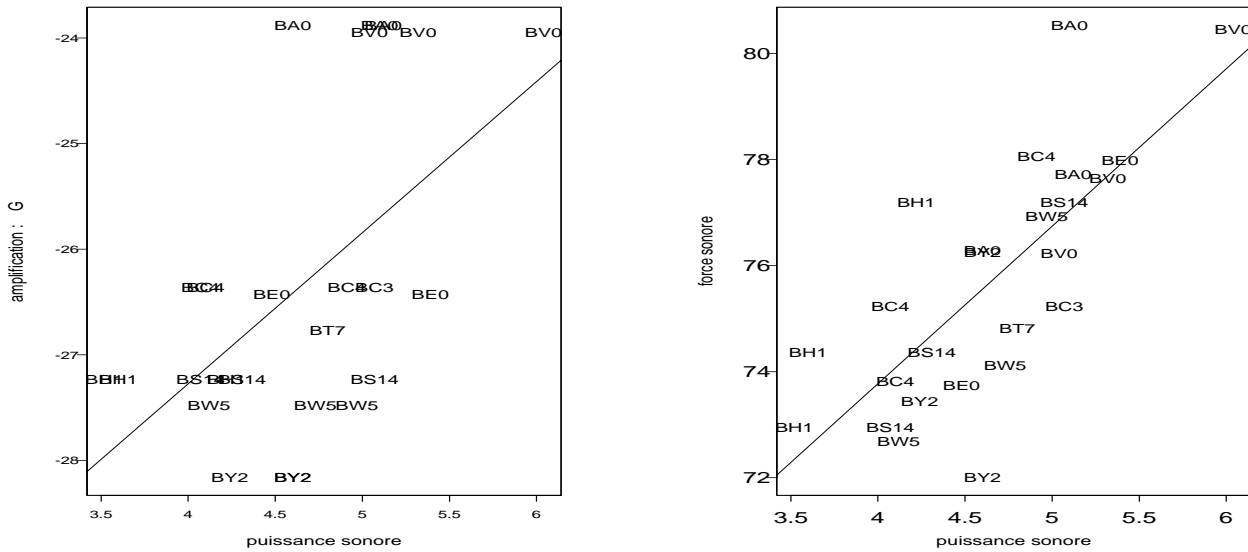


FIG. 10.4 - Correspondances entre les réponses sur la puissance sonore et les critères de l'amplification de la salle (G , figure de gauche), et la force sonore (figure de droite), pour la Philharmonie de Berlin. Chaque point correspond à une place donnée pour une œuvre donnée — chaque place apparaît donc trois fois.

10.4.3 Les opéras

Les puissances moyennes des effectifs musicaux par opéra étaient de:

Théâtre des Champs-Élysées: 115.0 dB
 Opéra Palais Garnier: 112.0 dB
 Scala de Milan: 115.2 dB

SALLE	G500: amplification	force sonore	puissance
TCE	-30.0	74.1	4.69
Milan	-30.4	73.8	4.75
Garnier	-31.8	69.2	3.77
cor avec "puissance"	$r = 0.954$	$r = 0.995$	

Au Théâtre des Champs-Élysées ainsi qu'à la Scala de Milan, l'amplification de la salle et la puissance subjective sont semblables. Par contre, au Palais Garnier, le critère de G pour la moyenne de la salle est plus faible d'environ 1 à 2 dB. Il s'ajoute une différence de puissance acoustique due à l'effectif musical de 3 dB. Cette différence se répercute très nettement sur les réponses aux questionnaires: les sujets ont jugé l'opéra Garnier comme étant très différent des autres opéras. Cette différenciation est effectuée sur plusieurs questions, et non pas uniquement la puissance subjective. Une ACP sur les réponses aux questionnaires dans les opéras, figure 10.5, montre que presque toutes les différences sont induites par la variation de la puissance. 75 % de la variance des réponses sur les trois salles d'opéras (avec trois ou quatre parties différentes ou œuvres musicales par opéra) est expliquée par le premier axe, colinéaire avec la question sur la puissance subjective.

On en conclura que les sujets utilisaient la différence de la force sonore pour de différencier ces salles. Il s'agit alors d'une mauvaise adaptation des œuvres musicales à la salle, donc d'un problème de programmation. Un des constats le plus net de cette campagne de mesures et de tests d'écoutes était que ces tests peuvent aussi être utilisés dans un but inverse, c.-à-d.

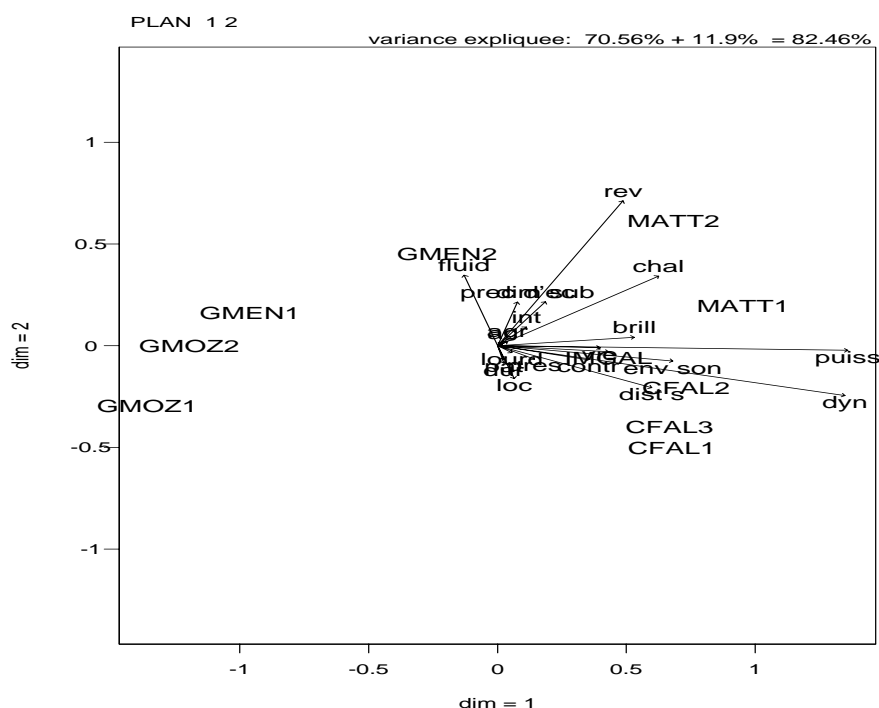


FIG. 10.5 - ACP des questionnaires subjectives des opéras, par œuvre

d’adapter une programmation musicale à une salle existante. Les jugements sur la qualité acoustique d’une salle sont fortement influencés par les œuvres qui y sont jouées — paramètre plus facilement variable que l’acoustique d’une salle existante. Par ailleurs, cela met en évidence l’importance de spécifier le plus exactement possible la destination d’une salle en construction dès l’établissement du cahier des charges. Seule cette démarche permet de définir la bonne acoustique pour une salle, “bonne” incluant forcément “adaptée”.

Dans ce contexte, il est intéressant de citer Hugues Gall, directeur de l’opéra de Paris. Dans un interview donné au “Monde de la musique” [Gal94], il affirme qu’il compte exploiter, outre l’Opéra Bastille, le Palais Garnier ainsi que la Salle Favart (Opéra Comique), “selon le génie des lieux”. Même si, dans l’interview, il parle plutôt de l’espace, où le “rapport scène/salle de Garnier” lui semble plus adapté pour recevoir certaines œuvres pourtant données à la Bastille, ou d’une œuvre qui “trouvera son cadre véritable dans la salle pour laquelle elle était conçue”, il paraît évident qu’une meilleure adaptation d’une œuvre musicale à une salle aura aussi, acoustiquement, des conséquences positives.

En comparant les opéras avec les salles de concert, la Scala de Milan et le Théâtre des Champs-Élysées semblent légèrement sous-évalués dans les mesures objectives (cf. figure 10.1). Dans le chapitre 9.1, on avait constaté une amélioration de la correspondance objectif/perceptif en considérant une moyenne pondérée entre les sources situées dans la fosse d’orchestre et les sources sur scène. Les mesures considérées dans la figure 10.1 correspondent à une source omnidirectionnelle reconstituée, située dans la fosse d’orchestre. Pour l’évaluation subjective le mélange entre les points “T0” (représentatif de l’orchestre) et “N0” (situé sur le plateau, représentatif des chanteurs) devrait être plus adapté. Les mesures effectuées avec une source au point N0 sont, en moyenne, 1 à 2 dB plus fortes que les mesures avec la source en T0.

10.4.4 Les auditoriums

La puissance moyenne de l'effectif musical par test dans les auditoriums était de:

Auditorium du Louvre (test 1): 97 dB

Auditorium du Louvre (test 2): 107 dB

Auditorium du Musée d'Orsay: 99 dB

Les effectifs écoutés lors des tests d'écoute dans les auditoriums étaient d'environ 6 à 12 dB moins forts que ceux écoutés dans les grandes salles de concerts.

SALLE	G500: amplification	force sonore	puissance
Louvre, test 1	-22.5	63.5	4.55
Louvre, test 2	-22.5	73.6	4.47
Orsay	-20.7	67.8	4.68
cor avec "puissance"	$r = 0.92$	$r = -0.45$	

La comparaison des taux de corrélations confirme l'hypothèse d'attitude d'écoute. Pendant l'écoute d'œuvres de musique de chambre les auditeurs comparent la force sonore à leurs places avec une attente en rapport avec leur connaissance préalable de la puissance acoustique des instruments sur scène.

10.4.5 Conclusion sur les forces sonores

On a pu démontrer que la puissance acoustique des effectifs orchestraux déployés sur scène lors des tests d'écoute a des influences significatives sur les jugements des auditeurs. Ces influences sont très nettes lorsque l'on considère les moyennes des réponses par salle, c.-à-d. lorsqu'on néglige les différences qui existent entre les différentes places à l'intérieur d'une même salle. Dans ce cas, mêmes les différences inférieures à 1 dB sont détectées de manière significative par les auditeurs. Il est évident que ces influences créeront un biais pour chaque place à l'intérieur de la salle. Dans un cas extrême, comme celui des tests d'écoute à l'Opéra Garnier, on peut parler d'une mauvaise adaptation de la programmation à la salle.

10.5 Quantification de la relation objectif / subjectif

Dans le paragraphe précédent, l'influence de l'œuvre sur la perception de l'acoustique des salles de concerts et d'opéras a clairement été prouvée de manière qualitative. Dans ce paragraphe, on essaiera de *quantifier* cet effet — et d'effectuer une comparaison quantitative entre une variation du niveau de la source et une variation de l'amplification de la salle. On étudiera également les différences entre un changement de place à l'intérieur d'une même salle et un changement entre différentes salles. Cette dernière différence serait fondée dans la structure même des tests d'écoute: les changements de place à l'intérieur d'une salle s'effectuaient dans un laps de temps beaucoup plus court (soit à l'entracte, soit, pour la grande majorité des tests, le lendemain) que les changements entre salles, sachant que l'ensemble des tests s'est déroulé sur une période de deux ans. On peut supposer que, après un changement de place dans une salle, les sujets ont répondu de manière relative, c.-à-d. en comparant avec la place écoutée juste avant. Par contre, après un changement de salle, ils étaient obligés de répondre de manière absolue, en se fiant aux indications et à l'échelle du questionnaire.

La quantification sera donnée par une "constante de régression": combien de dB de différence objective faut-il pour provoquer une différence de 1 unité perceptive sur la question "puissance subjective"?

Variation de la puissance acoustique de la source: on considère les changements de l'effectif musical à l'intérieur d'une salle, le paramètre de l'amplification de la salle restant donc inchangé. Seules les grandes salles de concert sont considérées, car dans la plupart des opéras une seule œuvre musicale était écoutée.

<i>salle</i>	dB par unité perceptive
Amsterdam	3.44
Berlin	5.67
Pleyel	2.23
Vienne	3.29
MOYENNE	3.66

Pour ce cas, une différence de 1 unité perceptive correspond à une variation de la force sonore de l'effectif orchestral d'environ 3 dB.

En fait, il est intéressant d'observer les différentes constantes de régression de la puissance objective en puissance subjective. On remarque une constante beaucoup plus petite pour la Salle Pleyel. Cela signifie qu'un même changement de l'effectif orchestral provoquera un plus grand changement de la perception de l'acoustique. On serait tenté de l'expliquer comme un effet de dynamique subjective, mais les réponses aux questionnaires démontrent clairement que la Salle Pleyel est jugée comme étant peu dynamique, alors que la Philharmonie de Berlin est jugée comme très dynamique. En outre, une faible constante de régression contraint l'utilisation d'effectifs orchestraux variables dans une salle et rend encore plus difficile la formation d'une identité de la salle. Il faut donc plutôt voir cet effet comme le défaut d'une salle ou au moins comme un risque de défaut. Pour le cas de la Salle Pleyel, l'explication objective de cet effet se trouve dans la géométrie de l'entourage de la scène: la conque d'orchestre, très prononcée dans cette salle, augmente la puissance des instruments situés vers l'arrière de la scène. Augmenter la taille de l'orchestre, qui consiste principalement à rajouter des vents, des cuivres et des percussions, instruments situés vers l'arrière de la scène, augmente la puissance de l'orchestre de manière plus prononcée que dans les autres salles. L'effet de cette conque a aussi été visible dans les réponses aux questions détaillées par pupitres.

Puissance acoustique de la source, à travers les salles : il s'agit d'une variation des deux facteurs de la puissance acoustique de la source et de l'amplification de la salle à la fois. En étudiant les valeurs pour des œuvres individuelles, le facteur de puissance de la source apparaît accentué. Au moins pour les salles de concert, les variations de la puissance acoustique des sources sont nettement plus grandes que les variations de la moyenne d'amplification par salle.

<i>salle</i>	dB par unité perceptive
CONCSALLES	3.20
OPÉRAS	4.76

La valeur de 3.2 dB pour les salles de concerts confirme la valeur d'environ 3 dB pour une variation de la puissance de l'effectif orchestral à l'intérieur d'une salle.

Amplification de la salle, pour des changements de salles : Il s'agit d'étudier le plus isolément possible les variations d'amplification apportées par la salle, en moyennant sur toutes les places ainsi que toutes les œuvres écoutées à l'intérieur d'une salle. Pour les salles de concerts et les opéras, les changements de l'effectif orchestral sont toujours pris en compte. Par contre, pour les auditoriums, l'amplification de la salle est considérée, en tenant compte du changement de stratégie de réponse des sujets. Néanmoins, cette valeur doit être considérée avec précaution.

<i>salle</i>	dB par unité perceptive
CONCSALLES	4.21
OPÉRAS	4.93
AUDITORIUMS	8.86
toutes salles	6.65

La constante de régression pour ce type de changements peut être estimée à environ 5 dB. Pour obtenir un changement de 1 unité perceptive de la puissance subjective moyenne d'une salle, il faut faire varier l'amplification de la salle d'environ 5 dB (pour une source de puissance acoustique constante). Cette valeur est plus grande que la valeur estimée, plus haut, sur les changements de l'effectif orchestral. Mais ceci paraît cohérent : s'agissant des changements à travers des salles, seules la mémoire auditive à long-terme et l'échelle absolue ont été utilisées pour établir les jugements. Il est surprenant de trouver une telle stabilité à long-terme, et ce résultat confirme très fortement l'hypothèse que l'auditeur humain serait capable d'évaluer une puissance acoustique dans une salle de concert *en absolue*, contrairement à l'hypothèse soutenue par l'équipe de Göttingen dans les années '60.

La constante de régression pour une écoute absolue peut être évaluée à environ 5 dB. Comment comparer cette valeur avec celles calculées à partir des tests d'écoute dans une même salle, donc établies avec des temps de changement beaucoup plus courts ?

Amplification de la salle, à l'intérieur d'une salle : on considère la moyenne de chaque place, la moyenne étant établie à partir des réponses des différents sujets ayant écouté des œuvres différentes. L'effet de variation de l'œuvre est donc enlevé.

<i>salle</i>	dB par unité perceptive
Amsterdam	0.61
Berlin	2.07
Pleyel	1.78
Vienne	3.17
TCE	2.53
Garnier	2.69
Milan	1.54
Louvre	1.97
Orsay	0.01
MOYENNE par salle	1.65
MOYENNE par salle, sans Orsay	1.88

Pour ce type de changements, la constante est de 1.5 à 2 dB. Le rapport d'un facteur d'environ 3, entre les changements de places à l'intérieur d'une salle et les changements de salle, permet une estimation de la différence entre les comparaisons court-terme et long-terme.

Par rapport aux changements d'effectif orchestral, les valeurs sont étonnamment proches : une unité perceptive correspondait à un changement d'environ 3 dB de la puissance orchestrale, et ici à un changement de 1.5 à 2 dB de l'amplification de la salle. Deux éléments supplémentaires permettent de rapprocher encore les deux valeurs. Premièrement, les valeurs de la puissance acoustique des sources sonores sont calculées avec une addition linéaire des puissances des instruments individuelles pour un *forte* moyen. Ceci équivaut à considérer que tous les instruments jouent en même temps, cas rare dans la réalité d'une œuvre musicale, et d'autant plus rare avec des effectifs plus grands. Deuxièmement, les différences d'amplification de la salle entre les places proches et les places lointaines risquent d'accroître dans une salle avec public. Pour étudier cet effet, des données de correction par simulation informatique peuvent apporter des informations supplémentaires.

La différence des constantes de régression entre le Concertgebouw Amsterdam et la Musikvereinsaal de Vienne peut s'expliquer ainsi : au Concertgebouw Amsterdam, qui a un parterre relativement large, les places à l'arrière du parterre sont jugées comme étant nettement moins puissantes, un effet de l'incidence rasante prononcé. Par contre, les places sur le balcon (unique), sans masquage de l'onde directe, sont perçues comme étant nettement plus fortes que des places parterre à distance égale. Dans la Musikvereinsaal,

de largeur inférieure, l'effet de l'incidence rasante, même avec public, est affaibli par des réflexions fortes, latérales et relativement précoces.

10.6 Cohérence entre sujets

Ayant établi une constante de régression "moyenne", c.-à-d. moyennée sur tous les sujets, il reste à étudier la cohérence entre les sujets pour la relation entre le paramètre objectif de la force sonore et la question subjective sur la puissance. La constante de régression est-elle comparable pour tous les sujets? Et, pour une force objective donnée, les sujets ont-ils la même impression de puissance subjective? Il convient d'ajouter que l'influence du deuxième facteur est habituellement enlevé par le processus d'itération appliqué à tous les questionnaires (processus enlevant la moyenne des sujets, car chaque place était occupée par des sujets différents). Dans ce paragraphe, l'étude sur l'échelle absolue de chaque sujet est effectuée sur les réponses brutes des questionnaires, et non sur les réponses itérées habituellement utilisées pour les analyses des questionnaires seuls ou des liaisons objectif/subjectif.

