

THESE

présentée

au Laboratoire Acoustique UFR Sciences
Université du Maine
- LE MANS -

en vue de l'obtention d'un

DOCTORAT NOUVEAU REGIME
Spécialité: Acoustique

par Catherine LAVANDIER

Sujet de la thèse:

**VALIDATION PERCEPTIVE D'UN MODELE OBJECTIF DE CARACTERISATION DE
LA QUALITE ACOUSTIQUE DES SALLES.**

soutenance prévue le 12 Juin 1989
devant le jury composé de:

Mr BLOCH

Mme BOTTE

Mr BRUNEAU

Mr JULLIEN

Mr POLACK

Mme WINSBERG



REMERCIEMENTS

Je voudrais tout d'abord remercier Messieurs Bruneau et Polack de l'Université du Maine pour avoir accepté de diriger cette thèse. J'adresse à Monsieur Bruneau toute ma reconnaissance pour avoir réglé avec prévenance les problèmes tant administratifs qu'humains.

Mes remerciements vont bien sûr à Jean-Pascal Jullien, inspirateur de ce travail. Grâce à son suivi assidu et grâce aux moyens techniques que l'IRCAM a mis à ma disposition, cette recherche a pu s'effectuer dans d'excellentes conditions.

Je remercie aussi Madame Winsberg avec qui nous avons travaillé en plusieurs occasions, ainsi que toutes les personnes qui se sont déplacées pour passer les tests psychoacoustiques, et tout particulièrement, Jean-Marie Adrien, René Caussé, Paul Chervin, Eric Ducasse, Christian Malcurt et Bennett Smith.

Enfin et surtout, je voudrais associer à ce travail Olivier Warusfel qui en a écrit les programmes d'acquisition de données, de commande des appareils de traitement du signal et de visualisation des résultats d'analyses. Si l'aide scientifique de Jean-Pascal Jullien a été primordiale dans la réalisation de cette thèse, l'amitié et la disponibilité d'Olivier Warusfel ont été déterminantes pour l'ambiance dans laquelle se sont déroulées ces trois années de recherche.



INTRODUCTION

L'architecture des lieux d'écoute, comme les théâtres ou les salles de concert, reflète l'état des connaissances en acoustique d'une époque. Les théâtres antiques, par exemple, montrent combien les Grecs maîtrisaient l'acoustique géométrique. A la fin du XVI^{ème} siècle, le plein air fut abandonné au profit des salles fermées. La complexité des phénomènes acoustiques alors apparus provoqua un désarroi chez les spécialistes. Des textes d'époque présentés en annexe 1, témoignent de l'état d'esprit des acousticiens du XIX^{ème} siècle et même de certains acousticiens du XX^{ème} siècle. C'est à partir de 1896 qu'est menée l'étude marquante de W.C. Sabine. Pour caractériser l'effet de réverbérance dans une salle, il utilise un critère qui mesure le temps que met un son pour s'atténuer jusqu'à la limite de l'audible. W.C. Sabine, avec ce premier essai de caractérisation de la qualité acoustique d'une salle, a donné un nouveau souffle à cette discipline.

Des études sur les préférences ont été ensuite menées afin de mieux comprendre les goûts des auditeurs pour certaines qualités acoustiques de salles. Or, il est très difficile de tirer des enseignements généraux de ces études, tant les goûts et les sensibilités diffèrent d'un individu à l'autre. D'autres études, basées sur une simple description de la qualité acoustique, ont permis d'avancer l'hypothèse selon laquelle nous fondons nos jugements sur des facteurs perceptifs communs à tous. Nous serions donc tous sensibles à des facteurs comme le niveau, l'impression d'espace, etc... Il existe des outils mathématiques (les analyses multidimensionnelles) qui permettent de trouver les facteurs qui structurent notre perception, mais il est difficile de travailler directement avec ces facteurs car ils appartiennent au domaine subjectif. Les recherches se sont donc aussi orientées vers la définition de critères objectifs, c'est à dire de critères physiques, mesurables et reproductibles, qui correspondent aux facteurs perceptifs et qui permettent de se repérer dans cette structure perceptive.

Le travail présenté ici s'intègre aux études concernant la caractérisation de la qualité acoustique des salles menées à l'IRCAM sous la direction de Jean-Pascal Jullien depuis cinq ans. Il a pour but de préciser les relations entre les facteurs perceptifs qui structurent notre perception et certains critères objectifs. L'étude permet d'orienter la sélection de ces critères et leur traduction dans le domaine perceptif. Les facteurs seront nommés par des termes choisis, compréhensibles par tous, qui décriront les qualités acoustiques des salles. Le passage du domaine objectif au domaine subjectif et inversement du domaine subjectif au domaine objectif devrait être alors facilité.

Ce rapport peut être divisé en quatre parties dont la première est une brève présentation des travaux antérieurs effectués sur le sujet, ceux-ci ayant eu une influence sur le choix des méthodes de travail utilisées pour cette étude [1].

La deuxième partie présente les méthodes de travail. Les tests perceptifs passés à l'IRCAM dans le cadre de cette étude ont porté sur l'écoute de configurations de salles, suivant une procédure présentée dans le deuxième chapitre. La théorie de l'analyse multidimensionnelle utilisée pour étudier ces tests est détaillée dans le troisième chapitre.

Le détail de 17 analyses constitue le corps de ce rapport. Les tests sont regroupés suivant les critères objectifs qu'ils étudient. Un chapitre est consacré à l'étude du niveau sonore, un autre à l'étude des critères de clarté et de temps de réverbération, et enfin deux autres aux effets de coloration et de spatialisation perçus dans les salles. Dans cette troisième partie, les facteurs perceptifs proposés par les analyses multidimensionnelles, sont nommés puis leurs importances respectives comparées en proposant une estimation quantitative des distances perçues pour des variations unitaires des critères objectifs correspondants.

Enfin, le dernier chapitre présente un résumé de la recherche. Il propose des études complémentaires indispensables afin que ce travail puisse aider les acousticiens dans les analyses de qualités acoustiques de salles et pour les décisions qu'ils doivent prendre dans leur travail quotidien. Les annexes 2 et 3 regroupent les calculs des critères finalement sélectionnés, les termes proposés pour décrire les facteurs perceptifs correspondants et les résultats des études quantitatives. L'annexe 4 regroupe pour chaque test les caractéristiques objectives, quelques résultats numériques intéressants pour les analyses et l'interprétation proposée des facteurs perceptifs.