Le tableau suivant donne, pour les salles de concerts, les taux de corrélations, les constantes de régression ($\mathbf{a} \cdot \mathbf{x} + \mathbf{b}$) et la valeur objective correspondant à une puissance subjective de 5 ("fort"), pour tous les sujets ayant appartenu au noyau stable de la campagne européenne.

ensemble: salles de concerts

	cor amplif	a amplif	G(puiss = 5)	cor force	a force	force(puiss = 5)
AB	0.345	0.72	-26.02	0.435	1.16	75.47
AD	0.735	1.00	-25.88	0.819	2.72	75.65
DOM	0.634	1.43	-25.03	0.722	2.06	76.95
EK	0.417	1.02	-25.65	0.500	1.65	76.14
GB	0.504	1.64	-26.30	0.683	2.70	75.11
JPJ	0.416	0.93	-25.94	0.736	1.88	75.80
OW	0.474	0.89	-26.53	0.604	1.11	74.76
PD	0.761	0.55	-26.41	0.839	1.41	75.19
RD	0.474	1.39	-25.82	0.648	2.46	76.16
SW	0.577	1.15	-26.58	0.650	2.12	76.21
MOYENNE	0.534	1.072	-26.02	0.664	1.93	75.74
écart-type	0.140	0.336	0.470	0.18	0.593	0.647

Si des variations entre les sujets existent, en général, la concordance entre eux est très bonne. Le tableau doit être pris à titre d'exemple, démontrant qu'il est possible de dériver des relations *quantitatives* entre les réponses aux questionnaires et les paramètres objectifs. On a pu démontrer que, afin d'arriver à ce but, il est indispensable de considérer les effets de l'acoustique, en les mesurant avec un jeu de critères objectifs, ainsi que les effets de l'œuvre musicale et de son effectif orchestral.

Chapitre 11

Conclusion

Ce document a décrit les résultats et les analyses effectuées sur les données recueillies lors d'une campagne de mesures objectives et de tests d'écoute dans une dizaine de salles de concerts et d'opéras en Europe.

Le but de ce document était de *valider* — ou d'*infirmer* — un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique, issu des recherches récentes du laboratoire d'acoustique des salles de l'Ircam. Après une étude critique de la littérature et des recherches antérieures, ce modèle a été décrit en détail. La discussion sur les études antérieures et la comparaison avec la série de tests effectuée à l'Ircam ont permis de soulever une question essentielle en acoustique des salles : le nombre de facteurs indépendants structurant notre perception de la qualité acoustique. Une série de tests, organisée en 15 sous-tests individuels, avait déjà permis de dépasser les limites des expériences individuelles¹ et avait abouti à un modèle extrêmement détaillé, comportant neuf facteurs perceptifs indépendants. Restait à savoir si les tests en situation de concert pouvaient fournir une description aussi détaillée.

Mais auparavant, on pouvait s'interroger sur la fiabilité globale des résultats obtenus à partir des tests utilisant des questionnaires dans des salles. Les données obtenues à partir des tests en situation de concert étaient souvent considérées comme intéressantes mais peu fiables, parfois même, comparées aux données obtenues en situation contrôlée de laboratoire, comme des données de "deuxième classe".

Dans cette étude, on a prouvé qu'il est en fait possible de recueillir des données fiables et exploitables en situation de concert. Par contre, on a vu que ces données nécessitent un soin particulier, surtout parce que plusieurs influences se trouvent mêlées.

Le projet principal de la première partie de cette thèse était de formuler et d'élaborer une méthodologie adaptée à ce genre de tests. L'intérêt de cette méthodologie et de ses applications sort du seul contexte des données analysées dans le cadre de cette thèse, et l'on espère que d'autres chercheurs s'en inspireront pour de futures analyses. En effet, la méthodologie nous semble parfaitement adaptée à tous les types de données issues d'une situation réelle peu contrôlée (et peu contrôlable).

On récapitulera les éléments principaux :

séparation des différentes influences : la première étape consiste à déterminer et isoler les différentes influences sur les réponses aux questionnaires. Dans notre cas, les influences

1. Pour un seul test, le nombre d'aspects indépendants s'arrête à trois ou quatre. On atteint ici les limites "naturelles" de l'être humain en tant que sujet de test : lorsqu'il est soumis à une tâche de discrimination, un sujet se focalisera toujours sur les différences les plus apparentes afin de remplir la tâche demandée. En ce qui concerne l'utilisation des questionnaires, on pourrait imaginer qu'en supprimant les questions associées aux aspects les plus apparents, on réussirait à obtenir des sujets des réponses plus précises et plus fiables sur les aspects plus délicats et autrement négligés.

Pour les tests en salles, on a également constaté une autre limite, cette fois-ci objective : l'analyse des mesures objectives effectuées a montré de très fortes corrélations entre différents critères objectifs.

suivantes ont été isolées :

- l’acoustique, où la qualité acoustique objective doit être exprimée sous la forme d’un jeu de critères objectifs ;
- l’œuvre musicale
- l’interaction acoustique/œuvre
- les sujets, particulièrement leurs biais individuels linéaires
- le bruit résiduel.

L’importance respective des différentes influences a été établie de manière quantitative ;

élimination des biais individuels : l’influence des sujets consiste principalement en leurs biais individuels globaux. Ces biais représentent le fait que chaque sujet répond à partir d’une échelle de valeurs qui lui est propre. Par contre, ces biais étant linéaires, il est possible de les enlever, même dans une situation non-standard où chaque sujet n’a écouté qu’un sous-ensemble de places ;

élimination de l’influence de l’œuvre : pour chaque question, la moyenne des réponses pour chaque œuvre a été enlevée. L’influence moyenne de chaque œuvre est donc éliminée, en même temps que l’influence moyenne de la salle — ce qui s’avère nécessaire, compte tenu de la variabilité des salles considérées : grandes salles de concerts, opéras et salles pour musique de chambre. L’influence *moyenne* de l’œuvre peut être négligée uniquement lorsqu’on ne considère que des grandes salles de concerts ;²

étude de l’influence de l’œuvre musicale : lorsqu’on se limite à expliquer la correspondance entre les réponses aux questionnaires et les critères acoustiques, on peut se contenter d’éliminer l’influence globale (c.-à-d. moyenne) de l’œuvre.

Par contre, on a démontré que l’œuvre musicale et son effectif orchestral ont une influence significative sur la quasi-totalité des facteurs perceptifs. Si l’on veut prédire la qualité acoustique d’une salle *pour une œuvre donnée*, il faut obligatoirement inclure une description objective de l’effet de l’œuvre. L’amorce d’un tel modèle, intégrant la description objective de l’œuvre musicale et de son effectif, a été donnée dans le chapitre 10, cf. également [Kah94]. Il a été prouvé que la variation de la puissance acoustique de l’effectif musical est perçue de manière similaire à la variation de l’amplification de la salle. Connaissant la puissance acoustique de l’effectif orchestral et l’amplification de la salle à une place donnée, les réponses à la question sur la puissance sonore peuvent être prédites quantitativement avec fiabilité. La correspondance objectif/perceptif trouvée en intégrant ces paramètres a été très bonne.³

Il serait fortement souhaitable de développer ce modèle prenant en compte l’influence de l’œuvre à partir des paramètres objectifs. Les données nécessaires (par exemple la puissance en fonction de la fréquence, une caractérisation des attaques, l’indice de directivité et la direction principale d’émission des instruments individuels) deviennent peu à peu plus facilement disponibles, [Mey95, San91, San95, Cou96]. A partir de ces données, il faudrait définir un jeu de critères objectifs pour les instruments d’orchestre, comme cela a été effectué pour la qualité acoustique d’une salle. Un tel modèle pourrait s’avérer extrêmement utile pour décrire l’influence de l’œuvre musicale, mais également en vue d’une description *quantitative* de l’effet de l’interaction acoustique/œuvre ;

2. En effet, dans ce cas précis, les *moyennes* des œuvres par salle ont été suffisamment proches. Uniquement dans ce cas, il est pertinent de comparer directement les moyennes des réponses par place. Cela ne veut nullement dire que les différentes œuvres écoutées ne menaient pas à des différences significatives.

3. Ce modèle quantitatif peut surtout être utilisé pour prédire *l’adaptation* d’une œuvre donnée à une salle donnée. Pour une salle existante, on peut optimiser la qualité acoustique en adaptant la programmation à la salle.

étude de l'interaction acoustique/œuvre : l'effet de l'interaction acoustique/œuvre est spécifique à chaque place et à chaque œuvre. Le nombre des données n'a pas été suffisant pour permettre d'enlever cette influence ni de la quantifier autrement que globalement. Par contre, une étude qualitative a permis de faire apparaître la directivité de certains instruments de l'effectif orchestral et leur *direction* principale d'émission comme paramètres déterminants ;

traitement du bruit résiduel : le niveau du bruit résiduel — comprenant toutes les influences autres que celles décrites ci-dessus et, surtout, l'incertitude des sujets dans leurs jugements — reste toujours relativement élevé. Mais l'estimation *quantificative* du bruit résiduel a permis de calculer des bornes théoriques supérieures aux corrélations, rendant possible la comparaison des performances de la correspondance objectif/perceptif pour les différentes questions et les différents critères objectifs avec ces seuils théoriques. Cela a permis, pour chaque cas étudié, une évaluation fiable de la pertinence de la correspondance.

En deuxième partie, à partir du chapitre 6, les réponses aux questionnaires et les mesures objectives ont été analysées, d'abord indépendamment les unes des autres, puis en étudiant la correspondance objectif/perceptif. On a constaté que, pour le questionnaire complet utilisé comportant 29 questions, les réponses ne sont pas toutes indépendantes. Un modèle de réduction du nombre de variables indépendantes a été élaboré, menant à la sélection de huit questions d'entrée. Cela ne signifie pas que les autres questions sont devenues "inutiles" ou "obsolètes", mais ce modèle permet d'étudier les réponses aux questions sémantiquement plus complexes à partir de l'analyse des réponses aux questions relativement "simples".

Il existe une autre raison de conserver la totalité des questions : l'indépendance de certaines questions, comme la dépendance des autres, n'est assurée que pour le corps de données *spécifique* étudié. Ajouter de nouvelles données peut dévoiler un (sinon plusieurs) nouvel aspect indépendant. Chaque salle — et l'expérience des tests d'écoute à La Villette ne fait que confirmer cette hypothèse — ne se différencie d'autres salles que sur une ou quelques questions. Étudier la totalité des questions posées facilite énormément le travail d'*isoler* et d'identifier le ou les aspects perceptifs et les critères acoustiques correspondants.

A première vue, il semble que le nombre de huit questions indépendantes, sélectionnées dans le modèle de réduction du nombre de variables indépendantes, se rapproche du nombre de neuf facteurs perceptifs indépendants issus des analyses en laboratoire. Si l'on a pu isoler jusqu'à huit questions indépendantes, c'est parce que l'on effectuait des analyses sur plusieurs sous-ensembles des données recueillies, utilisant le fait que les différences les plus pertinentes variaient entre les sous-ensembles considérés.⁴ L'analyse de la correspondance objectif/perceptif a montré que certaines de ces questions indépendantes sont beaucoup plus influencées par des paramètres autres que l'acoustique, comme par exemple l'effet global de l'œuvre et de son effectif orchestral. Pour la seule influence de l'acoustique, le nombre de questions indépendantes est donc inférieur à huit, et on ne peut espérer obtenir une description aussi détaillée que celle formulée à partir des résultats des tests en laboratoire.

Revenons à la question du départ, la validation d'un modèle objectif de la perception de la qualité acoustique. Que ressort-il de la comparaison entre les résultats des analyses sur les données de cette étude et le modèle de la perception de la qualité acoustique ?

L'un des principaux changements dans l'analyse des tests en laboratoire, effectué par Jean-Pascal Jullien et menant à une nette amélioration de la correspondance entre les facteurs perceptifs et les critères objectifs correspondants, a été de séparer la perception de l'effet de la salle en un facteur perceptif lié à la perception de l'énergie précoce et un autre facteur lié à la perception de l'énergie tardive. D'après cette analyse, il n'y aurait pas de facteur lié à la perception de l'énergie globale.

4. On a vu plus haut que la limite habituelle du nombre d'aspects indépendantes pour *un seul test* est de trois ou quatre.

Ce changement étant intervenu après le début de la campagne des mesures et des tests d'écoute dans les salles européennes, aucunes questions concernant l'énergie précoce et l'énergie tardive de la salle n'ont été posées lors de cette campagne. Pourtant, déjà, l'analyse des réponses à la question sur la "puissance sonore" a mis en évidence cette séparation entre les énergies précoce et tardive. Ce résultat confirme fortement l'hypothèse qu'il existe *deux* facteurs perceptifs différents, liés respectivement à la perception des contributions énergétiques de la *source* et de la *salle*.

On récapitulera alors les résultats principaux de la correspondance entre les réponses aux questions et les mesures objectives observées. On abordera également les liens entre les *questions* indépendantes du modèle de réduction du nombre de variables d'entrée et les facteurs perceptifs :

puissance : il a été trouvé que la puissance sonore d'une salle est évaluée comme la somme des deux contributions de l'énergie précoce et de l'énergie tardive. La première peut être interprétée comme liée à la source, et on appellera le facteur perceptif correspondant **présence de la source**. La deuxième est liée à la perception de l'effet de salle, et on appellera le facteur perceptif correspondant **présence de l'effet de salle**. La correspondance entre les critères objectifs et les réponses à la question sur la puissance sonore a été trouvée optimale lorsque l'on effectue la somme des deux contributions sur les valeurs des critères *en dB*, indiquant que la somme est effectuée sur les valeurs des *facteurs perceptifs* et non sur les énergies.⁵

énergie précoce : l'optimisation de la correspondance objectif/perceptif menait à la définition d'un nouveau critère, lié à la perception de l'énergie précoce. Comme il s'agissait d'une modification du critère **DirE**, proposé par J.-P. Jullien et contenant déjà une intégration *conditionnelle* de l'énergie des réflexions intermédiaires, on l'avait appelé **DirE'**.

On propose maintenant d'en changer le nom et de l'appeler **EE** (pour "Early Energy"), ou plutôt **PEE** (pour "Perceived Early Energy"). La formule de ce critère a été optimisée à partir des données spécifiques de ce document. La définition exacte de ce critère doit encore être vérifiée par d'autres tests, en situation de concert et/ou en laboratoire. L'important est d'avoir fait apparaître un facteur perceptif lié à l'énergie précoce *perçue* et qu'il semble maintenant évident que des phénomènes d'*intégration conditionnelle* interviennent dans la perception de l'énergie attribuée à la source.⁶

Dans la formule finale optimisée de ce critère, un doute persiste sur la nécessité ou non d'intégrer *partiellement* les contributions énergétiques autres que le maximum. On donnera comme définition du critère **PEE** la formule optimisée à partir des données analysées dans ce document :

$$PEE = \text{Perceived Early Energy} = 10 * \log_{10}(\max(OD, R1, R2)) \quad (11.1)$$

$$= 10 * \log_{10}(\max(\int_{0ms}^{20ms} p^2 dt, \int_{20ms}^{40ms} p^2 dt, \int_{40ms}^{80ms} p^2 dt)) \quad (11.2)$$

Comme il s'agit d'une énergie *absolue*, cette énergie doit être rapportée à la puissance de la source de mesure. Le calibrage de la source est identique à celui du critère de **G** :

5. Sur les *énergies*, la somme des valeurs *en dB* correspond au *produit* des énergies, transformé *en dB*.

6. Une autre possibilité consisterait à effectuer une intégration sur un fenêtrage glissant de l'énergie précoce. Le problème est de fixer la *largeur* de cette fenêtre. Une constante de temps de 30 ms semble adaptée. Cette constante correspond à une longueur typique des transitions des instruments d'orchestre (violon, bois, cuivres). Par contre, les données analysées dans ce document semblent indiquer que la constante *varie* en fonction du temps d'arrivée. La constante de temps pourrait également varier en fonction de la fréquence (cf. [Bar95]).

$$PEE = 10 * \log_{10} \left(\frac{\max \left(\int_{0ms}^{20ms} p^2 dt, \int_{20ms}^{40ms} p^2 dt, \int_{40ms}^{80ms} p^2 dt \right)}{\left(\int_{0ms}^{\Delta t} p^2(r_S) dt \right) * (4\pi r_S^2 / 1 m^2)} \right). \quad (11.3)$$

énergie tardive : la validité du critère de **Rev**, proposé par J.-P. Jullien, a été confirmée.

Ce critère intègre le masquage d'une partie de l'énergie tardive de la salle (surtout la partie précoce de l'énergie réverbérée) par la réponse précoce de la salle. Premièrement, une énergie précoce importante diminue la perception de l'énergie tardive. Ce phénomène est également pris en compte par la définition du critère **EDT** proposée dans ce document. Deuxièmement, la définition du critère de **Rev** montre que l'énergie tardive est perçue plus fortement lorsqu'elle arrive *tardivement*. Il est intéressant de noter que cette dépendance du temps d'arrivée est encore plus explicitement prise en compte par le critère du temps central, **ts**, critère lié aux réponses à la question sur la réverbérance, voir ci-après. Ce rapprochement des critères de **Rev** et de **ts** montre que les deux critères ne sont pas indépendants. En fait, pour les mesures effectuées dans les salles européennes, le taux de corrélation entre les deux critères est de 75%.

Cette corrélation objective résout le problème de la pertinence du fait que *une* question indépendante mène à *deux* facteurs perceptifs. Dans les réponses aux questionnaires, les facteurs perceptifs de la **présence de l'effet de salle** et de la **réverbérance** sont mêlés. Les deux questions indépendantes de la puissance sonore et de la réverbérance correspondent donc au facteur perceptif de la **présence de la source** et au mélange des facteurs perceptifs de la **présence de l'effet de salle** et de la **réverbérance**. La séparation des deux derniers facteurs, trouvée dans les tests en laboratoire, ne s'est pas produite lors des tests en salles réelles, ce qui peut être lié à une *corrélation objective* des critères correspondants dans les salles testées.

réverbérance : les réponses à la question sur la réverbérance variaient de manière significative entre les différentes places à l'intérieur d'une salle comme pour la comparaison entre salles. Le temps de réverbérance classique, **TR**, peut expliquer en partie les variations des réponses pour la comparaison entre salles. La correspondance est meilleure pour le critère d'**EDT**, défini soit sur une plage énergétique fixe, soit sur un intervalle temporel fixe. La meilleure correspondance a été trouvée pour le critère du temps central, **ts**. Dans tous les cas, la correspondance est optimale lorsque l'on considère les mesures objectives pour la bande d'octave centrée autour de 2 kHz, indiquant une confusion perceptive entre la réverbérance des fréquences aiguës et la réverbérance globale.