1. ETAT DES CONNAISSANCES

Beranek [2] fut le premier à publier en 1962 une évaluation de la qualité acoustique de 54 salles de renom. Pour décrire la qualité de ces salles, il proposa une liste de 18 termes en les faisant correspondre à certaines mesures physiques (par exemple, le temps de réverbération mesuré aux fréquences moyennes est associé au terme *liveness*). Chaque mesure fut associée à une échelle de notation pour laquelle certaines valeurs correspondaient à une note optimale. La note globale attribuée à chaque salle était alors calculée en sommant les notes obtenues sur chaque terme descriptif. Beranek valida son étude en s'appuyant sur l'avis quasi unanime des grands musiciens de l'époque quant à la qualité acoustique de ces salles.

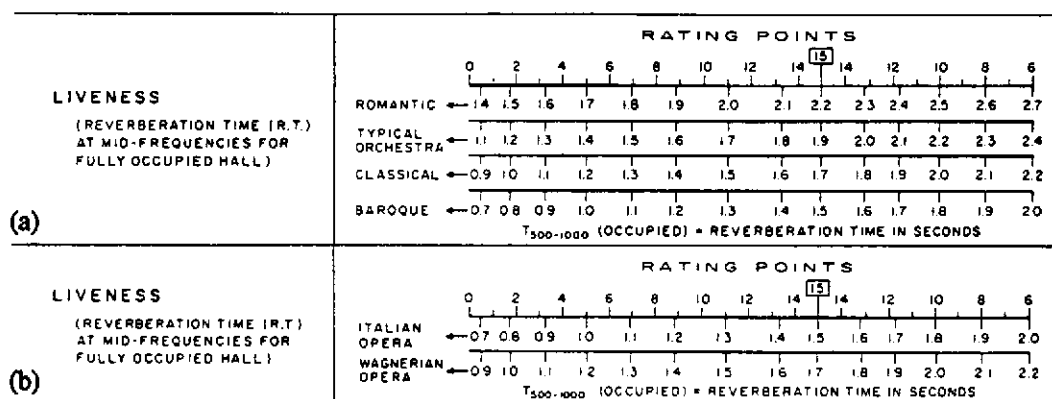


Figure 1.1

Echelle de notation (d'après Beranek) du temps de réverbération associé au terme *liveness*. a: Pour une salle de concert. b: Pour une salle d'opéra.

Bien que les choix des termes descriptifs et des mesures correspondantes n'aient pas été justifiés a priori, bien qu'une note globale ne reflète pas la disparité de qualité d'écoute dans une même salle, ce travail eut le mérite d'avancer les idées suivantes:

La qualité acoustique d'une salle dépend bien plus de la salle elle-même que de la personne qui la juge. Elle peut être estimée à l'aide de mesures acoustiques qui traduisent objectivement les principaux effets subjectifs que les auditeurs perçoivent dans les salles. Enfin, une salle peut être bien adaptée pour un certain style de musique et ne pas l'être pour d'autres. Ces idées sont à la base de nombreuses recherches effectuées, depuis, sur le sujet.

1.1 Préférences

L'objectif principal, lorsque l'on construit une salle de concert, est de concevoir une qualité acoustique qui plaise aux auditeurs. Au début des années 1970, Schroeder et son équipe [3] ont donc étudié les préférences des auditeurs en apportant un soin particulier à leur méthode expérimentale. Ils ont enregistré sur tête artificielle dans 25 salles différentes, un morceau qui était diffusé par deux haut-parleurs sur scène pour s'assurer que l'émission du message sonore était parfaitement reproductible. Les tests acoustiques ont été passés en chambre sourde où deux haut-parleurs, compensés de façon à ce que chaque haut-parleur fut affecté à l'une des deux oreilles, diffusaient les enregistrements à niveau constant [4]. Les sujets devaient donner leur jugement de préférence sur chaque couple d'enregistrements testés.

Siebrasse [5] a effectué une analyse multidimensionnelle de ces jugements de préférence. Ce principe d'analyse permet de structurer les données concernant des phénomènes perceptifs et pour lesquels les dimensions sous-jacentes ne sont pas encore connues. En proposant une représentation spatiale, commune à tous les sujets, de la perception de différentes qualités acoustiques cette méthode traduit mathématiquement les hypothèses avancées par Beranek: nous jugeons tous la qualité acoustique d'une salle à partir de facteurs perceptifs communs.

Siebrasse a restreint son étude sur quatre salles uniquement, de temps de réverbération compris entre 1.7 et 2.2 secondes. Quatre facteurs furent retenus, dont le premier était caractérisé par un accord sur les préférences entre tous les sujets.

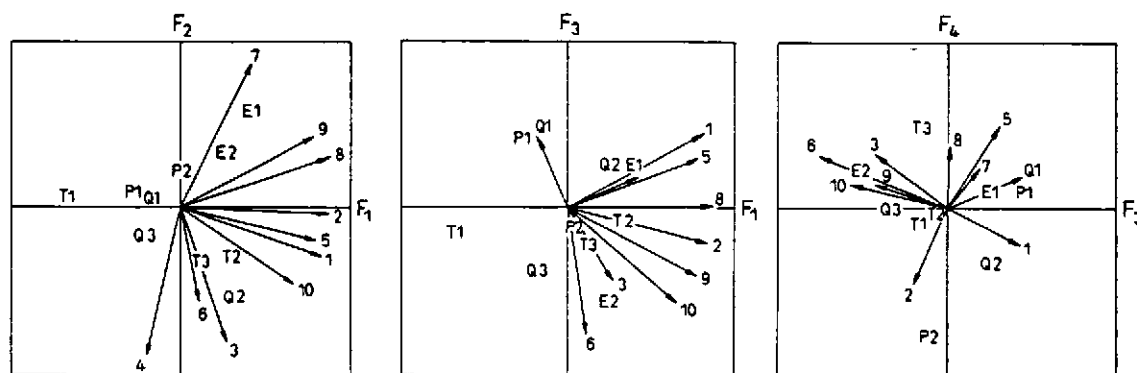


Figure 1.2

Plans subjectifs (d'après Siebrasse) étudiés à partir des préférences de différents sujets. Les lettres correspondent aux quatre salles et leurs indices correspondent à différentes places dans la salle.

Schroeder et Gottlob [5] analysèrent, de la même façon, vingt-deux salles. Ils retrouvèrent un résultat proche de celui de Siebrasse, mais lorsqu'ils effectuèrent une sous-analyse à partir de salles de temps de réverbération inférieur à 2.2 secondes, le premier facteur appelé facteur "consensus" prit deux fois plus d'importance. Celui-ci devenait alors corrélé à 75 % au temps de réverbération. Lorsqu'ils concentrèrent l'analyse sur les salles de temps de réverbération compris entre 2 et 2.2 secondes, le temps de réverbération n'apparut plus alors corrélé à aucun des deux principaux facteurs.

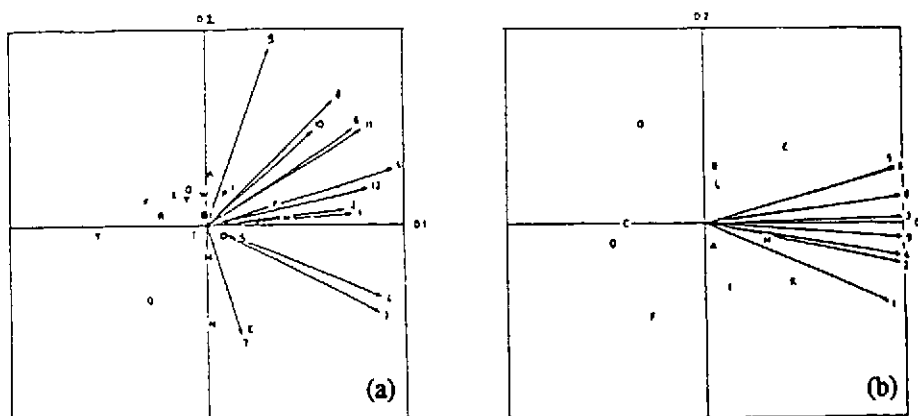


Figure 1.3

Plans subjectifs (d'après Schroeder et Gottlob). a: avec 22 salles. b: avec 11 salles de temps de réverbération inférieur à 2.2 s.

Le choix des configurations de salles testées, dans ce genre d'expérience, est primordial. Un critère, dont la plage de variation est insignifiante, passera inaperçu dans l'analyse. Par contre, des valeurs insuffisantes ou excessives, lui donneront trop d'importance et risqueront de cacher les autres facteurs. De plus, dans cette étude, le premier facteur est assez facile à interpréter, mais les trois autres le sont beaucoup moins. Fonder une analyse sur les préférences est donc un choix délicat, tant les goûts diffèrent d'une personne à l'autre.

Aussi d'autres études ont fait abstraction du goût des auditeurs en s'appuyant tout simplement sur une description de la qualité acoustique d'une salle.

1.2 Facteurs perceptifs

A la fin des années 1970, Wilkens, toujours à l'aide d'une analyse multidimensionnelle, a proposé un modèle de perception de la qualité acoustique dans les salles à partir des descriptions données par différents auditeurs [6].

Les sujets, soumis au test, écoutaient au casque des enregistrements réalisés au cours d'une tournée de l'Orchestre Philharmonique de Berlin. Trois passages musicaux avaient été enregistrés sur une tête artificielle, en quatre places différentes, dans chacune des six salles évaluées. Pour chaque écoute, les sujets devaient indiquer, sur une échelle allant de 1 à 6, la note attribuée à chaque paire d'adjectifs suivants (traduits de l'allemand):

	1	2	3	4	5	6	
1 <i>small</i>	-	-	-	-	-	-	<i>large</i>
2 <i>pleasant</i>	-	-	-	-	-	-	<i>unpleasant</i>
3 <i>unclear</i>	-	-	-	-	-	-	<i>clear</i>
4 <i>soft</i>	-	-	-	-	-	-	<i>hard</i>
5 <i>brilliant</i>	-	-	-	-	-	-	<i>dull</i>
6 <i>rounded</i>	-	-	-	-	-	-	<i>pointed</i>
7 <i>vigourous</i>	-	-	-	-	-	-	<i>muted</i>
8 <i>appealing</i>	-	-	-	-	-	-	<i>unappealing</i>
9 <i>blunt</i>	-	-	-	-	-	-	<i>sharp</i>
10 <i>diffuse</i>	-	-	-	-	-	-	<i>concentrated</i>
11 <i>overbearing</i>	-	-	-	-	-	-	<i>reticent</i>
12 <i>light</i>	-	-	-	-	-	-	<i>dark</i>
13 <i>muddy</i>	-	-	-	-	-	-	<i>transparent</i>
14 <i>dry</i>	-	-	-	-	-	-	<i>reverberant</i>
15 <i>weak</i>	-	-	-	-	-	-	<i>strong</i>
16 <i>emphasized</i> <i>treble</i>	-	-	-	-	-	-	<i>treble not</i> <i>emphasized</i>
17 <i>emphasized</i> <i>bass</i>	-	-	-	-	-	-	<i>bass not</i> <i>emphasized</i>
18 <i>beautiful</i>	-	-	-	-	-	-	<i>ugly</i>
19 <i>soft</i>	-	-	-	-	-	-	<i>loud</i>