La mauvaise correspondance pour les changements à l'intérieur d'une salle peut être liée, d'une part, à l'importance de l'effet de l'interaction acoustique/œuvre et, d'autre part, à la différence d'occupation des salles entre les mesures objectives (salles vides) et les tests d'écoute (salles pleines). En considérant des sources de mesures (reconstituées) ayant une directivité adaptée à l'effectif orchestral employé pour chaque œuvre, la correspondance se trouve fortement améliorée. En ce qui concerne l'occupation de la salle, il serait fortement souhaitable de procéder à des mesures salles pleines.

contraste : la perception du contraste n'est pas liée à *un* seul critère objectif. Trois influences principales ont été trouvées pour les réponses à cette question :

- le niveau sonore, surtout pour les fréquences aiguës ;
- la prépondérance de l'énergie d'une plage temporelle précoce dans la réponse de la salle, par rapport aux énergies des plages temporelles avoisinantes, augmente la perception du contraste. Il s'agit de la comparaison du critère de **PEE**, l'énergie précoce perçue, avec l'énergie des plages temporelles avoisinantes ;

- une séparation dans l'énergie du champ réverbéré de la salle : l'énergie “précoce” du champ réverbéré, **R3** (entre 80 ms et 160 ms), a un effet fortement nuisible sur la perception du contraste. Par contre, l'énergie tardive du champ réverbéré augmente la perception du contraste.

Un critère, nommé **CONTR**, intégrant les trois influences, a été défini. La comparaison de l'énergie précoce perçue **PEE** avec l'énergie des plages temporelles avoisinantes rapproche le critère de **CONTR** au critère de **dANG2**, défini par J.-P. Jullien. Par contre, aucune influence spatiale n'a été trouvée pour la question sur le contraste, ni de corrélation négative entre le critère de **CONTR** et la question sur l'enveloppement sonore. La question concernant le contraste semble donc correspondre à un facteur perceptif lié aux détails de la distribution *temporelle* de l'énergie — et non à un facteur mélangeant les aspects temporels et spatiaux ;

balance générale : les sujets n'avaient aucune difficulté à répondre à la question sur la balance générale et leurs réponses sont très pertinentes. Cette question figure très haut dans la hiérarchie — elle est souvent liée au deuxième axe d'une analyse multidimensionnelle. Néanmoins, il n'a pas été possible de trouver une bonne correspondance entre les réponses et des critères acoustiques. Deux éléments semblent contribuer à cette faiblesse de correspondance :

- plusieurs influences perceptives se trouvent mêlées dans les réponses sur la balance générale: déséquilibres spatiaux (gauche/droite comme avant/arrière), non-homogénéité des différentes sections de l'orchestre, déséquilibre spectral. Dans ce sens, la question sur la balance générale ne peut pas être considérée comme un *facteur perceptif* ;
- un manque de critères acoustiques adaptés, dû à des limitations du protocole de mesures utilisé.

pâteux : le défaut de “pâteux” est lié à un manque de définition sur un ou plusieurs instruments de l'effectif orchestral. Ce manque de définition est dû à un déséquilibre fréquentiel de la réponse de la salle: il s'agit d'un manque de fréquences aiguës dans le début de la réponse de la salle; un surplus de fréquences aiguës par rapport aux fréquences graves dans la réponse tardive de la salle augmente davantage le risque d'un son pâteux.

Il est intéressant de noter que cette évolution du spectre est identique à celle que l'on peut observer lorsqu'on est assis non plus face mais *derrière* un instrument directif. On pourrait aussi imaginer l'impression de pâteux que produirait une enceinte dont le début de la réponse manque de fréquences aiguës, cette partie du spectre arrivant en force plus tardivement ;

heurté : ce défaut traduit le risque d'écho ou, au moins, d'un son “heurté”, manquant de fluidité.

Par rapport au modèle objectif de la perception de la qualité acoustique, cette question est liée avec le critère de **dANG1**. Il est intéressant de noter qu'une *faible* valeur de ce critère est préférée, dans les tests en laboratoire comme dans les tests en salles. Trop d'énergie latérale très précoce peut avoir des effets néfastes sur la localisation des sources et sur la perception des attaques des instruments, et donc mener à un son heurté.

Par ailleurs, cette question peut être rapprochée de la notion de “diffusion” dont parle Beranek ([Ber62, Ber92]). La faiblesse de la correspondance objectif/perceptif sur cette question démontre que la définition des critères disponibles liés à cette notion est insuffisante. Il serait fortement souhaitable de travailler sur la définition d'un critère objectif caractérisant l'effet d'un manque de diffusion dans une salle ;

effets fréquentiels : les analyses n'ont pas permis de dégager les influences exactes d'éventuels déséquilibres fréquentiels. Il semble que, de nouveau, les pentes fréquentielles sont plus pertinentes perceptivement lorsque l'on considère l'énergie précoce et l'énergie tardive *séparément*. Les influences des pentes des critères **TR** et **EDT** restent incertaines ;

effets spatiaux : dans la littérature de ces dernières années, les critères liés à l'impression d'espace ainsi que la division de l'impression d'espace en différents sous-aspects occupent une place importante.⁷ Ces critères ont également été souvent liés à la préférence subjective. Leo L. Beranek, dans la nouvelle édition de son livre *Music, Acoustics & Architecture*, à paraître en juillet 1995, identifie même le critère **IACC** comme *le* critère faisant toute la différence entre une bonne salle et une salle excellente. Comment se fait-il qu'aucun de ces critères n'apparaît dans l'analyse des données décrite dans ce document ? Certes, le critère de **IACC** n'a pas été mesuré lors des mesures objectives dans les salles, et le critère de **LE** n'a été mesuré que pour la direction d'émission *face*. Mais néanmoins, ce débat — ou au moins l'ampleur du débat et le fait que ces critères sont présentés comme faisant **seuls** la qualité d'une salle — nous paraît dangereux.

Dans le modèle de réduction du nombre des questions indépendantes, *aucune* question liée à l'impression n'a été retenue.⁸ Les aspects perceptifs liés à l'impression d'espace sont très importants et influencent la préférence subjective, maintes expériences le prouvent. Mais le modèle de la correspondance entre les réponses aux questions et les critères acoustiques présenté dans ce document — certes uniquement valable pour les données correspondantes — fonctionne même sans avoir à prendre en compte les critères liés à l'impression d'espace, ce qui infirme l'hypothèse que **IACC** pourrait être *le* critère assurant la qualité infaillible d'une salle.

Lorsqu'on analyse plus en détail les différents critères liés aux aspects importants de la perception, on remarque que le critère de **IACC** est *objectivement* corrélé à plusieurs d'entre eux, ce qui pourrait expliquer la bonne corrélation globale de ce critère à la préférence subjective :

- le critère de l'énergie perçue du son direct (**PEE**) : on avait vu à plusieurs reprises l'importance primordiale de ce critère, assurant une bonne perception de la puissance, du contraste, et donc de la présence des sources. Il existe un lien entre le critère **IACC** et le critère **PEE**, même si le critère d'**IACC** n'a pas du tout été conçu pour cela : **IACC** mesure l'importance des réflexions, surtout latérales, par rapport au son direct. Pour une faible valeur d'**IACC**, il est donc nécessaire qu'il y ait beaucoup de réflexions. Ainsi, la valeur du critère **PEE**, pour les places où le son direct objectif n'est pas prédominant — et il s'en trouve beaucoup dans une grande salle de concert —, restera toujours relativement élevée ;
- on avait vu que l'énergie des premières ou des secondes réflexions est souvent supérieure à l'énergie du son direct objectif. Pour éviter les problèmes d'écho et de colorations, il faut donc que les réflexions soient, de préférence, diffuses et latérales. On fera surtout référence à l'excellente discussion des effets des réflexions dans le premier article de Mike Barron sur l'importance des réflexions latérales, [Bar71] ;
- une forte amplification de la salle, de manière générale, est toujours préférée. Pour que la valeur d'**IACC** soit faible, il faut qu'il y ait beaucoup d'énergie dans les réflexions latérales précoces, et donc que la largeur de la salle soit faible. Habituellement, cela

7. Pour une discussion des critères — surtout **IACC** et **LE** ou l.e.f., mais également les critères de la fluctuation de la localisation apparente des sources — cf. les chapitres 2.11 à 2.13 ou [BM81, Sie73, And85, Gri92a, Gri93, Ber92, Ber95] ; pour une discussion des aspects perceptifs liés à l'impression d'espace — largeur apparente de la source (**ASW**) et enveloppement — cf. les chapitres 2.12 et 3.4 ou [Mar67, Bar71, SBS93, BS95, HBO95].

8. Pour la campagne européenne, seule la question de l'enveloppement a été posée. Pour les tests d'écoute à La Villette, une question sur la largeur apparente des sources a également été posée. Il s'avère que les réponses à cette question sont assez indépendantes des réponses aux autres questions — mais ces réponses ne sont pas non plus liées aux réponses sur la question de la préférence subjective !

va de pair avec un nombre de places limité et donc une forte amplification de la salle;⁹

préférence subjective : les coefficients du modèle de réduction pour la question sur la préférence subjective montrent que celle-ci est influencée par presque *toutes* les questions d'entrée. On conclura que la préférence subjective d'une salle est déterminée par la qualité sur *plusieurs* aspects différents à la fois, comme cela a déjà été évoqué dans le chapitre d'introduction de cette thèse, par une comparaison avec la qualité d'un violon.

Ce document ne décrit pas un travail achevé. Il s'agissait de fournir les résultats intermédiaires d'un travail s'inscrivant dans la recherche d'une meilleure description des effets liés à la perception de la qualité acoustique d'une salle. Même si nous avons pénétré quelques-uns des secrets de la perception, beaucoup nous échappent encore.

Mais les analyses et les discussions ont également permis de dégager quelques pistes pour une continuation de ce travail. Nous avons déjà parlé de la possibilité et de l'intérêt d'un modèle objectif décrivant l'influence de l'œuvre musicale et de son effectif orchestral.

Il nous semble nécessaire d'améliorer le protocole de mesures par rapport à celui que nous avons utilisé dans nos tests et qui nous a limité dans nos analyses.

Il serait pertinent de procéder à la validation et une éventuelle optimisation des critères proposés par un retour en situation contrôlée de laboratoire, en utilisant par exemple le *spatialisateur* développé au sein de l'équipe acoustique des salles de l'Ircam.

Enfin, il faudrait mettre en pratique le modèle objectif de la perception de la qualité acoustique, en utilisant les valeurs et les tendances sur la préférence subjective dégagées dans ce document, pour optimiser les critères de construction d'une salle et procéder à l'évaluation perceptive de projets de construction de salles.

9. Un autre élément de réponse se trouve dans le fait que les valeurs de préférence de Beranek sont recueillies par des interviews avec des chefs d'orchestres. Une faible largeur de la salle au niveau de la scène orchestrale a des avantages évidents pour la sonorité de la salle à l'endroit du chef d'orchestre.

Annexe A

Définition des critères objectifs

Les formules des critères objectifs utilisés dans ce document sont explicitées dans cet annexe. Une grande partie des définitions a déjà été donnée dans le text, elles seront redonnées ici afin de faciliter la lecture de ce document.

A.1 Précritères (découpage de la réponse impulsionnelle effectué par le logiciel de mesure AMS)

$$OD = \int_{t=0ms}^{t=20ms} p^2 dt; \quad (A.1)$$

$$R1 = \int_{t=20ms}^{t=40ms} p^2 dt; \quad (A.2)$$

$$R2 = \int_{t=40ms}^{t=80ms} p^2 dt; \quad (A.3)$$

$$R3 = \int_{t=80ms}^{t=160ms} p^2 dt; \quad (A.4)$$

$$R4 = \int_{t=160ms}^{t=\infty} p^2 dt. \quad (A.5)$$

Les frontières temporelles ne sont pas abruptes, mais réalisées par des “cross-overs” (pondérations) d’une longueur temporelle de 5 ms.

Une énergie précoce (**Oxx**), indiqué par le préfix **O** suivi par la borne temporelle supérieure, est définie comme :

$$Oxx = 10 * \log_{10} \left(\int_{t=0ms}^{t=xxms} p^2 dt \right), \quad (A.6)$$

par exemple l’énergie avant 80 ms (**O80**) :

$$O80 = 10 * \log_{10} \left(\int_{t=0ms}^{t=80ms} p^2 dt \right); \quad (A.7)$$

de la même manière on définit une énergie tardive (**Rxx**), indiqué par le préfix **R** suivi par la borne temporelle inférieure :

$$Rxx = 10 * \log_{10} \left(\int_{t=xxms}^{t=\infty} p^2 dt \right), \quad (A.8)$$

par exemple l'énergie après 80 ms (**R80**) :

$$R80 = 10 * \log_{10} \left(\int_{t=80ms}^{t=\infty} p^2 dt \right). \quad (A.9)$$

A.2 Critères issus de la littérature

Critères de l'équipe de Dresde : **C80** et **R**

$$C80 = 10 \log_{10} \frac{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p^2}{\int_{t=80ms}^{t=\infty} p^2} dB. \quad (A.10)$$

$$R = 10 \log_{10} \frac{\int_{t=25ms}^{t=\infty} p_{omni}^2 - \int_{t=25ms}^{t=80ms} p_{cardio}^2}{\int_{t=0ms}^{t=25ms} p_{omni}^2 + \int_{t=25ms}^{t=80ms} p_{cardio}^2} dB. \quad (A.11)$$

On donne également la formule exacte du “wirksamer Hallabstand”, la “distance effective de réverbération”, d'après la thèse de U. Lehmann [Leh75], en incluant les termes de correction :

$$H_w = 1/R = 10 \log_{10} \frac{E_o + E_{ef}}{E_{er} + E_n} dB + K'_e + K'_r + K'_T \quad (A.12)$$

avec :

o : son direct

ef : énergie précoce frontale

er : énergie précoce non frontale

n : énergie de la réverbération tardive

K : corrections; pour le temps de réverbération K_T , pour le rapport entre l'énergie précoce frontale et non-frontale (si ce rapport est trop différent d'unité) K_e , et pour une diffusion insuffisante de l'énergie précoce non frontale K_r .

Critères liés à l'impression d'espace : l.e.f., LE et IACC

Pour l'efficacité latérale il y a une formule théorique ([BM81]) :

$$l.e.f. = L_f = \frac{\int_{t=5ms}^{t=80ms} p^2 \cos \phi}{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p^2}, \quad (A.13)$$

ainsi que des formules pour le calcul à partir des mesures :

$$l.e.f. = \frac{\int_{t=5ms}^{t=80ms} p_{fig.8}^2}{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p_{omni}^2}, \quad (A.14)$$

ou, en s'approchant de la formule théorique ([Kle89]),

$$l.e.f. = \frac{\int_{t=5ms}^{t=80ms} p_{omni} * p_{fig.8}}{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p_{omni}^2}. \quad (A.15)$$

L'efficacité latérale peut également être exprimée en dB :

$$LE = 10 * \log_{10}(\text{lef}) = 10 * \log_{10}\left(\frac{\int_{t=5ms}^{t=80ms} p_{fig.8}^2}{\int_{t=0ms}^{t=80ms} p_{omni}^2}\right). \quad (\text{A.16})$$

Corrélation inter-aurale (IACC: InterAural Cross Correlation) :

$$IACC(\tau) = \frac{\int (p_{gauche}(t) * p_{droite}(t + \tau))dt}{\sqrt{\int p_{gauche}^2 * \int p_{droite}^2}}, \text{ avec} \quad (\text{A.17})$$

$$IACC = \max(|IACC(\tau)|), -1ms \leq \tau \leq 1ms; \quad (\text{A.18})$$

ou bien, en considérant $IACC(t_1, t_2)$ sur une plage temporelle :

$$IACC_{t_1, t_2}(\tau) = \frac{\int_{t_1}^{t_2} (p_{gauche}(t) * p_{droite}(t + \tau))dt}{\sqrt{\int_{t_1}^{t_2} p_{gauche}^2 \int_{t_1}^{t_2} p_{droite}^2}}, \quad (\text{A.19})$$

$$IACC_{t_1, t_2} = \max(|IACC_{t_1, t_2}(\tau)|), -1ms \leq \tau \leq 1ms. \quad (\text{A.20})$$

Critères de clarté

Le rapport signal sur bruit de Lochner & Burger est défini comme :

$$S/B = 10 \log_{10} \frac{kE_u}{kE_n + L_b}, \quad (\text{A.21})$$

$$\text{où } E_u = \int_{0ms}^{95ms} a(t)p^2(t)dt \quad \text{et} \quad E_n = \int_{95ms}^{\infty} p^2(t)dt$$

la pondération $a(t)$ est donnée par :

$$a(t) = \begin{cases} 1 & \text{pour } 0 \leq t \leq 35ms \\ 1 - \frac{(t-35)}{60} & \text{pour } 35 < t \leq 95ms \\ 0 & \text{pour } t > 95ms. \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

L_b est l'énergie du bruit ambiant et k une pondération de l'importance perceptive du bruit ambiant.

D, le critère de *définition* ("Deutlichkeit"), d'après Thiele, [Thi53] :

$$D = \int_{t=0ms}^{t=50ms} p^2 dt / \int_{t=0ms}^{t=\infty} p^2 dt. \quad (\text{A.23})$$

Beraneck et Schultz ([BS65]) ont défini un critère nommé "ratio of reverberant sound energy to direct sound energy", souvent appelé "Hallmaß" (**H**) :

$$H = 10 * \log_{10}\left(\int_{t=50ms}^{t=\infty} p^2 dt / \int_{t=0ms}^{t=50ms} p^2 dt\right) \quad (\text{A.24})$$

Les deux critères **D** et **H** sont liés par l'équation suivante :

$$H = 10 * \log_{10}\left(\frac{1-D}{D}\right) \quad (\text{A.25})$$

Kürer [Kür72] a défini le critère du temps central (“Schwerpunktzeit”) t_s ou ts , le premier moment de la réponse impulsionnelle :

$$t_s = ts = \frac{\int_{0ms}^{\infty} t * p^2 dt}{\int_{0ms}^{\infty} p^2 dt}. \quad (\text{A.26})$$

Dans ce document, les trois derniers critères sont calculés à partir des précritères, définis ci-dessus, en utilisant les formules suivantes :

$$D = \int_{t=0ms}^{t=40ms} p^2 dt / \int_{t=0ms}^{t=\infty} p^2 dt \quad (\text{A.27})$$

$$H = 10 * \log_{10}\left(\frac{\int_{t=40ms}^{t=\infty} p^2 dt}{\int_{t=0ms}^{t=40ms} p^2 dt}\right) \quad (\text{A.28})$$

$$ts = \frac{(30 \text{ ms} * R1 + 60 \text{ ms} * R2 + 110 \text{ ms} * R3 + R4 * (160 \text{ ms} + TR/13.8))}{(OD + R1 + R2 + R3 + R4)} \quad (\text{A.29})$$

Pour les critères de **D** et de **H** il s’agit de changer la frontière temporelle de 50 ms pour une frontière temporelle à 40 ms. Pour le critère du temps central il s’agit de “pondérer” les énergies des plages temporelles par le “médián” temporelle de la plage temporelle et de calculer un temps central sur la partie tardive de la réponse de la salle (en supposant une décroissance exponentielle).

En fait, le programme AMS donne également les temps centraux pour les plages temporelles de **OD**, **R1** ainsi que **R2** et **R3**, nommés **ECT0**, **ECT1** et **ECT2** (**ECT** pour “early central time”). Par contre, pour **R4**, on est toujours obligé de supposer une décroissance parfaitement exponentielle. On a donc également calculé un critère **ts’** en utilisant les différents **ECT**. Les valeurs des deux critères sont quasiment identiques et les performances dans la correspondance objectif/perceptif absolument équivalentes :

$$ts' = \frac{ECT0 * OD + ECT1 * R1 + ECT2 * (R2 + R3) + R4 * (160 \text{ ms} + TR/13.8)}{(OD + R1 + R2 + R3 + R4)} \quad (\text{A.30})$$

Lehmann ([Leh76]) a défini le critère de l’amplification de la salle, donc l’énergie acoustique de la réponse impulsionnelle, référencée par rapport à la puissance acoustique de la source (mesurée à 1 m, la distance de la mesure de référence est indiquée dans la formule suivante comme un “radius de référence” r_S variable) :

$$G = 10 * \log_{10}\left(\frac{\int_{0ms}^{\infty} p^2 dt}{\left(\int_{0ms}^{\Delta t} p^2(r_S) dt\right) * (4\pi r_S^2 / 1 \text{ m}^2)}\right). \quad (\text{A.31})$$

A.3 Critères du laboratoire d'acoustique des salles à l'Ircam

A.3.1 Critères de la thèse de Catherine Lavandier

$$ZDIR = 10 * \log_{10} \left(\int_{t=0ms}^{t=40ms} p_{cardioide_{avant}}^2 dt \right). \quad (A.32)$$

L'énergie des premières réflexions est définie par le critère **REF** :

$$REF = 10 * \log_{10} \left(\int_{t=5ms}^{t=80ms} p_{omni}^2 dt - \int_{t=60ms}^{t=80ms} p_{cardioide_{arriere}}^2 dt \right), \quad (A.33)$$

menant aux critères suivants :

$$Dir/REF = 10 * \log_{10} \int_{t=0ms}^{t=5ms} p_{omni}^2 dt - REF, \quad (A.34)$$

$$T_{cp}, \text{ le barycentre en temps des réflexions définies par } REF, \quad (A.35)$$

$$ETA, \text{ l'écart-type des réflexions définies par } REF. \quad (A.36)$$

$$ANG \text{ est le barycentre en angle de l'énergie associée à la source, définie par } ZDIR. \quad (A.37)$$

A.3.2 Critères définis par Jean-Pascal Jullien

Energie précoce

$$DirAMS = 10 * \log_{10}(OD + R1 + 0.5 * R2), \quad (A.38)$$

$$DirE = 10 * \log_{10}(OD + R1 + R2[R2 > O40_{lin}] + 0.18 * R2[R2 \leq O40_{lin}]), \quad (A.39)$$

ou, en utilisant la comparaison des contributions énergétiques :

$$\begin{aligned} DirE &= 10 * \log_{10}(\max(O40_{lin}, R2) + 0.18 \min(O40_{lin}, R2)) \\ &= 10 * \log_{10}(\max(\int_{0ms}^{40ms} p^2 dt, \int_{40ms}^{80ms} p^2 dt) + \min(\int_{0ms}^{40ms} p^2 dt, \int_{40ms}^{80ms} p^2 dt)). \end{aligned} \quad (A.40)$$

Deux éventuelles améliorations ont été proposé, la première proposant une élongation temporelle de **R2** de 20 ms, calculée comme intégration partielle de **R3**, avec un facteur multiplicatif de 0,2 :

$$DirEt = \begin{cases} 10 * \log_{10}(O40_{lin} + 0.18 * (R2 + 0.2 * R3)), & \text{pour } O40_{lin} > R2 \\ 10 * \log_{10}(R2 + 0.2 * R3 + 0.18 * O40_{lin}), & \text{pour } O40_{lin} < R2; \end{cases} \quad (A.41)$$

la deuxième intégrant une pondération spatiale sur **R2**, due à la différence entre la réponse en champ libre et la réponse en champ diffus des fonctions de transfert de l'oreille externe (HRTF's), enlevant 1 dB à l'énergie de **R2** :

$$R2 \implies R2p = 0.8 * R2 \quad (A.42)$$

$$DirEp = 10 * \log_{10}(OD + R1 + R2p[R2p > O40_{lin}] + 0.18 * R2p[R2p \leq O40_{lin}]), \quad (A.43)$$

Energie tardive, incluant les phénomènes de masquage postérieur

$$Rev = 10 * \log_{10}(Rr80_280 + R280), \quad (A.44)$$

où $Rr80_280 = R80_280_{\text{non-masqué}} = R[80 \text{ ms}, 280 \text{ ms}]_{\text{non-masqué}}$ est l'énergie restante dans la plage temporelle [80 ms, 280 ms], après application du masquage par le son direct étendu :

$$Rr80_280 = 10^{\log_2(2^{\log_{10}(R80_280)} - 2^{\log_{10}(0.08 * O40_{in})})}, \quad (A.45)$$

et $R280 = R[280 \text{ ms}, \infty[$ est l'énergie arrivant plus tard que 280 ms après le son direct :

$$R280 = \int_{t=280ms}^{t=\infty} p^2 dt. \quad (A.46)$$

$$RevR3 = 10 * \log_{10}(RrR3 + Rr160_280 + R280), \quad (A.47)$$

où $Rr160_280 = R160_280_{\text{non-masqué}} = R[160 \text{ ms}, 280 \text{ ms}]_{\text{non-masqué}}$ est l'énergie restante dans la plage temporelle [160 ms, 280 ms], après application du masquage par le son direct étendu avec un facteur multiplicatif de 0,01 (au lieu de 0,08 pour R80_280), ce qui équivaut une diminution de 20 dB (au lieu de 11 dB) ; $RrR3 = R3_{\text{non-masqué}} = R[80 \text{ ms}, 160 \text{ ms}]_{\text{non-masqué}}$ est l'énergie restante dans la plage temporelle [80 ms, 160 ms], après application du masquage par le son direct étendu avec un facteur multiplicatif de 0,25 (ce qui équivaut une diminution de 6 dB).

Réverbérance, pente de la décroissance intégrée

$$EDT = (t[-15 \text{ dB}] - t[0 \text{ dB}]) * 4 \quad (A.48)$$

$$EDT' = EDT15_{global} + 0.5 * (EDT15_{HF} - EDT15_{MF}), \quad (A.49)$$

$$\begin{aligned} D2 &= 10 * \log_{10}\left(\frac{R2 + R3 + R4}{R3 + R4}\right) \\ &= 10 * \log_{10}\left(\frac{\int_{t=40ms}^{\infty} p^2 dt}{\int_{t=80ms}^{\infty} p^2 dt}\right) \end{aligned} \quad (A.50)$$

Critères spatiaux

$$ANG1 = 10 * \log_{10}(R1 + 0.23 * R2), \quad (A.51)$$

et

$$dANG2 = 10 * \log_{10}(R1 + R2 + 0.2 * R3) - 10 * \log_{10}(d) \quad (A.52)$$

$$= ANG2 - 10 * \log_{10}(d), \quad (A.53)$$

avec

$$d = \max(OD, R1). \quad (A.54)$$

Pour le critère de **ANG1**, une optimisation par rapport aux facteurs perceptifs a été constatée en définissant le critère **dANG1**, défini comme :

$$dANG1 = ANG1 - DirE. \quad (A.55)$$

azimut	0°	50°	130°	180°	diffus
R1	0.01	0.33	0.28	-	1.1
R2	0.01	0.33	0.28	0	0.2

TAB. A.1 - *Pondérations spatiales, en fonction de la date d'arrivée de la réflexion et de l'angle d'arrivée, pour le critère ANG1. Le signe "-" signifie des valeurs non accessibles, ces cas n'ont pas apparus dans les tests.*

azimut	0°	50°	130°	180°	diffus
R1	0.3	0.5	0.7	-	0.3
R2	0.3	0.4	0.7	0.7	1.5
R3	-	-	-	-	1.5

TAB. A.2 - *Pondérations spatiales, en fonction de la date d'arrivée de la réflexion et de l'angle d'arrivée, pour la partie ANG2 du critère dANG2. Le signe "-" signifie des valeurs non accessibles, ces cas n'ont pas apparus dans les tests.*

Critères fréquentiels

$$\Delta\text{TR}_{BF} = (\text{TR}_{63Hz} - \text{TR}_{\overline{125Hz...8kHz}})/4 \quad (\text{A.56})$$

$$\Delta\text{TR}_{HF} = (\text{TR}_{\overline{4kHz,8kHz}} - \text{TR}_{1kHz})/2.5 \quad (\text{A.57})$$

$$\Delta\text{DirE}_{BF} = (\text{DirE}_{63Hz} - \text{DirE}_{1kHz})/4 \quad (\text{A.58})$$

$$\Delta\text{DirE}_{HF} = (\text{DirE}_{8kHz} - \text{DirE}_{1kHz})/3 \quad (\text{A.59})$$

$$\Delta\text{TR}_{BF} = (\text{TR}_{BF} - \text{TR}_{MF})/2 \quad (\text{A.60})$$

$$\Delta\text{TR}_{HF} = (\text{TR}_{HF} - \text{TR}_{MF})/2 \quad (\text{A.61})$$

$$\Delta\text{DirE}_{BF} = (\text{DirE}_{BF} - \text{DirE}_{MF})/2 \quad (\text{A.62})$$

$$\Delta\text{DirE}_{HF} = (\text{DirE}_{HF} - \text{DirE}_{MF})/2 \quad (\text{A.63})$$

A.3.3 Critères utilisés et/ou définis dans le chapitre 9 de ce document

Formules du son direct perçu, d , et de $d1$:

$$d_{lin} = \max(OD, R1), \quad (\text{A.64})$$

$$d1_{lin} = \min(OD, R1), \quad (\text{A.65})$$

et

$$d = 10 * \log_{10}(\max(OD, R1)) \quad (\text{A.66})$$

$$d1 = 10 * \log_{10}(\min(OD, R1)) \quad (\text{A.67})$$

Formules de l'énergie précoce perçue, **PEE** ou **DirE'**, et de l'énergie des "plages avoisinantes" **ddd1** et **ddd2** :

$$\text{DirE}'_{lin} = \max(OD, R1, R2), \quad (\text{A.68})$$

$$\text{ddd1}_{lin} = \min(OD, R1, R2) \quad (\text{A.69})$$

$$\text{ddd2}_{lin} = \min(d_{lin}, R2) = \min(\max(OD, R1), R2). \quad (\text{A.70})$$

et

$$DirE' = 10 * \log_{10}(\max(OD, R1, R2)) \quad (A.71)$$

$$ddd1 = 10 * \log_{10}(\min(OD, R1, R2)) \quad (A.72)$$

$$ddd2 = 10 * \log_{10}(\min(\max(OD, R1), R2)) \quad (A.73)$$

avec toutes les énergies **OD**, **R1** et **R2** en linéaire.

Le critère de **PEE** (ou **DirE'** doit être rapporté à la puissance de la source de mesure :

$$PEE = \text{Perceived Early Energy} = 10 * \log_{10} \left(\frac{\max \left(\int_{0ms}^{20ms} p^2 dt, \int_{20ms}^{40ms} p^2 dt, \int_{40ms}^{80ms} p^2 dt \right)}{\left(\int_{0ms}^{\Delta t} p^2(r_S) dt \right) * (4\pi r_S^2 / 1 \text{ m}^2)} \right). \quad (A.74)$$

Le critère de **CONTR**, lié à la question sur le contraste :

$$CONTR_d = G_{HF} + 0.5 * (d - d1) + (R4[dB] - R3[dB]), \quad (A.75)$$

$$CONTR = G_{HF} + 0.5 * (DirE' - ddd1) + (R4[dB] - R3[dB]), \quad (A.76)$$

en utilisant les énergies *en dB* ;

$$CONTR_d = G_{HF} + 0.5 * 10 * \log_{10} \left(\frac{d_{lin}}{d1_{lin}} \right) + 10 * \log_{10} \left(\frac{R4}{R3} \right), \quad (A.77)$$

$$CONTR = G_{HF} + 0.5 * 10 * \log_{10} \left(\frac{DirE'_{lin}}{ddd1_{lin}} \right) + 10 * \log_{10} \left(\frac{R4}{R3} \right), \quad (A.78)$$

en utilisant les énergies linéaires.

$$D3 = 10 * \log_{10} \left(\frac{R2 + R3 + R4}{R4} \right) \quad (A.79)$$

$$= 10 * \log_{10} \left(\frac{\int_{t=40ms}^{\infty} p^2 dt}{\int_{t=160ms}^{\infty} p^2 dt} \right) \quad (A.80)$$

Le critère de **PAIG**, lié à la question sur la puissance des aiguës :

$$PAIG = 10 * \log_{10} (DirE'_{lin} - 6 * ddd1_{lin} + 6 * ddd2_{lin} - 2 * R3 + 2.5 * R4), \quad (A.81)$$

Le critère de **PGRAV**, lié à la question sur la puissance des graves :

$$PGRAV = G_{MF} + 0.3 * \frac{d_{lin_{BF}}}{d1_{lin_{BF}} + R2_{BF}} + 0.6 * \frac{R3_{BF}}{R4_{BF}}. \quad (A.82)$$

Le critère de **PAT**, lié à la question sur pâteux :

$$PAT = CONTR + 0.5 * C80 - 1.5 * O80_{\Delta BF} + 0.5 * R80_{\Delta BF} - 2 * R80_{\Delta HF}. \quad (A.83)$$

Annexe B

Modèle de réduction du nombre de questions, résultats détaillés par question

Sur les prochaines pages se trouvent les résultats, détaillés par question, du modèle de réduction du nombre des questions. Par question, on donnera un tableau des coefficients de régression, trouvés *indépendamment* par matrice, et un tableau des performances de prédiction pour cette question pour les différentes matrices.

B.1 Coefficients et performances par question

coefs pour question: dyn	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.22	0.01	0.33	-0.21	0.41	-0.56	0.15	0.18
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.46	0.27	-0.17	-0.49	0.10	0.56	-0.18	-0.08
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.20	0.02	0.44	0.37	0.03	0.48	-0.66	0.38
Villette: \mathcal{I}	0.20	0.03	0.11	0.04	0.24	-0.03	-0.22	0.21
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	-0.08	0.11	0.85	1.01	-0.54	1.71	-1.90	-0.04
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.66	0.10	0.04	-0.04	0.09	0.06	-0.15	0.01
Campagne: \mathcal{G}	0.74	0.08	0.23	0.20	-0.74	-0.20	0.97	0.88
Campagne: \mathcal{I}	0.48	0.03	0.01	0.02	0.17	0.14	-0.27	0.08
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.76	0.27	0.09	0.03	-0.07	0.03	0.30	0.17
coefs réduits et optimises	0.43	0.10	0.00	0.00	0.14	0.00	0.00	0.20

performances: dyn	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.14	0.08	0.09	0.10	0.66	0.61	0.55
Villette: \mathcal{G}	0.09	0.00	0.02	0.03	1.00	0.90	0.83
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.11	0.05	0.13	0.07	0.70	0.00	0.58
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.10	0.04	0.13	0.06	0.76	0.00	0.61
Villette: \mathcal{I}	0.28	0.22	0.17	0.24	0.45	0.62	0.40
Villette: \mathcal{R}	0.17	0.11	0.17	0.12	0.51	0.00	0.42
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.03	0.00	0.01	0.01	0.99	0.81	0.71
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.39	0.22	0.08	0.24	0.66	0.89	0.65
Campagne: \mathcal{G}	0.37	0.08	0.01	0.16	0.88	0.98	0.79
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \mathcal{G}$	0.44	0.00	0.00	0.19	1.00	1.00	0.89
Campagne: \mathcal{I}	0.13	0.09	0.08	0.10	0.57	0.62	0.53
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.71	0.27	0.02	0.37	0.79	0.98	0.73
moyenne	0.24	0.10	0.08	0.14	0.75	0.62	0.64

TAB. B.1 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question de "dynamique".

coefs pour question: dim sub	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	-0.06	0.39	-0.05	-0.02	0.01	-0.03	0.05	0.10
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.08	0.13	-0.40	0.10	0.07	-0.40	0.51	0.05
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.27	0.21	-0.57	0.16	0.02	-0.64	-0.11	0.14
Villette: \mathcal{I}	0.01	0.20	-0.08	0.11	0.11	-0.13	-0.12	0.02
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	-0.28	0.76	-0.25	-0.32	0.39	-0.37	0.00	0.08
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.13	0.15	0.26	-0.18	-0.01	-0.07	-0.11	0.05
Campagne: \mathcal{G}	-0.28	0.41	0.81	0.27	-0.60	-0.02	0.99	0.42
Campagne: \mathcal{I}	0.17	0.10	0.00	0.05	0.04	0.10	-0.12	-0.02
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.13	0.37	0.38	-0.44	-0.12	-0.06	0.06	0.23
coefs réduits et optimises	0.0	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2

performances: dim sub	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.07	0.05	0.07	0.05	0.56	0.20	0.53
Villette: \mathcal{G}	0.01	0.00	0.01	0.02	0.96	0.00	0.55
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.06	0.04	0.10	0.06	0.49	0.00	0.29
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.06	0.03	0.10	0.08	0.66	0.00	0.15
Villette: \mathcal{I}	0.14	0.13	0.13	0.17	0.27	0.30	0.20
Villette: \mathcal{R}	0.13	0.13	0.13	0.16	0.05	0.00	0.05
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.02	0.00	0.01	0.01	0.95	0.80	0.73
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.20	0.17	0.05	0.22	0.36	0.86	0.20
Campagne: \mathcal{G}	0.26	0.04	0.01	0.07	0.92	0.98	0.85
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \mathcal{G}$	0.21	0.00	0.00	0.05	1.00	1.00	0.88
Campagne: \mathcal{I}	0.08	0.07	0.05	0.11	0.32	0.58	0.20
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.31	0.17	0.01	0.22	0.67	0.98	0.58
moyenne	0.13	0.07	0.06	0.10	0.60	0.48	0.44

TAB. B.2 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "dimension subjective".