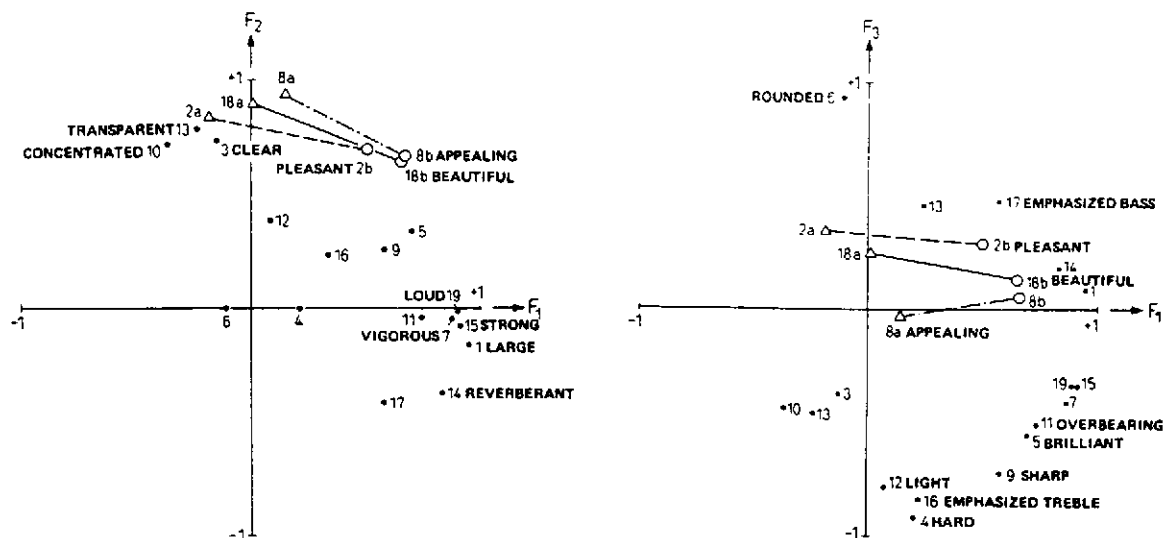


Figure 1.4

Plans subjectifs (d'après Wilkens) étudiés à partir de la liste de paires d'adjectifs présentée ci-dessus.

Trois facteurs perceptifs importants, expliquant presque 90% de la variance totale des réponses, furent retenus. La position des termes descriptifs par rapport aux facteurs a permis à Wilkens de proposer une interprétation: le premier facteur fut appelé *ampleur du son*, le deuxième *précision d'écoute*, et le dernier *timbre*. Dans cette analyse, deux groupes de personnes apparaissent, les uns préférant une bonne ampleur du son, les autres une meilleure précision d'écoute. L'analyse factorielle, effectuée sur chacun des groupes pris séparément, donne les mêmes facteurs perceptifs. Ceci semble donc mettre en évidence la stabilité de la notion de facteur perceptif.

Pour caractériser par la mesure les trois facteurs perceptifs, Lehman et Wilkens [7] ont sélectionné trois critères objectifs: le temps de réverbération TR , le temps central ts et la force sonore G . Le premier facteur *ampleur du son* a une corrélation de 0.80 avec le critère de force sonore G , ainsi qu'une corrélation de 0.50 avec le temps central ts . Le deuxième facteur *précision d'écoute* a une corrélation de -0.65 avec le temps de réverbération TR , de -0.72 avec le temps central, et une corrélation curieusement inférieure à 0.50 avec la clarté $C 80$. Le troisième facteur *timbre* permet de distinguer les salles suivant leur réponse en fréquence. Il est donc caractérisé par la mesure de certains critères, comme le temps de réverbération et la force sonore, dans chaque bande d'octave.

$$C 80 = 10 \log \frac{\int_{0 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} h_o^2(t) \cdot dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} h_o^2(t) \cdot dt}$$

$h_o(t)$ est la réponse impulsionnelle du canal acoustique étudié mesurée avec un micro omnidirectionnel. La clarté est donc le rapport de l'énergie précoce ($\leq 50 \text{ ms}$ pour $C 50$ ou $\leq 80 \text{ ms}$ pour $C 80$) à l'énergie tardive.

$$t_s = \frac{\int_{0 \text{ ms}}^{\infty} t \cdot h_o^2(t) \cdot dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{\infty} h_o^2(t) \cdot dt}$$

Le temps central est en fait le barycentre en temps pondéré par l'énergie.

$$G = 10 \log \frac{\int_{0 \text{ ms}}^{\infty} h_o^2(t) \cdot dt}{4\pi R^2 \int_{0 \text{ ms}}^{\infty} h_R^2(t) \cdot dt}$$

La force sonore est une mesure de l'énergie totale normalisée par la puissance de la source supposée omnidirectionnelle.

Bien que cet ensemble de recherches soit rigoureux, quelques points doivent être soulevés. L'utilisation d'une liste de termes descriptifs limite le jugement des sujets. En effet, si un aspect de la perception n'est pas présent dans cette liste, le facteur, s'il existe, ne pourra pas apparaître dans l'analyse. Tous les sujets n'interprètent pas forcément de la même façon les adjectifs proposés. Et enfin, l'écoute sur casque distord le champ sonore et ne restitue pas l'impression d'espace que les auditeurs ressentent dans une vraie salle. C'est peut être pour cela que Wilkens ne mentionne cet aspect de la perception que par le couple *small - large* dans sa liste de termes descriptifs.

1.3 Critères objectifs

Les facteurs perceptifs comme nous l'avons vu, ne sont pas facilement appréhendables. Aussi, la recherche de critères objectifs a été menée parallèlement aux études précédentes. Ces critères correspondent à des mesures physiques qui doivent être pertinentes pour notre perception. Or la constatation qu'il suffit d'un nombre limité de facteurs subjectifs pour modéliser notre perception de la qualité acoustique dans les salles, a motivé la recherche d'un nombre réduit de critères objectifs.

1.3.1 Force sonore

Ce facteur a déjà été corrélé au critère G , mais il peut être aussi corrélé au critère NIV équivalent au critère G mais pour lequel la normalisation est calculée à partir d'une source de référence.

$$NIV = 10 \log \int_{0 \text{ ms}}^{\infty} \frac{h_o^2(t) \cdot dt}{p_{ref}^2}$$

$h_o(t)$ est la réponse impulsionnelle du canal acoustique étudié, mesurée avec un micro omnidirectionnel. La pression de référence est égale à $2 \cdot 10^{-5}$ Pa.

1.3.2 Clarté

Le deuxième facteur introduit par Wilkens a été corrélé aux critères $C 80$ et ts . Les besoins en télécommunication ont favorisé les recherches sur la compréhension de la parole. Cette dernière nécessite des critères différents de ceux utilisés pour la musique. Le critère de clarté $C 50$ est alors préféré au critère $C 80$, mais d'autres critères ont été proposés pour l'étude de l'intelligibilité de la parole.

1.3.2.1 Rapport signal sur bruit

Lochner et Burger [8] ont distingué le "son utile" E_u (son direct plus fraction utile des premières réflexions) du son "perturbant" E_n (bruit de fond plus énergie des premières réflexions après 95 ms) et proposèrent ainsi un rapport signal sur bruit S/B, confirmant que, pour l'effet de clarté, le temps de réverbération est moins important que la répartition des premières réflexions.

$$\frac{S}{B} = 10 \log \frac{k \cdot E_u}{kE_n + L_b} \quad \text{où}$$

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

L_b est le niveau du bruit ambiant. La pondération $a(p, t)$ des premières réflexions assimilées au son direct dépend du retard et du niveau de celles-ci par rapport au son direct.

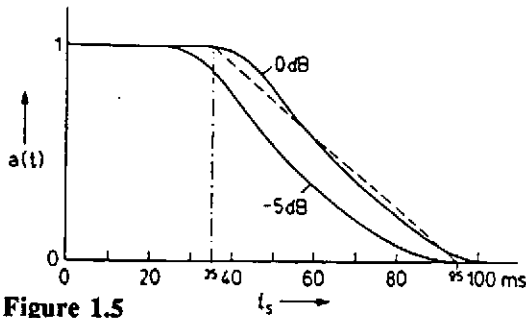


Figure 1.5

Pondération $a(p, t)$ des réflexions utiles pour calculer le rapport signal sur bruit (d'après Lochner et Burger).

1.3.2.2 Indice de transfert de modulation

Houtgast et Steeneken [9] ont développé un critère qui prend en compte les nuisances telles que le bruit ambiant, la distorsion des transducteurs, la distorsion temporelle due aux premières réflexions nuisibles. Ils proposèrent le calcul des *MTI* (modulation transmission index) pour chaque bande d'octave de 125 Hz à 8 kHz, valeurs qui mesurent la capacité de la salle à transmettre une modulation lente de fréquence (de 0.4 Hz à 20 Hz) d'un signal large bande.

1.3.3 Timbre

L'influence des valeurs de certains critères en fonction des fréquences a été étudiée entre autre par Plomb [10]. Il a comparé la perception des différences de phase à la perception des différences d'amplitude dans les réponses en fréquence. Il est intéressant de noter qu'il a utilisé la méthode d'analyse multidimensionnelle INDSCAL pour quantifier ces deux aspects de la perception du timbre. Il en a conclu que les auditeurs sont beaucoup plus sensibles aux différences d'amplitude qu'aux différences de phase.

La méthode INDSCAL pour l'étude des similitudes de timbre entre instruments de musique, a aussi été utilisée par David Wessel [11]. Cette étude n'a pas de rapport direct avec notre travail, mais c'est pour celle-ci que D. Wessel a introduit le programme INDSCAL à l'IRCAM.

La coloration des salles a aussi été étudiée par D.A. Berkley [12]. Il a proposé d'étudier l'influence des toutes premières réflexions sur la réponse en fréquence en mesurant le critère de déviation spectrale *DS*.

$$DS = \sqrt{\frac{1}{F} \int_0^F (\log |\hat{h}(v)| - \frac{1}{F} \int_0^F \log |\hat{h}(v)| \cdot dv)^2 dv}$$

$\hat{h}(v)$ est la transformée de Fourier de la réponse impulsionnelle $h(t)$ limitée aux premières millisecondes. Ce critère correspond donc à un calcul d'écart type.

1.3.4 Impression d'espace

Ce facteur qui traduit un effet de spatialisation n'est pas apparu dans l'étude de Wilkens pour la raison que nous avons déjà vue à la fin du paragraphe 1.2. C'est pourtant un facteur important dans la perception de la qualité acoustique d'une salle.

1.3.4.1 Distance de réverbération

L'éloignement d'une source se traduit, dans une salle, par une diminution du son direct, tandis que le champ réverbéré reste constant. Reichardt et Schmidt [13] ont calculé le critère H , rapport du son direct au champ réverbéré, qui est lié à la perception subjective de l'éloignement de la source (d'où son nom "distance de réverbération").

$$H = 10 \log \frac{\int_{0 \text{ ms}}^{5 \text{ ms}} h_o^2(t) \cdot dt}{\int_{5 \text{ ms}}^{\infty} h_o^2(t) \cdot dt}$$

1.3.4.2 Indice de spatialisation

Reichardt et Lehmann [14] analysèrent l'effet spatial de la perception en trois concepts: l'impression d'espace (sentiment d'être entouré par le son), la réverbérance (sentiment que les sons traînent), et la dimension subjective de la salle. Ils ont proposé, pour évaluer l'impression d'espace, de calculer l'indice de spatialisation R , rapport de l'énergie spatialisante à l'énergie frontale. L'énergie spatialisante est la somme du champ réverbéré après 80 ms et des premières réflexions arrivant sur le côté entre 25 et 80 ms. L'énergie frontale est la somme de l'énergie arrivant avant 25 ms et des réflexions frontales arrivant entre 25 et 80 ms.

$$R = 10 \log \frac{\int_{25 \text{ ms}}^{\infty} h_o^2(t) \cdot dt - \int_{25 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} h_{c_{av}}^2(t) \cdot dt}{\int_{0 \text{ ms}}^{25 \text{ ms}} h_o^2(t) \cdot dt + \int_{25 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} h_{c_{av}}^2(t) \cdot dt}$$

$h_o(t)$ et $h_{c_{av}}(t)$ sont respectivement les réponses impulsionnelles mesurées avec un micro omnidirectionnel puis cardioïde orienté vers l'avant.

1.3.4.3 Fraction d'énergie latérale précoce

L'impression d'espace, pour Barron et Marshall [15], est la différence entre le sentiment d'être à l'intérieur de la musique (*feeling inside the music*) et celui de la recevoir au travers d'une fenêtre (*looking at it, as through a window*). Ils étudièrent l'effet perceptif d'une réflexion quelconque (direction, retard, intensité), en ajustant le niveau des réflexions des champs sonores testés jusqu'à obtention de la même sensation d'impression d'espace qu'un champ sonore de référence. Ils proposèrent donc le critère L_f (fraction d'énergie latérale précoce).

$$L_f = \frac{\sum_{t=5\text{ ms}}^{t=80\text{ ms}} r \cdot |\sin\alpha| \cdot \cos\beta}{\sum_{t=0\text{ ms}}^{t=80\text{ ms}} r}$$

r est l'énergie arrivant d'une direction faisant un angle d'azimut α par rapport à une direction frontale et d'élévation β par rapport à un plan horizontal au niveau de la tête du sujet.