coefs pour question: env son	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.30	0.10	0.01	0.32	-0.15	0.06	-0.16	0.07
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.19	0.13	-0.21	0.42	0.17	-0.44	0.18	-0.11
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.14	0.36	0.00	0.27	0.44	-1.44	0.00	-0.27
Villette: \mathcal{I}	0.29	0.08	0.09	0.10	0.11	-0.31	0.06	0.08
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	1.01	-0.52	-0.01	-0.12	-0.44	-3.03	1.93	0.24
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.57	0.26	0.10	-0.40	0.08	0.11	-0.06	-0.04
Campagne: \mathcal{G}	0.63	0.06	-0.80	0.44	0.13	-0.09	-0.10	0.02
Campagne: \mathcal{I}	0.22	0.27	0.22	0.08	0.05	0.14	-0.09	0.00
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.77	0.13	-0.01	-0.49	0.03	0.04	0.26	0.09
coefs reduits et optimises	0.20	0.15	0.00	0.20	0.10	-0.20	0.00	0.00

performances: env son	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.10	0.08	0.15	0.09	0.48	0.00	0.41
Villette: \mathcal{G}	0.02	0.00	0.03	0.01	1.00	0.00	0.69
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.06	0.04	0.22	0.05	0.55	0.00	0.50
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.08	0.05	0.22	0.06	0.65	0.00	0.48
Villette: \mathcal{I}	0.27	0.23	0.30	0.24	0.37	0.00	0.34
Villette: \mathcal{R}	0.30	0.41	0.30	0.24	-0.09	0.00	0.33
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.03	0.00	0.02	0.02	0.94	0.73	0.59
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.39	0.29	0.18	0.31	0.54	0.74	0.51
Campagne: \mathcal{G}	0.19	0.06	0.03	0.09	0.82	0.92	0.75
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.14	0.00	0.01	0.06	1.00	0.97	0.77
Campagne: \mathcal{I}	0.12	0.09	0.18	0.09	0.53	0.00	0.50
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.48	0.26	0.05	0.36	0.67	0.95	0.50
moyenne	0.18	0.13	0.14	0.13	0.62	0.36	0.53

TAB. B.3 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur "l'enveloppement sonore".

coefs pour question: int	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.19	-0.01	0.02	0.35	-0.04	-0.73	-0.38	0.08
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.05	0.08	0.02	0.14	-0.06	-0.26	-0.66	-0.11
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.18	0.02	-0.21	0.08	-0.28	-0.37	-0.42	0.01
Villette: \mathcal{I}	0.02	-0.07	0.12	0.03	0.13	-0.13	-0.15	0.13
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.36	-0.05	-0.52	0.83	-0.13	1.53	-2.09	0.37
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.15	0.07	0.11	0.11	0.11	0.13	0.11	0.04
Campagne: \mathcal{G}	0.28	-0.03	-0.59	0.01	0.09	0.16	-0.16	0.30
Campagne: \mathcal{I}	0.02	0.11	-0.02	0.25	0.09	0.01	-0.14	0.08
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.16	0.01	-0.09	0.04	0.17	0.21	0.07	0.11
coefs reduits et optimises	0.10	0.00	0.00	0.20	0.20	-0.49	-0.55	0.15

performances: int	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.09	0.05	0.07	0.06	0.65	0.42	0.58
Villette: \mathcal{G}	0.04	0.00	0.01	0.01	1.00	0.79	0.88
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.04	0.03	0.11	0.04	0.42	0.00	0.35
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.07	0.06	0.11	0.08	0.39	0.00	0.18
Villette: \mathcal{I}	0.16	0.15	0.14	0.15	0.31	0.38	0.29
Villette: \mathcal{R}	0.14	0.11	0.14	0.10	0.28	0.00	0.38
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.04	0.00	0.01	0.01	0.97	0.91	0.84
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.19	0.15	0.09	0.19	0.46	0.74	0.34
Campagne: \mathcal{G}	0.08	0.03	0.02	0.04	0.79	0.89	0.72
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.04	0.00	0.00	0.02	1.00	0.96	0.81
Campagne: \mathcal{I}	0.07	0.06	0.09	0.08	0.39	0.00	0.30
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.21	0.14	0.02	0.17	0.56	0.94	0.52
moyenne	0.10	0.07	0.07	0.08	0.60	0.50	0.52

TAB. B.4 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur "l'intimité".

coefs pour question: chal	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.10	-0.05	0.25	0.27	-0.04	-0.54	-0.54	0.04
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.13	0.21	0.09	0.29	0.16	-0.63	-0.76	-0.24
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	-0.08	0.12	-0.18	0.35	0.18	-0.70	-0.10	-0.03
Villette: \mathcal{I}	0.07	0.02	0.03	0.29	0.05	0.00	-0.11	0.19
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.16	-0.22	0.25	0.46	-0.16	-0.43	0.11	0.10
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.27	0.07	-0.07	0.19	-0.05	0.16	0.01	0.08
Campagne: \mathcal{G}	0.27	0.12	-0.26	0.49	-0.37	0.27	0.01	0.21
Campagne: \mathcal{I}	0.04	0.10	-0.24	0.36	0.03	0.10	-0.05	0.19
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.39	0.10	-0.09	0.22	-0.16	0.15	-0.02	0.12
coefs reduits et optimises	0.20	0.12	0.00	0.50	0.00	-0.60	-0.55	0.00

performances: chal	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.07	0.03	0.07	0.04	0.69	0.00	0.64
Villette: \mathcal{G}	0.03	0.00	0.01	0.02	1.00	0.74	0.60
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.05	0.03	0.11	0.03	0.69	0.00	0.60
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.04	0.03	0.11	0.05	0.52	0.00	0.32
Villette: \mathcal{I}	0.14	0.14	0.14	0.14	0.29	0.19	0.21
Villette: \mathcal{R}	0.14	0.16	0.14	0.11	0.01	0.00	0.22
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.01	0.00	0.01	0.00	0.95	0.65	0.86
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.16	0.12	0.07	0.14	0.53	0.73	0.44
Campagne: \mathcal{G}	0.15	0.03	0.01	0.05	0.91	0.96	0.85
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.11	0.00	0.00	0.02	1.00	0.99	0.93
Campagne: \mathcal{I}	0.06	0.04	0.07	0.06	0.55	0.00	0.42
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.23	0.09	0.02	0.12	0.79	0.96	0.72
moyenne	0.10	0.05	0.06	0.07	0.66	0.44	0.57

TAB. B.5 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question de "chaleur".

coefs pour question: vie	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.00	0.03	0.42	0.10	-0.03	-0.24	-0.24	0.05
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.23	0.18	0.03	0.03	-0.05	0.11	-0.30	0.17
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.30	0.21	0.15	0.19	-0.33	-0.47	-0.45	0.14
Villette: \mathcal{I}	0.03	0.04	0.08	0.20	0.13	-0.24	-0.17	0.04
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	-0.54	0.10	0.58	0.96	0.01	2.22	-1.19	0.29
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.20	0.16	0.09	0.18	0.02	0.18	-0.29	0.10
Campagne: \mathcal{G}	0.02	0.18	0.30	0.27	0.12	0.07	0.14	0.10
Campagne: \mathcal{I}	-0.04	0.19	-0.01	0.27	0.00	0.23	-0.12	0.09
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.25	0.16	0.11	0.06	-0.01	0.12	-0.53	0.13
coefs reduits et optimises	0.17	0.20	0.13	0.14	0.00	0.00	-0.20	0.15

performances: vie	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.06	0.05	0.06	0.05	0.44	0.00	0.34
Villette: \mathcal{G}	0.04	0.00	0.01	0.01	1.00	0.82	0.91
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.04	0.03	0.09	0.03	0.62	0.00	0.60
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.08	0.05	0.09	0.06	0.67	0.00	0.57
Villette: \mathcal{I}	0.15	0.14	0.12	0.16	0.28	0.44	0.11
Villette: \mathcal{R}	0.12	0.10	0.12	0.11	-0.03	0.00	0.00
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.01	0.00	0.01	0.01	0.91	0.70	0.69
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.17	0.09	0.02	0.11	0.68	0.93	0.61
Campagne: \mathcal{G}	0.11	0.02	0.00	0.02	0.93	0.98	0.92
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.06	0.00	0.00	0.01	1.00	0.99	0.96
Campagne: \mathcal{I}	0.07	0.04	0.02	0.05	0.58	0.82	0.47
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.17	0.04	0.01	0.05	0.88	0.98	0.85
moyenne	0.09	0.05	0.05	0.05	0.66	0.56	0.58

TAB. B.6 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "vie".

coefs pour question: brill	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.08	0.11	0.54	-0.30	0.05	-0.11	-0.46	-0.01
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.32	0.29	0.25	-0.52	-0.11	0.38	-0.42	0.19
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.10	-0.12	0.41	-0.12	-0.04	0.04	-0.21	-0.08
Villette: \mathcal{I}	0.10	0.03	0.28	0.03	0.15	-0.18	-0.16	-0.01
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	-0.52	0.16	0.89	0.53	0.14	1.39	-1.34	0.10
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.08	0.14	0.34	0.02	0.17	-0.02	-0.23	0.09
Campagne: \mathcal{G}	0.15	0.04	0.59	-0.25	0.12	-0.11	0.20	0.28
Campagne: \mathcal{I}	0.21	0.19	0.12	0.15	0.10	-0.05	-0.27	0.08
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.07	0.07	0.44	-0.07	0.21	0.04	-0.22	0.06
coefs reduits et optimises	0.24	0.16	0.31	-0.26	0.30	0.00	-0.35	0.00

performances: brill	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.06	0.03	0.07	0.05	0.64	0.00	0.57
Villette: \mathcal{G}	0.03	0.00	0.01	0.01	1.00	0.71	0.92
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.05	0.01	0.11	0.02	0.88	0.00	0.77
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.03	0.02	0.11	0.04	0.50	0.00	0.28
Villette: \mathcal{I}	0.14	0.13	0.14	0.13	0.37	0.19	0.36
Villette: \mathcal{R}	0.14	0.11	0.14	0.11	0.28	0.00	0.32
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.01	0.00	0.01	0.01	0.93	0.59	0.77
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.17	0.08	0.09	0.10	0.71	0.68	0.70
Campagne: \mathcal{G}	0.06	0.01	0.02	0.02	0.95	0.87	0.86
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.03	0.00	0.00	0.01	1.00	0.94	0.87
Campagne: \mathcal{I}	0.07	0.04	0.09	0.05	0.61	0.00	0.50
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.15	0.05	0.02	0.06	0.83	0.92	0.79
moyenne	0.08	0.04	0.07	0.05	0.73	0.41	0.64

TAB. B.7 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "brillance".

coefs pour question: lourd	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.05	0.00	0.01	0.00	-0.02	0.11	0.34	0.07
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.01	-0.05	0.05	0.11	-0.09	0.05	0.31	-0.04
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.02	-0.08	-0.11	0.16	-0.13	0.14	0.82	-0.10
Villette: \mathcal{I}	0.03	0.00	-0.05	0.01	0.00	0.11	0.26	-0.01
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	-0.10	-0.10	0.47	0.13	-0.17	0.55	0.33	-0.02
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.06	0.01	-0.19	0.06	0.03	-0.02	0.32	-0.03
Campagne: \mathcal{G}	0.03	0.00	-0.21	0.13	0.13	-0.12	-0.17	-0.22
Campagne: \mathcal{I}	0.00	0.03	-0.22	0.16	0.07	-0.01	0.31	-0.05
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.08	-0.02	-0.19	-0.02	0.00	-0.06	0.20	-0.07
coefs reduits et optimises	0.00	-0.04	0.00	0.11	-0.08	0.00	0.42	-0.04

performances: lourd	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.02	0.01	0.04	0.02	0.36	0.00	0.24
Villette: \mathcal{G}	0.00	0.00	0.01	0.00	0.98	0.00	0.56
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.01	0.01	0.05	0.01	0.58	0.00	0.56
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.03	0.01	0.05	0.02	0.77	0.00	0.75
Villette: \mathcal{I}	0.05	0.05	0.07	0.05	0.01	0.00	0.03
Villette: \mathcal{R}	0.07	0.09	0.07	0.06	-0.26	0.00	0.12
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.89	0.00	0.43
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.05	0.03	0.04	0.04	0.53	0.15	0.44
Campagne: \mathcal{G}	0.02	0.01	0.01	0.01	0.77	0.76	0.56
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.02	0.00	0.00	0.01	1.00	0.94	0.62
Campagne: \mathcal{I}	0.02	0.02	0.04	0.02	0.53	0.00	0.39
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.05	0.03	0.01	0.04	0.56	0.86	0.40
moyenne	0.03	0.02	0.03	0.02	0.56	0.23	0.42

TAB. B.8 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "lourdeur".

coefs pour question: ac	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	-0.04	-0.08	0.29	-0.26	-0.01	-0.30	0.02	-0.08
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.05	-0.01	0.21	-0.42	-0.06	0.24	-0.11	-0.09
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.03	-0.05	0.17	-0.28	-0.20	-0.22	-0.05	-0.09
Villette: \mathcal{I}	-0.01	-0.06	0.10	-0.05	-0.03	0.04	-0.01	-0.02
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.10	-0.36	0.31	0.18	-0.63	0.81	-1.14	0.06
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	-0.03	0.02	0.12	-0.09	-0.02	0.06	-0.06	-0.05
Campagne: \mathcal{G}	0.14	0.02	0.16	-0.40	-0.07	-0.03	-0.08	-0.02
Campagne: \mathcal{I}	-0.05	0.02	0.08	-0.13	-0.03	0.07	0.00	-0.02
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.02	0.02	0.10	-0.06	-0.07	0.01	-0.20	-0.04
coefs reduits et optimises	0.00	0.00	0.28	-0.28	-0.08	0.00	-0.14	-0.11

performances: ac	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.57	0.29	0.47
Villette: \mathcal{G}	0.00	0.00	0.00	0.00	0.96	0.21	0.63
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.02	0.01	0.03	0.01	0.70	0.00	0.66
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.02	0.02	0.03	0.02	0.55	0.00	0.46
Villette: \mathcal{I}	0.04	0.04	0.04	0.05	0.12	0.31	0.03
Villette: \mathcal{R}	0.04	0.04	0.04	0.03	0.14	0.00	0.26
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.00	0.00	0.00	0.01	0.85	0.72	0.17
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.02	0.02	0.01	0.03	0.20	0.83	0.16
Campagne: \mathcal{G}	0.02	0.01	0.00	0.01	0.77	0.96	0.68
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.00	0.00	0.00	0.01	1.00	0.95	0.57
Campagne: \mathcal{I}	0.01	0.01	0.01	0.02	0.30	0.65	0.21
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.01	0.01	0.00	0.03	0.45	0.92	0.31
moyenne	0.02	0.01	0.02	0.02	0.55	0.49	0.38

TAB. B.9 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur "l'acidité".

coefs pour question: agr	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.09	-0.01	0.05	-0.02	-0.04	0.16	-0.30	-0.08
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.24	-0.01	0.00	-0.13	-0.15	0.35	-0.08	0.06
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.06	-0.01	0.17	0.00	-0.13	0.45	0.00	0.12
Villette: \mathcal{I}	0.08	0.02	0.04	-0.04	-0.02	0.05	-0.13	-0.07
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.00	0.15	-0.03	-0.02	0.16	0.06	-0.26	-0.10
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.10	0.04	-0.10	-0.11	-0.06	0.02	-0.23	-0.05
Campagne: \mathcal{G}	0.10	-0.03	0.20	0.00	-0.12	0.13	0.26	-0.19
Campagne: \mathcal{I}	0.07	0.00	0.01	-0.03	-0.02	-0.01	-0.23	-0.02
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.13	0.03	-0.11	-0.13	-0.07	-0.01	-0.13	-0.07
coefs reduits et optimises	0.20	0.00	0.00	-0.10	-0.10	0.16	0.00	0.00

performances: agr	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.02	0.02	0.02	0.02	0.51	0.17	0.38
Villette: \mathcal{G}	0.01	0.00	0.00	0.01	0.99	0.83	0.84
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.02	0.01	0.03	0.01	0.69	0.00	0.67
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.02	0.01	0.03	0.02	0.50	0.00	0.30
Villette: \mathcal{I}	0.07	0.06	0.04	0.07	0.16	0.63	0.15
Villette: \mathcal{R}	0.04	0.04	0.04	0.05	0.24	0.00	-0.16
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.81	0.22	0.44
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.03	0.03	0.01	0.04	0.37	0.88	0.22
Campagne: \mathcal{G}	0.02	0.00	0.00	0.01	0.87	0.96	0.58
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	0.95	0.50
Campagne: \mathcal{I}	0.01	0.01	0.01	0.02	0.34	0.67	0.12
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.03	0.02	0.00	0.02	0.65	0.96	0.41
moyenne	0.02	0.02	0.02	0.02	0.59	0.52	0.37

TAB. B.10 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur "l'agressivité".

coefs pour question: dur	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.08	-0.05	0.07	-0.01	-0.04	0.26	-0.26	-0.08
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.11	0.01	0.11	-0.12	-0.11	0.26	-0.07	0.09
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.05	-0.01	0.08	-0.23	0.01	0.45	0.03	0.04
Villette: \mathcal{I}	0.03	0.04	0.06	-0.10	0.02	0.29	-0.11	-0.04
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.56	-0.29	-0.31	-0.28	-0.28	-1.05	0.03	-0.02
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.07	0.01	0.03	-0.03	-0.01	-0.06	-0.16	-0.09
Campagne: \mathcal{G}	0.05	-0.01	0.09	0.02	-0.11	-0.07	0.12	-0.02
Campagne: \mathcal{I}	0.11	-0.04	-0.07	0.03	0.02	-0.10	-0.11	-0.11
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.05	0.01	0.10	-0.07	-0.08	0.00	-0.04	-0.04
coefs réduits et optimises	0.12	-0.03	-0.10	-0.10	0.00	0.13	0.00	0.00

performances: dur	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.03	0.02	0.02	0.02	0.49	0.48	0.33
Villette: \mathcal{G}	0.01	0.00	0.00	0.01	1.00	0.75	0.69
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.01	0.01	0.03	0.01	0.55	0.00	0.39
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.02	0.02	0.03	0.02	0.43	0.00	0.28
Villette: \mathcal{I}	0.07	0.07	0.04	0.07	0.11	0.63	0.04
Villette: \mathcal{R}	0.04	0.04	0.04	0.04	NA	0.00	-0.25
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.90	0.59	0.25
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.03	0.03	0.00	0.03	0.24	1.00	0.22
Campagne: \mathcal{G}	0.01	0.00	0.00	0.01	0.69	1.00	0.38
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.00	0.00	0.00	0.00	1.00	1.00	0.05
Campagne: \mathcal{I}	0.02	0.02	0.00	0.02	0.44	1.00	0.28
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.02	0.01	0.00	0.02	0.46	1.00	0.19
moyenne	0.02	0.02	0.01	0.02	NA	0.62	0.24

TAB. B.11 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "dureté".