1.3.4.4 Efficacité latérale

Ce critère traduit le même effet d'impression d'espace que celui décrit ci-dessus. Il a été proposé par Jordan [16] et se calcule de la façon suivante:

$$L_E = \frac{\int_{25\text{ ms}}^{80\text{ ms}} h_g^2(t) \cdot dt}{\int_{0\text{ ms}}^{80\text{ ms}} h_o^2(t) \cdot dt}$$

$h_g(t)$ est la réponse impulsionnelle mesurée à l'aide d'un micro "figure 8" qui intègre l'énergie sur les lobes latéraux. Ce critère est assez semblable au critère L_f à la différence près que les pondérations en angle ici sont élevées au carré.

1.3.4.5 Coefficient de cohérence

Damaske [17] a montré qu'il était possible de produire artificiellement en chambre sourde, une bonne diffusion avec quatre ou cinq haut-parleurs émettant des signaux décorrélés. Une faible diffusion spatiale correspond à la faculté de localiser facilement la source, une forte diffusion donne l'impression d'être plongé dans le son. Il a étudié, avec Ando, l'influence du positionnement des haut-parleurs sur la diffusion. Celle-ci est mesurée

par le coefficient de cohérence IACC (interaural crosscorrelation), maximum de l'intercorrélation normalisée des deux signaux enregistrés sur une tête artificielle.

$$IACC = \max_{-1 \text{ ms} < \tau < +1 \text{ ms}} \frac{\int_{0 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} h_d(t) \cdot h_g(t+\tau) dt}{\sqrt{\int_{0 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} h_d^2(t) dt \cdot \int_{0 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} h_g^2(t) dt}}$$

h_d et h_g sont les réponses impulsionnelles mesurées dans les oreilles droite et gauche d'une tête artificielle. La définition de ce critère varie d'un auteur à l'autre.

1.4 Corrélations entre critères

La redondance des critères concernant l'acoustique des salles a été mise en évidence par l'équipe de l'IRCAM en 1985, dans une étude de corrélations entre les différents critères proposés par la littérature [18]. Les corrélations ont été calculées à partir de 2430 canaux acoustiques, correspondant à 3 points de mesures pour chacune des 81 configurations différentes de l'Espace de Projection de l'IRCAM, et 10 filtrages passe bande. Cinq salles supplémentaires ont aussi été mesurées au CSTB. Ces espaces offrent les caractéristiques suivantes:

	Minimum	Maximum
Volume	1800 m ³	3800 m ³
TR	0.64 s	4.60 s
C80	-6 dB	15 dB
IACC	0.19	1.0
MTI	0.29	0.88

(a)

	Minimum	Maximum
Volume	2000 m ³	2400 m ³
TR	0.94 s	2.58 s
C80	-6.9 dB	11.4 dB
MTI	0.38	0.84

(b)

Tableau 1.1

Caractéristiques des salles utilisées pour l'étude des corrélations entre différents critères. a: Caractéristiques de l'Espace de Projection de l'IRCAM. b: Caractéristiques des cinq salles du CSTB.

Les résultats sont présentés dans le tableau suivant:

	TR	EDT	C80	t_s	H	MTI	IACC	LE
TR	1.00	0.93	-0.74	0.90	-0.30	-0.77	-0.13	0.32
EDT		1.00	-0.88	0.98	-0.50	-0.90	-0.21	0.31
C80			1.00	-0.91	0.68	0.96	0.26	-0.25
t_s				1.00	-0.60	-0.94	-0.23	0.30
H					1.00	0.72	0.22	0.00
MTI						1.00	0.22	-0.24
IACC							1.00	-0.75

Tableau 1.2

Corrélations entre critères utilisés dans la littérature pour caractériser la qualité acoustique dans les salles.

Nous remarquons que deux critères très différents dans la conception de leur calcul, comme les critères *C80* et *MTI*, peuvent être fortement corrélés (96% pour cet exemple). La réduction du nombre de critères semble donc justifiée.

Jean-Pascal Jullien propose alors un modèle de distribution temporelle de l'énergie qui permet de calculer la majorité des critères à partir d'une sélection de critères indépendants.

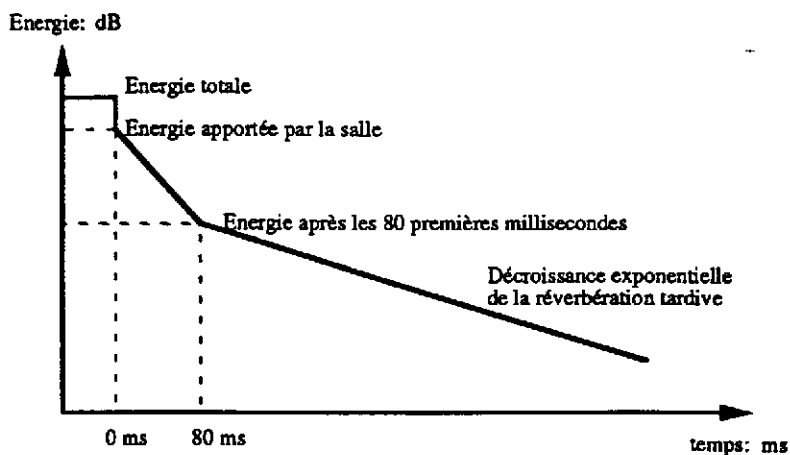


Figure 1.6

Modèle de distribution temporelle de l'énergie sonore dans une salle (d'après J.P. Jullien).

Ces critères sont importants car ils sont à la base des tests perceptifs qui font l'objet de ce rapport. Pour éviter les problèmes de calibrage de micro omnidirectionnel et "figure 8", le critère *LE* a été remplacé par le critère *Lf* calculé en décibels. Les tests ont été menés afin de vérifier la pertinence de ces critères dans le domaine perceptif.