coefs pour question: pres	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.33	-0.14	0.48	0.40	0.46	-0.12	0.03	-0.02
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	-0.03	-0.19	0.67	0.16	1.02	-0.21	0.76	0.35
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.69	-0.26	0.58	0.59	0.15	-2.51	-0.38	-0.47
Villette: \mathcal{I}	0.28	-0.01	0.20	0.24	0.33	-0.33	-0.10	0.04
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.31	0.30	0.62	0.84	0.51	0.79	-1.19	-0.14
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.22	0.02	0.06	-0.01	0.08	0.01	-0.09	0.02
Campagne: \mathcal{G}	0.15	-0.04	-0.21	0.12	0.13	-0.02	-0.11	0.02
Campagne: \mathcal{I}	0.14	0.06	0.03	0.02	0.09	0.01	-0.19	0.04
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.21	-0.03	0.06	-0.07	0.02	0.01	0.02	0.08
coefs réduits et optimises	0.12	0.00	0.68	0.36	0.59	-0.60	0.00	0.00

performances: pres	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.25	0.10	0.17	0.11	0.78	0.57	0.74
Villette: \mathcal{G}	0.13	0.00	0.03	0.03	0.99	0.87	0.95
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.11	0.05	0.25	0.08	0.76	0.00	0.66
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.25	0.09	0.25	0.21	0.81	0.15	0.63
Villette: \mathcal{I}	0.42	0.33	0.33	0.34	0.48	0.46	0.44
Villette: \mathcal{R}	0.33	0.34	0.33	0.25	0.45	0.00	0.40
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.12	0.00	0.02	0.02	1.00	0.93	0.95
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.06	0.03	0.18	0.22	0.72	0.00	0.58
Campagne: \mathcal{G}	0.01	0.00	0.03	0.11	0.81	0.00	0.69
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.01	0.00	0.01	0.08	1.00	0.00	0.70
Campagne: \mathcal{I}	0.02	0.01	0.18	0.07	0.63	0.00	0.52
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.05	0.02	0.05	0.29	0.71	0.00	0.56
moyenne	0.14	0.08	0.15	0.15	0.76	0.25	0.65

TAB. B.12 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "présence". Attention au changement de l'échelle (échelle de 1 à 6 unités perceptives à La Villette, échelle de 1 à 2 unités perceptives pour la campagne européenne). Les corrélations sont, dans les deux cas, relativement bonnes, dû au fait que la corrélation n'est pas sensible à un facteur multiplicateur. Par contre, la variance finale est réduite uniquement pour les tests à La Villette. Pour les tests de la campagne les coefficients sont surestimés d'un facteur d'environ 6.

coefs pour question: prec d'ec	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.47	-0.14	-0.26	0.43	0.35	-0.30	-0.29	0.25
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	-0.14	-0.22	0.14	0.54	0.47	0.03	-0.78	-0.26
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.35	-0.56	-0.06	0.20	0.02	-0.22	0.31	-0.01
Villette: \mathcal{I}	0.10	-0.14	-0.02	0.10	0.44	-0.13	-0.34	0.14
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.28	0.47	-0.19	0.64	0.13	0.53	-2.89	0.47
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.09	-0.30	0.15	-0.16	0.64	0.11	-0.63	0.16
Campagne: \mathcal{G}	0.34	-0.10	0.54	-0.75	0.12	0.37	-0.81	0.25
Campagne: \mathcal{I}	0.08	-0.29	-0.16	0.28	0.49	0.15	-0.38	0.24
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.21	-0.17	-0.01	-0.33	0.70	0.15	-1.37	0.12
coefs reduits et optimises	0.30	-0.10	0.00	-0.50	0.27	-0.30	-0.47	0.31

performances: prec d'ec	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.23	0.10	0.16	0.17	0.76	0.58	0.53
Villette: \mathcal{G}	0.07	0.00	0.03	0.05	1.00	0.75	0.54
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.12	0.09	0.23	0.14	0.56	0.00	0.17
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.13	0.08	0.23	0.14	0.62	0.00	0.30
Villette: \mathcal{I}	0.42	0.32	0.31	0.33	0.49	0.50	0.45
Villette: \mathcal{R}	0.31	0.31	0.31	0.21	0.23	0.00	0.44
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.08	0.01	0.02	0.05	0.92	0.89	0.63
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.58	0.20	0.15	0.32	0.81	0.86	0.72
Campagne: \mathcal{G}	0.19	0.03	0.03	0.05	0.91	0.93	0.89
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.06	0.00	0.01	0.01	1.00	0.95	0.94
Campagne: \mathcal{I}	0.16	0.07	0.15	0.10	0.75	0.24	0.61
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.60	0.15	0.04	0.23	0.87	0.97	0.81
moyenne	0.24	0.11	0.14	0.15	0.74	0.56	0.58

TAB. B.13 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "précision d'écoute".

coefs pour question: raig	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.03	0.23	-0.20	0.01	0.06	0.07	0.35	0.12
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	-0.11	0.15	0.29	-0.10	0.29	-0.01	0.73	0.44
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	-0.06	0.42	0.44	-0.06	0.43	-0.93	0.13	-0.01
Villette: \mathcal{I}	-0.07	0.20	0.07	-0.02	-0.02	-0.17	0.10	-0.01
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	-0.23	0.13	0.06	-0.28	0.45	0.66	0.59	-0.09
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.06	0.30	0.48	-0.27	-0.11	0.19	-0.02	-0.01
Campagne: \mathcal{G}	-0.13	0.48	0.43	-0.01	-0.03	-0.01	0.05	0.02
Campagne: \mathcal{I}	0.01	0.29	0.37	-0.32	-0.04	0.06	0.03	0.09
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.05	0.44	0.42	-0.14	-0.07	0.13	-0.09	-0.06
coefs reduits et optimises	-0.12	0.28	0.26	-0.07	0.24	0.00	0.27	0.00

performances: raig	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.04	0.03	0.05	0.04	0.50	0.00	0.29
Villette: \mathcal{G}	0.02	0.00	0.01	0.00	0.99	0.62	0.87
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.04	0.02	0.08	0.03	0.70	0.00	0.56
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.07	0.03	0.08	0.04	0.76	0.00	0.64
Villette: \mathcal{I}	0.13	0.11	0.10	0.13	0.33	0.45	0.23
Villette: \mathcal{R}	0.10	0.08	0.10	0.11	0.14	0.00	0.00
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.01	0.00	0.01	0.00	0.98	0.00	0.37
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.14	0.09	0.02	0.12	0.61	0.92	0.43
Campagne: \mathcal{G}	0.17	0.01	0.00	0.04	0.98	0.99	0.95
Campagne: $\mathcal{F}_{salle} + \mathcal{G}$	0.13	0.00	0.00	0.04	1.00	1.00	0.93
Campagne: \mathcal{I}	0.05	0.03	0.02	0.04	0.67	0.75	0.50
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.21	0.08	0.01	0.13	0.81	0.99	0.65
moyenne	0.09	0.04	0.04	0.06	0.70	0.48	0.54

TAB. B.14 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "réverbérance des aiguës" (raig).

coefs pour question: rgrav	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.08	0.13	-0.27	0.54	-0.31	0.35	-0.10	0.12
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.05	0.11	-0.08	0.47	-0.17	0.07	0.27	0.16
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.02	0.12	-0.08	0.63	-0.10	-0.23	0.35	-0.16
Villette: \mathcal{I}	-0.02	0.23	-0.12	0.34	-0.05	-0.07	0.19	0.02
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	-0.22	-0.12	0.31	1.31	-0.74	1.26	0.05	0.20
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	-0.06	0.33	-0.12	0.38	0.03	0.04	-0.01	0.02
Campagne: \mathcal{G}	-0.09	0.39	-0.35	0.50	0.20	-0.18	0.28	0.11
Campagne: \mathcal{I}	-0.15	0.37	-0.09	0.44	0.13	-0.13	0.00	0.02
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	-0.02	0.38	-0.08	0.35	-0.01	0.14	0.09	0.00
coefs réduits et optimises	0.00	0.15	0.00	0.52	-0.20	0.00	0.20	0.00

performances: rgrav	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.07	0.04	0.05	0.05	0.66	0.58	0.58
Villette: \mathcal{G}	0.01	0.00	0.01	0.00	1.00	0.47	0.84
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.04	0.02	0.07	0.02	0.67	0.00	0.65
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.05	0.02	0.07	0.02	0.81	0.00	0.79
Villette: \mathcal{I}	0.14	0.12	0.09	0.13	0.34	0.60	0.27
Villette: \mathcal{R}	0.09	0.07	0.09	0.08	0.30	0.00	0.24
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.02	0.00	0.00	0.01	0.94	0.86	0.83
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.13	0.09	0.02	0.12	0.56	0.91	0.32
Campagne: \mathcal{G}	0.20	0.01	0.00	0.05	0.98	0.99	0.92
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \mathcal{G}$	0.13	0.00	0.00	0.03	1.00	1.00	0.94
Campagne: \mathcal{I}	0.06	0.02	0.02	0.04	0.78	0.78	0.56
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.23	0.06	0.01	0.11	0.85	0.99	0.73
moyenne	0.10	0.04	0.04	0.06	0.74	0.60	0.64

TAB. B.15 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "réverbérance des graves" (rgrav).

coefs pour question: IMGAL	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.13	0.11	0.02	0.20	0.27	-0.46	0.17	0.49
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.09	0.01	-0.23	0.20	0.57	-0.35	0.06	0.36
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.46	-0.03	-0.28	0.43	-0.11	-0.57	-0.60	0.37
Villette: \mathcal{I}	0.06	-0.03	0.04	0.22	0.23	-0.31	-0.19	0.34
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.00	0.61	-0.79	0.14	0.79	0.70	-0.89	0.58
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.29	-0.02	0.25	-0.03	0.24	0.14	-0.25	0.33
Campagne: \mathcal{G}	-0.07	0.08	0.82	0.18	-0.22	0.24	0.68	0.81
Campagne: \mathcal{I}	0.13	-0.03	0.10	0.07	0.16	0.18	-0.18	0.36
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.32	0.10	0.28	-0.05	0.12	0.18	-0.18	0.51
coefs réduits et optimises	0.16	0.08	0.00	0.23	0.33	-0.30	-0.11	0.43

performances: IMGAL	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.11	0.05	0.07	0.05	0.77	0.61	0.74
Villette: \mathcal{G}	0.05	0.00	0.01	0.01	0.96	0.84	0.85
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.06	0.03	0.11	0.04	0.69	0.00	0.62
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.11	0.03	0.11	0.05	0.85	0.24	0.75
Villette: \mathcal{I}	0.25	0.21	0.14	0.20	0.44	0.66	0.41
Villette: \mathcal{R}	0.14	0.09	0.14	0.10	0.44	0.00	0.37
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.02	0.00	0.01	0.01	0.99	0.82	0.80
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.39	0.18	0.07	0.21	0.75	0.91	0.73
Campagne: \mathcal{G}	0.27	0.03	0.01	0.06	0.94	0.98	0.88
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \mathcal{G}$	0.23	0.00	0.00	0.04	1.00	0.99	0.93
Campagne: \mathcal{I}	0.10	0.05	0.07	0.06	0.73	0.59	0.70
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.54	0.14	0.02	0.16	0.86	0.98	0.84
moyenne	0.19	0.07	0.06	0.08	0.79	0.64	0.72

TAB. B.16 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur "l'impression générale" (préférence subjective, "IMGAL").

coefs pour question: adapt	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.20	0.21	0.06	0.37	0.08	-0.17	0.00	0.54
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	-0.06	0.03	0.35	0.31	0.29	0.19	-0.32	0.57
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.18	0.18	0.50	-0.10	-0.34	0.98	-0.77	0.63
Villette: \mathcal{I}	0.03	-0.08	-0.02	0.16	0.08	-0.10	-0.16	0.37
Villette: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.52	0.48	0.00	0.84	-0.53	-1.16	0.61	0.44
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.31	0.05	0.07	-0.14	0.20	0.00	0.30	0.48
Campagne: \mathcal{G}	0.07	0.12	0.22	0.38	0.34	-0.33	-0.40	0.56
Campagne: \mathcal{I}	0.22	0.09	0.30	-0.03	0.01	0.02	0.33	0.57
Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.36	0.04	-0.43	-0.01	0.43	-0.21	-0.08	0.56
coefs réduits et optimises	0.00	0.10	0.38	0.27	0.00	0.00	-0.39	0.55

performances: adapt	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.14	0.07	0.04	0.08	0.72	0.84	0.68
Villette: \mathcal{G}	0.05	0.00	0.01	0.02	0.99	0.92	0.82
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.10	0.06	0.06	0.06	0.61	0.61	0.57
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.08	0.04	0.06	0.05	0.74	0.47	0.64
Villette: \mathcal{I}	0.23	0.22	0.08	0.24	0.29	0.81	-0.18
Villette: \mathcal{R}	0.08	0.07	0.08	0.07	0.12	0.00	0.17
Villette: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.04	0.00	0.00	0.02	0.97	0.94	0.75
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.42	0.32	0.01	0.36	0.51	0.98	0.40
Campagne: \mathcal{G}	0.28	0.04	0.00	0.06	0.92	1.00	0.90
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \overline{\mathcal{G}}$	0.16	0.00	0.00	0.03	1.00	1.00	0.90
Campagne: \mathcal{I}	0.17	0.10	0.01	0.12	0.65	0.96	0.58
Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.51	0.14	0.00	0.24	0.85	1.00	0.74
moyenne	0.19	0.09	0.03	0.11	0.70	0.79	0.58

TAB. B.17 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur "l'adaptation de l'œuvre musicale à la salle".

coefs pour question: pat	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	-0.12	0.06	0.13	-0.03	-0.12	0.02	0.00	-0.10
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.00	0.13	0.04	-0.01	-0.20	0.11	0.00	-0.27
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.02	0.11	0.23	-0.08	-0.24	0.35	0.00	0.02
Villette: \mathcal{I}	-0.07	0.09	0.03	0.00	-0.07	-0.05	0.00	-0.06
Villette: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	-0.21	-0.04	0.13	0.16	-0.05	1.00	0.00	0.07
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.01	0.08	-0.13	0.00	-0.03	-0.06	0.00	-0.05
Campagne: \mathcal{G}	0.14	0.06	-0.27	-0.11	-0.08	-0.09	0.00	-0.07
Campagne: \mathcal{I}	0.04	0.08	-0.18	0.02	-0.04	-0.02	0.00	-0.09
Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.01	0.05	-0.04	-0.03	-0.07	0.00	0.00	-0.05
coefs réduits et optimises	0.00	0.10	0.00	0.00	-0.19	0.16	0.00	-0.10

performances: pat	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.02	0.01	0.02	0.02	0.61	0.16	0.53
Villette: \mathcal{G}	0.00	0.00	0.00	0.01	0.91	0.00	0.18
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.02	0.01	0.03	0.01	0.66	0.00	0.61
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.02	0.01	0.03	0.01	0.71	0.00	0.58
Villette: \mathcal{I}	0.05	0.04	0.04	0.05	0.37	0.46	0.32
Villette: \mathcal{R}	0.04	0.03	0.04	0.04	0.08	0.00	0.11
Villette: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.76	0.53	0.53
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.05	0.04	0.03	0.05	0.42	0.64	0.37
Campagne: \mathcal{G}	0.01	0.00	0.01	0.01	0.82	0.77	0.74
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \overline{\mathcal{G}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.84	0.85	0.54
Campagne: \mathcal{I}	0.03	0.02	0.03	0.03	0.43	0.00	0.36
Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.03	0.03	0.01	0.04	0.46	0.86	0.43
moyenne	0.02	0.02	0.02	0.02	0.59	0.36	0.44

TAB. B.18 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question de "pateux". Cette question figure dans la liste des question d'entrées. Elle est ici expliquée par les autres sept questions d'entrée, menant à une réduction supplémentaire du nombre de questions indépendantes.

coefs pour question: contr	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.22	-0.09	0.51	0.02	0.00	-0.05	-0.67	0.06
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.19	0.04	-0.05	-0.27	0.00	0.11	-0.65	0.01
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.23	-0.05	0.07	-0.25	0.00	1.18	-0.81	0.23
Villette: \mathcal{I}	0.15	-0.11	0.27	0.07	0.00	-0.04	-0.34	0.11
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.63	-0.48	0.09	0.02	0.00	-0.48	-0.16	-0.02
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.12	-0.15	0.58	-0.27	0.00	0.25	-0.13	0.26
Campagne: \mathcal{G}	0.24	-0.01	0.43	-0.13	0.00	0.10	-0.55	0.17
Campagne: \mathcal{I}	0.11	-0.07	0.21	-0.04	0.00	0.25	-0.17	0.20
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.20	-0.11	0.57	-0.27	0.00	0.20	-0.44	0.29
coefs réduits et optimises	0.15	-0.05	0.20	0.00	0.00	0.00	-0.50	0.15

performances: contr	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.13	0.07	0.13	0.08	0.66	0.00	0.63
Villette: \mathcal{G}	0.03	0.01	0.03	0.02	0.93	0.46	0.69
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.04	0.03	0.20	0.04	0.54	0.00	0.43
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.08	0.03	0.20	0.06	0.75	0.00	0.51
Villette: \mathcal{I}	0.26	0.24	0.26	0.25	0.30	0.13	0.30
Villette: \mathcal{R}	0.26	0.22	0.26	0.22	0.07	0.00	0.12
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.04	0.00	0.01	0.02	0.95	0.83	0.81
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.37	0.24	0.10	0.29	0.60	0.85	0.51
Campagne: \mathcal{G}	0.09	0.03	0.02	0.04	0.84	0.90	0.82
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \mathcal{G}$	0.04	0.02	0.00	0.02	0.80	0.95	0.72
Campagne: \mathcal{I}	0.12	0.09	0.10	0.10	0.48	0.39	0.41
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.34	0.15	0.03	0.21	0.75	0.96	0.68
moyenne	0.15	0.10	0.11	0.11	0.64	0.46	0.55

TAB. B.19 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur le "contraste". Cette question figure dans la liste des questions d'entrées. Elle est ici expliquée par les autres sept questions d'entrée, menant à une réduction supplémentaire du nombre de questions indépendantes. Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question de "contr".

coefs pour question: pgrav	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.12	-0.11	0.21	0.00	0.01	0.01	-0.12	0.09
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.17	0.03	-0.12	0.00	-0.25	0.49	-0.02	0.29
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.21	0.00	0.38	0.00	-0.24	0.40	-0.26	0.18
Villette: \mathcal{I}	0.16	0.04	0.03	0.00	0.04	-0.01	-0.01	0.15
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.88	-0.07	-0.93	0.00	0.02	-1.68	0.57	-0.05
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.23	0.14	0.10	0.00	-0.13	0.12	-0.01	0.05
Campagne: \mathcal{G}	0.50	0.20	-0.48	0.00	-0.12	-0.15	-0.71	0.10
Campagne: \mathcal{I}	0.10	0.10	0.23	0.00	-0.02	0.08	0.03	-0.01
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.35	0.15	0.15	0.00	-0.21	0.06	-0.14	0.10
coefs réduits et optimises	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1

performances: pgrav	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.07	0.06	0.04	0.07	0.42	0.71	0.29
Villette: \mathcal{G}	0.02	0.00	0.01	0.01	0.94	0.74	0.71
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.04	0.03	0.05	0.04	0.49	0.00	0.26
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.05	0.03	0.05	0.04	0.60	0.00	0.47
Villette: \mathcal{I}	0.14	0.13	0.07	0.14	0.28	0.72	0.26
Villette: \mathcal{R}	0.07	0.04	0.07	0.05	0.56	0.00	0.52
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.02	0.00	0.00	0.01	0.89	0.91	0.62
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.14	0.10	0.05	0.11	0.51	0.79	0.46
Campagne: \mathcal{G}	0.10	0.03	0.01	0.04	0.87	0.96	0.83
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \mathcal{G}$	0.06	0.00	0.00	0.02	0.99	0.98	0.87
Campagne: \mathcal{I}	0.05	0.04	0.05	0.04	0.42	0.00	0.33
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{G}$	0.22	0.12	0.01	0.13	0.69	0.97	0.65
moyenne	0.08	0.05	0.03	0.06	0.64	0.57	0.52

TAB. B.20 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "puissance des graves" (pgrav). Cette question figure dans la liste des questions d'entrées. Elle est ici expliquée par les autres sept questions d'entrée, menant à une réduction supplémentaire du nombre de questions indépendantes.

coefs pour question: paig	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.15	-0.04	0.00	0.09	0.18	0.26	0.25	0.10
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.30	-0.03	0.00	-0.09	-0.04	0.17	0.11	0.03
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.13	0.07	0.00	0.31	0.05	-0.28	0.63	-0.07
Villette: \mathcal{I}	0.13	0.05	0.00	0.03	0.13	0.00	0.06	-0.01
Villette: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.61	-0.02	0.00	-0.45	0.04	-0.72	0.23	0.03
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.19	0.05	0.00	0.08	0.24	-0.09	-0.28	0.07
Campagne: $\overline{\mathcal{G}}$	0.34	0.04	0.00	-0.18	0.15	-0.24	-0.65	0.05
Campagne: \mathcal{I}	0.22	0.02	0.00	0.16	0.06	0.05	-0.22	0.06
Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.19	0.01	0.00	0.08	0.25	-0.06	-0.11	0.04
coefs réduits et optimises	0.3	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0

performances: paig	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.04	0.03	0.06	0.03	0.60	0.00	0.52
Villette: $\overline{\mathcal{G}}$	0.05	0.00	0.01	0.02	0.99	0.87	0.86
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.04	0.02	0.08	0.03	0.66	0.00	0.61
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.05	0.03	0.08	0.05	0.66	0.00	0.21
Villette: \mathcal{I}	0.11	0.10	0.11	0.12	0.30	0.19	0.29
Villette: \mathcal{R}	0.11	0.09	0.11	0.10	0.23	0.00	0.22
Villette: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.01	0.00	0.01	0.00	0.92	0.77	0.84
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.15	0.09	0.06	0.10	0.64	0.77	0.59
Campagne: $\overline{\mathcal{G}}$	0.05	0.01	0.01	0.02	0.89	0.88	0.80
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \overline{\mathcal{G}}$	0.03	0.01	0.00	0.01	0.90	0.95	0.79
Campagne: \mathcal{I}	0.04	0.03	0.06	0.03	0.57	0.00	0.47
Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.13	0.07	0.02	0.07	0.70	0.94	0.67
moyenne	0.07	0.04	0.05	0.05	0.67	0.45	0.57

TAB. B.21 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "puissance des aiguës" (paig). Cette question figure dans la liste des question d'entrées. Elle est ici expliquée par les autres sept questions d'entrée, menant à une réduction supplémentaire du nombre de questions indépendantes.

coefs pour question: heurte/fluid	puiss	rev	paig	pgrav	contr	heurte	pat	bal gal
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	-0.01	-0.03	0.13	0.00	-0.01	0.00	0.02	-0.10
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.00	-0.10	0.07	0.17	0.04	0.00	0.11	-0.11
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.02	-0.05	-0.06	0.07	0.20	0.00	0.20	-0.19
Villette: \mathcal{I}	0.04	0.02	0.00	-0.01	-0.01	0.00	-0.06	-0.12
Villette: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.25	0.02	-0.16	-0.19	-0.06	0.00	0.40	-0.08
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.07	0.04	-0.21	0.22	0.24	0.00	-0.28	0.05
Campagne: $\overline{\mathcal{G}}$	0.45	0.08	-1.16	-0.27	0.17	0.00	-1.03	0.31
Campagne: \mathcal{I}	0.05	0.02	0.15	0.17	0.21	0.00	-0.09	0.14
Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	-0.04	0.08	-0.22	0.13	0.34	0.00	0.00	-0.01
coefs réduits (VIL): heurte	0.08	0.00	0.00	0.00	-0.08	0.00	0.00	-0.15
coefs réduits (CAMPAGNE): fluid	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.4

perform: heurte/fluid	var init	var regr	seuil var	var coef	cor regr	seuil cor	cor coef
Villette: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.02	0.01	0.03	0.02	0.36	0	0.25
Villette: $\overline{\mathcal{G}}$	0.01	0.00	0.01	0.00	0.81	0	0.58
Villette: $\mathcal{G}(o_{m,k})$	0.01	0.01	0.05	0.01	0.51	0	0.34
Villette: $\mathcal{F}(p_{m,k})$	0.01	0.01	0.05	0.01	0.72	0	0.37
Villette: \mathcal{I}	0.06	0.06	0.06	0.06	0.08	0	0.08
Villette: \mathcal{R}	0.05	0.05	0.06	0.05	0.31	0	0.31
Villette: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.86	0	0.57
Campagne: $\mathcal{F} + \mathcal{I}$	0.23	0.20	0.10	0.21	0.36	0.75	0.31
Campagne: $\overline{\mathcal{G}}$	0.11	0.05	0.02	0.07	0.76	0.92	0.63
Campagne: $\mathcal{F}_{\text{salle}} + \overline{\mathcal{G}}$	0.06	0.01	0.00	0.04	0.95	0.96	0.61
Campagne: \mathcal{I}	0.10	0.08	0.10	0.09	0.45	0	0.39
Campagne: $\mathcal{F} + \overline{\mathcal{G}}$	0.28	0.26	0.03	0.34	0.33	0.95	0.22
moyenne	0.08	0.06	0.04	0.07	0.54	0.26	0.39

TAB. B.22 - Coefficients et performances du modèle de réduction du nombre des variables indépendantes pour la question sur la "fluidité" (pour la campagne européenne) et la question de "heurte" (pour les tests à La Villette). Ces questions figurent dans la liste des question d'entrées. Elles sont ici expliquées par les autres sept questions d'entrée, menant à une réduction supplémentaire du nombre de questions indépendantes.

Bibliographie

- [AA73] O.A. Abdel Alim. *Abhängigkeit der Zeit- und Registerdurchsichtigkeit von raumakustischen Parametern bei Musikdarbietungen*. PhD thesis, TU Dresden, 1973.
- [Ahn84] W. Ahnert. Sound energy of different sources. *Preprint, 75th AES Convention, Paris*, 1984.
- [And77] Y. Ando. *JASA*, **62**, pp. 1436–1441, 1977.
- [And85] Y. Ando. *Concert Hall Acoustics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 1985.
- [ASS65] B.S. Atal, M.R. Schroeder, and G.M. Sessler. Subjective reverberation time and its relation to sound decay. *Int. Congr. Acoustics, Liège*, page G 32, 1965.
- [Bar71] M. Barron. The subjective effects of first reflections in concert halls — the need for lateral reflections. *J. Sound Vib.*, **15**(4), pp. 475–494, 1971.
- [Bar74] M. Barron. *The effects of early reflections on subjective acoustical quality in concert halls*. PhD thesis, Univ. of Southampton, 1974.
- [Bar78] M. Barron. The Glubenkian Great Hall, Lisbon, II: an acoustic study of a concert hall with variable stage. *J. Sound Vib.*, **59**, p. 481, 1978.
- [Bar88] M. Barron. Subjective study of British symphony concert halls. *Acustica*, **66**, pp. 1–14, 1988.
- [Bar93] M. Barron. *Auditorium Acoustics and Architectural Design*. E & FN Spon, London, 1993.
- [Bar94] M. Barron. The new measures in concert hall acoustics — how much do they explain. In *Proceedings of the Wallace Clement Sabine Centennial Symposium, Cambridge, Ma., June 5 - 7 1994*, pages 185–190. Ac. Soc. Am., 1994.
- [Bar95] M. Barron. Bass sound in concert auditoria. *JASA*, **97**(2), pp. 1088–1098, 1995.
- [BC78] J. Blauert and W. Cobben. Some considerations of binaural crosscorrelation analysis. *Acustica*, **39**, pp. 96–103, 1978.
- [BCW88] R.A. Becker, J.M. Chambers, and A.R. Wilks. *The New S Language*. Wadsworth & Brooks/Cole Advanced Books & Software, 1988.
- [Ber62] L.L. Beranek. *Music, Acoustics & Architecture*. John Wiley, New York, 1962.
- [Ber92] L.L. Beranek. Concert hall acoustics—1992. *JASA*, **92**(1), pp. 1–39, 1992.
- [Ber95] L.L. Beranek. *Music, Acoustics & Architecture*. John Wiley, 1995.
- [Bék30] G. von Békésy. Zur Theorie des Hörens: Über das Richtungshören bei einer Zeitdifferenz oder Lautstärkeungleichheit der beidseitigen Schalleinwirkungen. *Phys. Z.*, **31**, pp. 824–838 et 857–868, 1930.

- [BL88] M. Barron and L.-J. Lee. Energy relations in concert auditoriums. *JASA*, **84**, pp. 618–628, 1988.
- [Bla74] J. Blauert. *Räumliches Hören*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1974.
- [Bla83] J. Blauert. *Spatial Hearing*. MIT Press, Cambridge, Ma., 1983.
- [BM81] M. Barron and A.H. Marshall. Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure. *J. Sound Vib.*, **77**(2), pp. 211–232, 1981.
- [BML86] J. Blauert, U. Möbius, and W. Lindemann. Supplementary psychoacoustical results on auditory spaciousness. *Acustica*, **59**, pp. 292–293, 1986.
- [Bra94] J.S. Bradley. Comparison of concert hall measurements of spatial impression. *JASA*, **96**(6), pp. 3525–3535, 1994.
- [BS65] L.L. Beranek and T.J. Schultz. Some recent experiences in the design and testing of concert halls with suspended panel arrays. *Acustica*, **15**, p. 307, 1965.
- [BS95] J.S. Bradley and G.A. Soulodre. The influence of late arriving energy on spatial impression. *JASA*, **97**(4), pp. 2263–2271, 1995.
- [Bur61] W. Burgdorf. Untersuchungen zur Wahrnehmung verzögerter Schallsignale. *Acustica*, **11**, pp. 97–111, 1961.
- [Bur69] A.N. Burd. Nachhallfreie Musik für akustische Modelluntersuchungen. *Rundfunk-techn. Mitteilungen*, **13**, p. 200, 1969.
- [CBW95] F. Cruz-Barney and O. Warusfel. Validation of a computer simulation environment for room acoustics prediction. *Int. Congr. Acoustics, Trondheim, Norway*, 1995.
- [CC70] J.D. Carroll and J.-J. Chang. Analysis of individual differences in multidimensional scaling via an n-way generalization of “Eckart-Young” decomposition. *Psychometrika*, **35**(3), pp. 283–319, 1970.
- [CDL93] T.J. Cox, W.J. Davies, and Y.W. Lam. The Sensitivity of Listeners to Early Sound Field Changes in Auditoria. *Acustica*, **79**, pp. 27–41, 1993.
- [CF60] C. Constant and J. de Filippi. *Parallèle des principaux théâtres modernes de l’Europe et des machines théâtrales françaises, allemandes et anglaises*. Paris. Facsimile by Benjamin Blom, New York, 1968, 1860.
- [CFB⁺91] M. Castellengo, B. Fabre, C. Besnainou, J.-P. Jullien, A. Saliou, J.-D. Polack, and G. Dodd. Etude acoustique sur la situation d’un nouvel orgue à l’abbaye du Mont Saint-Michel. Contrat d’étude, Ministère de la Culture, Direction de la Musique, DRAC Basse Normandie, 1991.
- [CM76] L. Cremer and H.A. Müller. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band II: Wellentheoretische Raumakustik*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1976.
- [CM78] L. Cremer and H.A. Müller. *Die wissenschaftlichen Grundlagen der Raumakustik, Band I: Geometrische, statistische und psychologische Raumakustik*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1978.
- [CM82] L. Cremer and H.A. Müller. *Principles and Applications of Room Acoustics, Vols 1 and 2; translated by T.J. Shultz*. Applied Science Publishers, London, 1982.
- [Cou96] L. Couthon. *Mesures de rayonnement sur plusieurs instruments de musique*. PhD thesis, CRTT Acoustique, Station Scientifique Le Val Joyeux, F-78450 Villepreux, 1996.

- [Cre64] L. Cremer. Die raum- und bauakustischen Maßnahmen beim Wiederaufbau der Berliner Philharmonie. *Die Schalltechnik*, **57**, pp. 1–11, 1964.
- [Cre65] L. Cremer. Die akustischen Gegebenheiten in der neuen Berliner Philharmonie. *Deutsche Bauzeitung*, **10**, pp. 850–62, 1965.
- [Cre81] L. Cremer. *Physik der Geige*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1981.
- [Dam91] A. Damien. Rapport de stage, effectué à l'Ircam. Master's thesis, Univ. de Valenciennes, 1991.
- [Dar54] T. Dart. *The Interpretation of Music*. Hutchinson's University Library, London, 1954.
- [Dün88] H. Dünwald. *Akustische Messungen an zahlreichen Violinen und Ableitung objektiver Kriterien für deren klangliche Eigenschaften*. PhD thesis, RWTH Aachen, 1988.
- [Dün90] H. Dünwald. Ein erweitertes Verfahren zur objektiven Bestimmung der Klangqualität von Violinen. *Acustica*, **71**, pp. 269–276, 1990.
- [Dum74] G.P.M. Dumont. *Parallèle de plans des plus belles salles de spectacle d'Italie et de France, avec des détails des machines théâtrales*. Paris. Facsimile by Benjamin Blom, New York, 1968, 1774.
- [DW69] P. Damaske and B. Wagener. Richtungshörversuche über einen nachgebildeten Kopf. *Acustica*, **21**, p. 30, 1969.
- [Eyr30] C.F. Eyring. Reverberation time in "dead" rooms. *JASA*, **1**, pp. 217–241, 1930.
- [Fle22] H. Fletcher. Nature of speech and its interpretation. *Journ. Franklin Inst.*, **193**, 1922.
- [Fle38] H. Fletcher. Loudness, masking, and their relation to the hearing process and the problem of noise measurement. *JASA*, **9**, p. 275, 1937/38.
- [FM33] H. Fletcher and W.A. Munson. Loudness, its definition, measurement and calculation. *JASA*, **5**, p. 82, 1933.
- [For85] M. Forsyth. *Buildings for Music*. Cambridge University Press, Cambridge, England, 1985.
- [Gal94] H. Gall. Entretien avec hugues gall. *Le Monde de la Musique*, janvier 1994.
- [Gar80] C. Garnier. *Le nouvel Opéra de Paris*. Paris, 1880.
- [Gir90] E. Giroflet. Analyses des tests de simulation d'orgue dans l'abbaye du Mont Saint-Michel. Master's thesis, Université Paul Sabatier, Toulouse, 1990.
- [Got73] D. Gottlob. *Vergleich objektiver akustischer Parameter mit Ergebnissen subjektiver Untersuchungen an Konzertsälen*. PhD thesis, Univ. Göttingen, 1973.
- [Gri92a] D. Griesinger. Measures of spatial impression and reverberance based on the physiology of human hearing. In *Proc. of the 11th International AES Conference: Test & measurements conference*, pages 114–145, Portland, Oregon, 1992. Audio Engineering Society.
- [Gri92b] D. Griesinger. Room impression, reverberance, and warmth in rooms and halls. *Preprint, 93rd AES Convention, San Francisco*, 1992.
- [Gri93] D. Griesinger. Quantifying musical acoustics through audibility. Vern O. Knudsen Memorial Lecture, 126th ASA Convention, Denver, Colorado, 1993.

- [Gri95a] D. Griesinger. Further investigations into the subjective loudness of reverberation. *Proc. Inst. of Acoust.*, **XV**, Gatwick, 1995.
- [Gri95b] D. Griesinger. How loud is my reverberation? *Preprint, 98rd AES Convention, Paris*, 1995.
- [Haa51] H. Haas. Über den Einfluss eines Einfachechos auf die Hörsamkeit von Sprache. *Acustica*, **1**, pp. 49–58, 1951.
- [HBO92] T. Hidaka, L.L. Beranek, and T. Okano. Interaural cross-correlation as a measure of spatial impression in concert halls. *JASA*, **92**, p. 2469(A), to be published, presented orally at the 124th meeting of the Ac. Soc. Am., 1992.
- [HBO95] T. Hidaka, L.L. Beranek, and T. Okano. Some considerations of interaural cross correlation, iacc, and lateral fraction, lf, as measures of spaciousness in concert hall. In *Proceedings from “Music and Concert Hall Acoustics”*, Kirishima, Japan, 1995.
- [HD71] R.J. Hawkes and H. Douglas. Subjective Acoustic Experience in Concert Auditoria. *Acustica*, **24**, pp. 235–250, 1971.
- [HS73] T. Houtgast and H.J.M. Steeneken. The modulation transfer function in room acoustics as a predictor of speech intelligibility. *Acustica*, **28**, pp. 66–73, 1973.
- [IRC89] IRCAM, équipe “Espaces Acoustiques Naturels et Artificiels”. Aide aux architectes pour la conception des lieux d’écoute. *Premier rapport d’avancement*, 1989.
- [IRC90] IRCAM, équipe “Espaces Acoustiques Naturels et Artificiels”. Aide aux architectes pour la conception des lieux d’écoute. *Deuxième rapport d’avancement*, 1990.
- [IRC94a] IRCAM, équipe acoustique des salles. Rapport de mesures: Cité de la Musique, Partie Est, Salle des Concerts. *Rapport de mission pour l’Etablissement Public du Parc de la Villette (EPPV)*, juillet 1994.
- [IRC94b] IRCAM, équipe acoustique des salles. Rapport des tests d’écoute subjectifs à la salle de concert à la Villette, le 7 avril 1994. *Rapport de mission pour l’Etablissement Public du Parc de la Villette (EPPV)*, mai 1994.
- [IRC94c] IRCAM, équipe acoustique des salles. Rapport des tests d’écoute subjectifs à la salle de concert à la Villette, le 10 mai, le 2 juin et le 14 juin 1994. *Rapport de mission pour l’Etablissement Public du Parc de la Villette (EPPV)*, juin 1994.
- [ISO93] ISO (International Standards Organisation). *ISO 3382: Measurement of the reverberation time of rooms with reference to other acoustical parameters*, final draft edition, 1993.
- [Jef48] L.A. Jeffress. A place theory of sound localization. *J. Comp. Physiol. and Psych.*, **61**, pp. 468–486, 1948.
- [JGS84] J.-P. Jullien, A. Gilloire, and A. Saliou. Mesure des réponses impulsionnelles en acoustique. *Note Technique NT/LAA/TSS/181, CNET, Lannion*, 1984.
- [JKM⁺93] J.P. Jullien, E. Kahle, M. Marin, O. Warusfel, G. Bloch, and J.M. Jot. Spatializer: a perceptual approach. *Preprint, 94th AES Convention, Berlin*, 1993.
- [JKWW92] J.-P. Jullien, E. Kahle, S. Winsberg, and O. Warusfel. Some results on the objective characterisation of room acoustical quality in both laboratory and real environments. *Proc. Inst. of Acoust.*, **XIV**, Birmingham, 1992.
- [Jor70] V.L. Jordan. Acoustical criteria for auditoriums and their relation to model techniques. *JASA*, **47**, pp. 408–412, 1970.