- L'énergie du son direct: *Dir*
 - L'énergie totale: *NIV*
 - La Clarté à 80 ms: *C80*
 - Le temps de réverbération après 80 ms: *TR*
 - La fraction d'énergie latérale précoce: *Lf*
-
- L'énergie totale et le temps de réverbération en fonction des fréquences.

1.5 Objectifs de la recherche

La mesure des critères objectifs a été facilité par les progrès réalisés dans le domaine du traitement du signal. Pour le physicien, la transformation opérée par une salle (une chaîne électroacoustique ou tout type de "canal acoustique") peut être représentée complètement par sa réponse impulsionnelle. Celle-ci porte la trace de toutes les informations apportées par la salle entre la source et le récepteur.

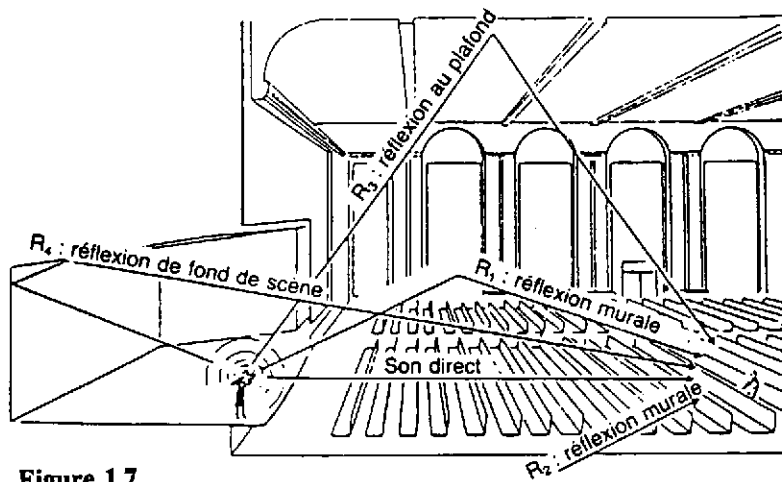


Figure 1.7
Propagation sonore dans une salle (d'après Beranek)

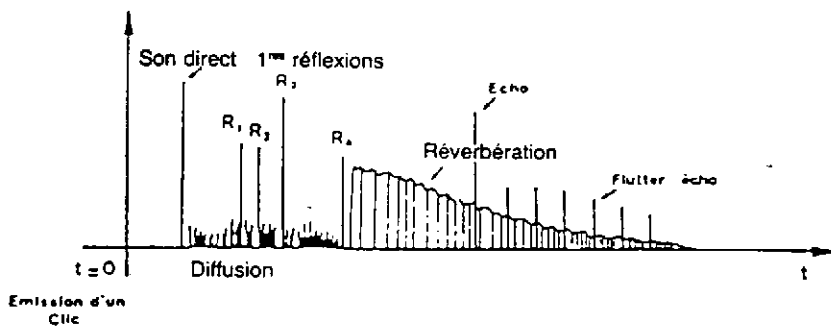


Figure 1.8
Réponse impulsionnelle théorique correspondant à la figure 1.7.

Les progrès, dans le domaine informatique, ont permis de développer des programmes, soit de mesure, soit de simulation, qui permettent de mesurer in situ ou de prédire sur plans cette réponse impulsionnelle. Le calcul de tous les critères sélectionnés s'effectue donc facilement à partir de ces réponses impulsionnelles, suivant le modèle cité au paragraphe précédent.

Bien qu'il reste encore des problèmes à résoudre dans le domaine de la mesure (reproductibilité des mesures surtout liée au choix de la source), le calcul des critères ne pose plus de difficultés majeures. Par contre, interpréter ces critères objectifs dans le domaine perceptif reste encore bien souvent problématique. Le but de cette recherche est de mieux définir les relations qui existent entre facteurs perceptifs et critères objectifs.

Wilkens et Schroeder ont analysé la qualité acoustique de salles réelles. Dans ce cas, les critères objectifs sont liés par les lois de la propagation acoustique et ne sont pas maîtrisables indépendamment les uns des autres. Par exemple, pour un volume donné, le temps de réverbération et le niveau de réverbération sont deux critères dépendants. Aussi, nous avons choisi de construire artificiellement les champs sonores. Cela permettra d'effectuer un balisage systématique de différentes qualités acoustiques et d'explorer les limites de notre perception afin de vérifier la pertinence des critères sélectionnés. Une attention particulière sera donc portée au réglage des configurations. Il faut préciser que le choix d'un quelconque système de reproduction des champs sonores peut être contesté tout simplement pour la raison qu'aucun système ne peut reproduire la réalité. Un système de reproduction ne peut tenir compte des réactions qu'ont les interprètes pour s'adapter à la qualité acoustique des salles dans lesquelles ils exécutent les oeuvres. Barron [19] est conscient de ce problème et choisi d'étudier les jugements perceptifs d'auditeurs experts au cours de concerts dans des salles réelles. Il gagne alors bien sûr en réalité des conditions expérimentales, mais il se prive de la possibilité de maîtriser les critères des configurations de salles testées. Le fait de reproduire artificiellement des conditions d'écoute est donc un choix discutable, mais qui permet une grande souplesse d'expérimentation.

Nous avons vu les inconvénients des méthodes d'analyse choisies par Wilkens ou Schroeder. Aussi, sans remettre en question l'utilisation d'une méthode d'analyse multidimensionnelle qui correspond bien aux hypothèses sur notre perception de la qualité acoustique dans les salles, nous avons opté pour une analyse non verbale fondée sur les jugements de dissimilarité.

Lorsqu'une représentation structurée de la manière dont les auditeurs perçoivent les différences de qualités acoustiques dans les salles sera établie, les facteurs sous-jacents seront corrélés si possible à des mesures de critères objectifs. La relation qui lie le domaine perceptif au domaine objectif sera détaillée par l'étude de l'indépendance des facteurs perceptifs, des substitutions entre les différents critères objectifs et de la quantification des facteurs.

Pour que ce modèle soit utilisé par un large public, les facteurs seront décrits a posteriori par des adjectifs tirés du vocabulaire courant, qui qualifieront au mieux le phénomène perceptif ainsi révélé.