- [Jor75] V.L. Jordan. Model studies of Sydney Opera House. In R. Mackenzie, editor, *Auditorium Acoustics*, pages 55–72, London, 1975. Proc. Int. Symp. on Architectural Acoustics, Applied Science Publishers Ltd.
- [Jul86] J.-P. Jullien. Correlations among objective criteria of room acoustic quality. *Int. Congr. Acoustics, Toronto*, pages E 4–9, 1986.
- [Jul92] J.-P. Jullien. Musique et Technologie. In *Les Cahiers de l'Ircam, numéro 4*, 1992.
- [Jul93] J.-P. Jullien. Effets perceptifs de variations combinées du niveau d'écoute, du temps de réverbération et de l'indice de clarté à 80 ms en acoustique des salles. *Document interne à l'Ircam*, Juillet 1993.
- [Jul95] J.-P. Jullien. Structured model for the representation and the control of room acoustical quality. *Int. Congr. Acoustics, Trondheim, Norway*, 1995.
- [JWKM93] J.-M. Jot, O. Warusfel, E. Kahle, and M. Mein. Binaural concert hall simulation in real time. *Presented at the IEEE Mohonk workshop, Oct 17-20, 1993*.
- [Kah94] E. Kahle. Influence of size and composition of the orchestra on the perception of room acoustical quality. In *Proceedings of the Wallace Clement Sabine Centennial Symposium, Cambridge, Ma., June 5 - 7 1994*, pages 207–210. Ac. Soc. Am., 1994.
- [Kee68] W. de V. Keet. The influence of early reflections on the spatial impression. *Proc. 6th Int. Congr. Acoustics, Tokyo*, pages E 2–4, 1968.
- [KJ94] E. Kahle and J.-P. Jullien. Some new considerations on the subjective impression of reverberance and its correlation with objective criteria. In *Proceedings of the Wallace Clement Sabine Centennial Symposium, Cambridge, Ma., June 5 - 7 1994*, pages 239–242. Ac. Soc. Am., 1994.
- [KJ95] E. Kahle and J.-P. Jullien. Subjective listening tests in concert halls: methodology and results. *Int. Congr. Acoustics, Trondheim, Norway*, 1995.
- [KK68] R. Kürer and U. Kurze. Integrationsverfahren zur Nachhallauswertung. *Acustica*, **19**, pp. 313–322, 1967/68.
- [Kle89] M. Kleiner. A new way of measuring lateral energy fractions. *Applied Acoustics*, **27**, pp. 321–327, 1989.
- [Kür72] R. Kürer. *Untersuchungen zur Auswertung von Impulsmessungen in der Raumakustik*. PhD thesis, TU Berlin, 1972.
- [KT54] H. Kuttruff and R. Thiele. *Acustica*, **4**, p. 614, 1954.
- [Kuh54] W. Kuhl. Über Versuche zur Ermittlung der günstigsten Nachhallzeit grosser Musikstudios. *Acustica*, **4**, pp. 618–634, 1954.
- [KW94] E. Kahle and J. Woodhouse. The influence of cell geometry on the elasticity of softwood. *J. of Materials Sc.*, **29**, pp. 1250–1259, 1994.
- [Lav89] C. Lavandier. *Validation perceptive d'un modèle objectif de caractérisation de la qualité acoustique des salles*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, 1989.
- [LB58] J.P.A. Lochner and J.F. Burger. The subjective masking of short time delayed echos by their primary sound and their contribution to the intelligibility of speech. *Acustica*, **8**, pp. 1–10, 1958.
- [LB59] J.P.A. Lochner and J.F. Burger. The intelligibility of reinforced speech. *Acustica*, **9**, pp. 31–38, 1959.

- [LB60] J.P.A. Lochner and J.F. Burger. Optimum reverberation time for speech rooms based on hearing characteristics. *Acustica*, **10**, pp. 394–399, 1960.
- [LB61a] J.P.A. Lochner and J.F. Burger. Form of the loudness function in the presence of a masking noise. *JASA*, **33**, pp. 1705–1707, 1961.
- [LB61b] J.P.A. Lochner and J.F. Burger. The intelligibility of speech under reverberant conditions. *Acustica*, **11**, pp. 195–200, 1961.
- [LB64] J.P.A. Lochner and J.F. Burger. The influence of reflections on auditorium acoustics. *J. Sound and Vibr.*, **4**, pp. 426–454, 1964.
- [Leh75] U. Lehmann. *Untersuchungen zur Bestimmung des Raumeindrucks bei Musikdarbietungen und Grundlagen der Optimierung*. PhD thesis, TU Dresden, 1975.
- [Leh76] P. Lehmann. *Über die Ermittlung raumakustischer Kriterien und deren Zusammenhang mit subjektiven Beurteilungen der Hörsamkeit*. PhD thesis, TU Berlin, 1976.
- [Lin85a] W. Lindemann. Extension of a binaural cross-correlation model by contralateral inhibition. I. Simulation of lateralization of stationary signals. *JASA*, **80**(6), pp. 1608–1622, 1985.
- [Lin85b] W. Lindemann. Extension of a binaural cross-correlation model by contralateral inhibition. II. The law of the first wave front. *JASA*, **80**(6), pp. 1623–1630, 1985.
- [Loo12] A. Loos. *Paroles dans le vide — Malgré tout*. Ed. Champ Libre, réédition 1979, Paris, 1912.
- [LT83] H.G. Latham and S.K. Tagg. The measurement of quality in auditorium acoustics by subjective scaling methods — a review of developments in theory and practice. *Applied Acoustics*, **16**, pp. 257–278, 1983.
- [LW80] P. Lehmann and H. Wilkens. Zusammenhang subjektiver Beurteilungen von Konzertsälen mit raumakustischen Kriterien. *Acustica*, **45**, pp. 256–268, 1980.
- [Mac91] E.A. Macpherson. A computer model of binaural localization for stereo imaging measurement. *J. Audio Eng. Soc.*, **39**(9), pp. 604–621, 1991.
- [Mar67] A.H. Marshall. A note on the importance of room cross-section in concert halls. *J. Sound Vibr.*, **5**, p. 100, 1967.
- [Mei93] M. Mein. Perception de l'information binaurale liée aux réflexions précoces dans une salle. Mémoire de DEA, Univ. du Maine, Le Mans, 1993.
- [Mel72] V. Mellert. Construction of a dummy head after new measurements of threshold of hearing. *JASA*, **51**, p. 1359, 1972.
- [Mey72] J. Meyer. *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*. Fachbuchreihe “Das Musikinstrument”, Band 24. Verlag Das Musikinstrument, Frankfurt a. M., 1972.
- [Mey78] J. Meyer. Raumakustik und Orchesterklang in den Konzertsälen Joseph Haydns. *Acustica*, **41**, pp. 145–62, 1978.
- [Mey90] J. Meyer. Zur Dynamik und Schalleistung von Orchesterinstrumenten. *Acustica*, **71**, pp. 277–286, 1990.
- [Mey92] J. Meyer. Klangliche Unterschiede zwischen realem Orchester und der Einspielung nachhallfreier Musik in Sälen. In *17. Tonmeistertagung*, Karlsruhe, 1992.
- [Mey93] J. Meyer. The Sound of the Orchestra. *J. Audio Eng. Soc.*, **41**, pp. 203–213, 1993.

- [Mey95] J. Meyer. *Akustik und musikalische Aufführungspraxis*. E. Bochinsky, Frankfurt a. M., 3rd edition, 1995.
- [MISM94a] M. Morimoto, K. Iida, K. Sakagami, and A.H. Marshall. Physical measures for auditory source width (ASW): Part 1. Discussion of the competing measures ICC and Lf. In *Proceedings of the Wallace Clement Sabine Centennial Symposium, Cambridge, Ma., June 5 - 7 1994*, pages 109–112. Ac. Soc. Am., 1994.
- [MISM94b] M. Morimoto, K. Iida, K. Sakagami, and A.H. Marshall. Physical measures for auditory source width (ASW): Part 2. Comparison between various physical measures and ASW. In *Proceedings of the Wallace Clement Sabine Centennial Symposium, Cambridge, Ma., June 5 - 7 1994*, pages 113–116. Ac. Soc. Am., 1994.
- [MK52] E. Meyer and W. Kuhl. *Acustica*, **2**, p. 77, 1952.
- [MM85] A.H. Marshall and J. Meyer. The directivity and auditory impression of singers. *Acustica*, **58**(3), 1985.
- [Moo89] B.C.J. Moore. *An Introduction to the Psychology of Hearing*. Academic Press, London, 1989.
- [MT77] F. Mosteller and J.W. Tukey. *Data Analysis and Regression*. Addison Wesley, 1977.
- [Pas84] D. Pascal. Analyse de données perceptives par les méthodes d'évaluation multidimensionnelle ou analyse de proximités: la méthode individuelle INDSICAL. *Note Technique NT/LAA/TSS/231, CNET, Lannion*, 1984.
- [Pel90] X. Pelorson. *Pertinence des paramètres objectifs utilisés pour caractériser la qualité acoustique d'une salle*. PhD thesis, Université du Maine, Le Mans, 1990.
- [PLWW75] G. Plenge, P. Lehmann, R. Wettschurek, and H. Wilkens. New methods in architectural investigations to evaluate the acoustic qualities of concert halls. *JASA*, **57**, p. 1292, 1975.
- [PM65] P.H. Parkin and K. Morgan. "Assisted Resonance" in the Royal Festival Hall, London. *J. of Sound and Vibration*, **2**, pp. 74–85, 1965.
- [PM70] P.H. Parkin and K. Morgan. "Assisted Resonance" in the Royal Festival Hall, London: 1965-1969. *JASA*, **48**, pp. 1025–35, 1970.
- [Pol92] J.-D. Polack. Modifying the chambers to play billiards, or the foundations of reverberation theory. *Acustica*, **76**, pp. 257–270, 1992.
- [Pol93] J.-D. Polack. Playing billiard in the concert hall: the mathematical foundations of geometrical room acoustics. *Appl. Acoustics*, **38**, pp. 235-244, 1993.
- [PVP91] X. Pelorson, J.-P. Vian, and J.D. Polack. Stabilité et variabilité des critères objectifs utilisés en acoustique des salles. *J. d'Acoustique*, **4**(6), pp. 599–619, 1991.
- [RAAS75] W. Reichardt, O.A. Abdel Alim, and W. Schmidt. Definition und Meßgrundlage eines objektiven Maßes zur Ermittlung der Grenze zwischen brauchbarer und unbrauchbarer Durchsichtigkeit bei Musikdarbietung. *Acustica*, **32**, pp. 126–137, 1975.
- [Rei68] W. Reichardt. *Grundlagen der technischen Akustik*. Geest & Portig-Verlag, Leipzig, 1968.
- [Rei70] W. Reichardt. Vergleich der objektiven raumakustischen Kriterien für Musik. *Z. Hochfrequenz u. Elektroakustik*, **79**, p. 121, 1970.

- [RL78a] W. Reichardt and U. Lehmann. Definition eines Raumeindrucksmaßes R zur Bestimmung des Raumeindrucks bei Musikdarbietungen auf der Grundlage subjektiver Untersuchungen. *Applied Acoustics*, **11**, p. 99, 1978.
- [RL78b] W. Reichardt and U. Lehmann. Raumeindruck als Oberbegriff von Räumlichkeit und Halligkeit, Erläuterungen des Raumeindrucksmaßes R . *Acustica*, **40**, pp. 277–290, 1978.
- [RL81] W. Reichardt and U. Lehmann. Optimierung von Raumeindruck und Durchsichtigkeit von Musikdarbietungen durch Auswertung von Impulsschalltests. *Acustica*, **48**, pp. 174–185, 1981.
- [RS66] W. Reichardt and W. Schmidt. Die hörbaren Stufen des Raumeindrucks bei Musik. *Acustica*, **17**, p. 175, 1966.
- [Sab00] W.C. Sabine. Reverberation. *The American Architect*, 1900.
- [Sab22] W.C. Sabine. *Collected Papers on Acoustics*. Harvard Univ. Press. Reprinted by Peninsula Publishing, Acous. Soc. Am., 1993, 1922.
- [San91] G. Sandell. A library of orchestral instrument spectra. In *Proceedings of the 1991 International Computer Music Conference*, pages 98–101, Montreal, 1991.
- [San95] G. Sandell. *SHARC Timbre Database Documentation*. accessible par World Wide Web: <http://www.parmly.luc.edu/sandell/sharc/SHARC.homepage.html>, 1995.
- [SASW66] M.R. Schroeder, B.S. Atal, G.M. Sessler, and J.E. West. Acoustical Measurements in Philharmonic Hall (New York). *JASA*, **40**, pp. 434–440, 1966.
- [SBS93] G.A. Soulodre, J.S. Bradley, and D.R. Stammen. Spaciousness judgments of binaurally reproduced sound fields. *Paper presented at the 125th ASA Convention, Ottawa*, 1993.
- [Sch54] M.R. Schroeder. *Acustica*, Beiheft **2(4)**, p. 594, 1954.
- [Sch65] M.R. Schroeder. New method of measuring reverberation time. *JASA*, **37**, pp. 409–412, 1965.
- [Sch67] P. Schubert. *Die Wahrnehmbarkeit von Einzelschallwürfen bei Musik*. PhD thesis, TU Dresden, 1967.
- [Sch75] M.R. Schroeder. New Results and Ideas for Architectural Acoustics. In R. Mackenzie, editor, *Auditorium Acoustics*, pages 197–212, London, 1975. Proc. Int. Symp. on Architectural Acoustics, Applied Science Publishers Ltd.
- [Ser58] H.P. Seraphim. Über die Unterschiedsschwelle der Nachhallzeit. *Acustica*, **8**, p. 280, 1958.
- [Sev84] A.-C. Severne. Acoustique des salles; étude préliminaire de critères de qualité. Master's thesis, INSAS, Bruxelles, 1984.
- [Sie73] K.F. Siebrasse. *Vergleichende subjektive Untersuchungen zur Akustik von Konzertsälen*. PhD thesis, Univ. Göttingen, 1973.
- [SRN72] R.N. Shepard, A.K. Romney, and S.B. Nerlove. *Multidimensional Scaling, vol. 1*. Seminar Press, New York, 1972.
- [Thi53] R. Thiele. Richtungsverteilung und Zeitfolge der Schallrückwürfe in Räumen. *Acustica*, **2**, p. 291, 1953.

- [TY93] H. Tachibana and Y. Yamasaki. Relationships among various room acoustic indices. *Paper presented at the 125th ASA Convention, Ottawa, 1993.*
- [Ven75] P. Veneklasen. Design considerations of the professional consultant. In R. Mackenzie, editor, *Auditorium Acoustics*, pages 21–42, London, 1975. Proc. Int. Symp. on Architectural Acoustics, Applied Science Publishers Ltd.
- [Wal39] H. Wallach. On sound localisation. *JASA*, **10**, pp. 270–274, 1939.
- [War93] O. Warusfel. *APIA Measurement System, Guide d'utilisation*. APIA/IRCAM, 1993.
- [Wat23] F.R. Watson. *Acoustics of Buildings*. John Wiley, New York, 1923.
- [WB86] J. Woodhouse and C. Barlow. A volcanic layer under the varnish of old Italian violins. *The Strad Magazine*, 1986.
- [WC89] S. Winsberg and J.D. Carroll. A quasi non-metric method for multidimensional scaling of multiway data via a restricted case of an extended INDSCAL model. In R. Coppi and S. Bolasco, editors, *Multiway Data Analysis*, Amsterdam, 1989. Elsevier Publishing.
- [Wet76] R. Wettschurek. *Über die Abhängigkeit raumakustischer Wahrnehmungen von der Lautstärke*. PhD thesis, TU Berlin, 1976.
- [WG93] A.S. Weigend and N.A. Gershenfeld, editors. *Time Series Prediction: Forecasting the Future and Understanding the Past*. Addison-Wesley, Reading, Mass., 1993.
- [Wil75] H. Wilkens. *Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen*. PhD thesis, TU Berlin, 1975.
- [Wil77] H. Wilkens. Mehrdimensionale Beschreibung subjektiver Beurteilungen der Akustik von Konzertsälen. *Acustica*, **38**, p. 10, 1977.
- [WJ90] O. Warusfel and J.P. Jullien. Etudes des paramètres liés à la prise de son pour les applications d'acoustique virtuelle. In *Actes du 1er Congr. Français d'Acoustique*, Lyon, 1990.
- [WJ92] O. Warusfel and J.P. Jullien. Une campagne de mesures objectives et perceptives en acoustique des salles. In *Actes du 2ème Congr. Français d'Acoustique*, Arcachon, 1992.
- [WK78] H. Wilkens and B. Kotterba. Vergleich der Beurteilung verschiedener raumakustischer Situationen bei Anregung eines Raumes mit einem Orchester oder Lautsprecher. *Acustica*, **39**, pp. 291–297, 1978.
- [WKP71] H. Wilkens, R. Kürer, and G. Plenge. Wiedergabe von kopfbezogenen, stereophonen Signalen mit Lautsprechern. *Preprint, AES Convention, Köln, 1971.*
- [WP75] H. Wilkens and G. Plenge. The Correlations between Subjective and Objective Data of Concert Halls. In R. Mackenzie, editor, *Auditorium Acoustics*, pages 213–226, London, 1975. Proc. Int. Symp. on Architectural Acoustics, Applied Science Publishers Ltd.
- [Yam72] K. Yamagushi. Multivariate analysis of subjective and physical measures of hall acoustics. *JASA*, **52**, p. 1271, 1972.
- [ZF67] E. Zwicker and R. Feldtkeller. *Das Ohr als Nachrichtenempfänger*. S. Hirzel Verlag, Stuttgart, 1967.

- [ZF81] E. Zwicker and R. Feldtkeller. *Psychoacoustique: l'oreille récepteur d'information; traduit de l'allemand par C. Sorin*. Collection CNET, Masson, 1981.
- [Zwi82] E. Zwicker. *Psychoakustik*. Springer Verlag, Heidelberg, 1982.