Il est possible d'imaginer les applications d'une telle relation. Dans le sens objectif-perceptif, elle permettrait de traduire, dans un langage accessible à tous, les résultats des études acoustiques. Dans le sens perceptif-objectif, elle permettrait de mieux interpréter les désirs des constructeurs. Et dans le cas où les salles ont une acoustique variable (mécanique ou électroacoustique), la commande des configurations pourrait se faire non plus uniquement par des spécialistes mais par les régisseurs, à partir d'une description perceptive de la qualité acoustique de la salle voulue.

2. METHODE EXPERIMENTALE

Nous avons vu, précédemment, que le choix des configurations des salles écoutées dans les tests perceptifs est primordial. Pour maîtriser les valeurs des critères acoustiques et contrôler ces critères indépendamment les uns des autres, un système de construction de champ sonore a été développé et installé dans la chambre sourde. Il permet de diffuser, dans des conditions expérimentales identiques, différents messages, musicaux ou non. L'analyse de tests identiques (les mêmes configurations de salles sont jugées) mais passés sur des messages différents permettent de dégager des résultats circonstanciés au type de message sonore écouté.

2.1 Système de construction des champs sonores

La construction d'un champ sonore en un seul point d'écoute correspond, en pratique, à la création artificielle d'une réponse impulsionnelle, à l'aide de périphériques de traitement du signal. La distribution des différents signaux de sortie est assurée par neuf haut-parleurs YAMAHA (NS 10) répartis en demi-sphère de rayon approximatif de 2.50 mètres, dans la chambre sourde. Les azimuts par rapport à une direction frontale et les élévations par rapport à un plan passant par la tête du sujet sont présentés dans le tableau 2.1. Le son direct est diffusé sur un seul haut-parleur frontal HP0 car les enregistrements effectués en chambre sourde sont des signaux monophoniques. Les premières réflexions sont diffusées, au choix, sur l'un ou plusieurs des huit autres haut-parleurs, la réverbération est diffusée sur ces huit haut-parleurs. La distribution sur les haut-parleurs ainsi que le contrôle des niveaux des signaux diffusés sont assurés par deux matrices AKAI (MB 76). La réverbération est réalisée par un réverbérateur YAMAHA (REV 1) et les premières réflexions sont créées par huit délais YAMAHA (YDD 2600). Un ensemble de filtres AKAI (PEQ 6) permet d'égaliser la réponse en fréquence des haut-parleurs et de jouer sur le spectre du message sonore diffusé dans la salle simulée.

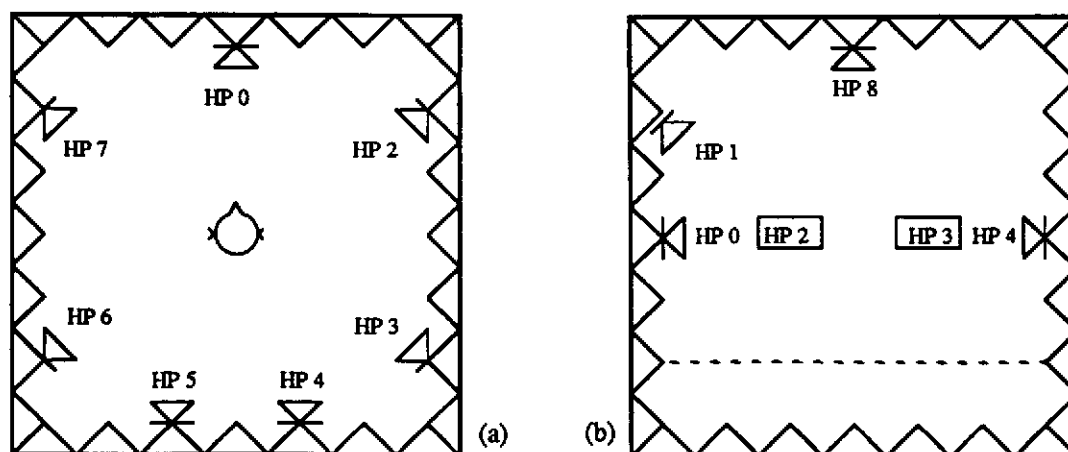


Figure 2.1

Système de haut-parleurs installé dans la chambre sourde. a: Coupe horizontale.
b: Coupe verticale.

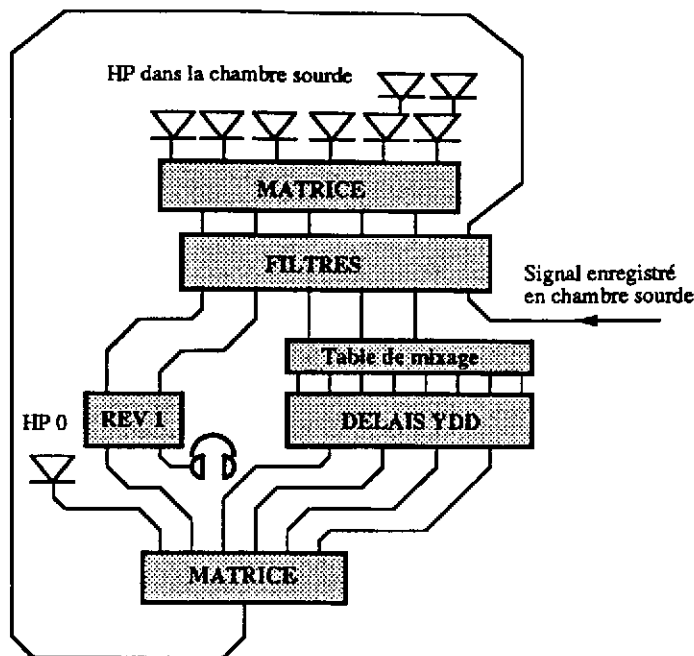


Figure 2.2
Schéma de montage des périphériques de traitement de signal permettant de construire le champ sonore voulu dans la chambre sourde.

Haut-parleur	Azimuth $ \alpha $	Élévation β
HP0	0°	0°
HP1	0°	30°
HP2	50°	0°
HP3	130°	0°
HP4	155°	0°
HP5	155°	0°
HP6	130°	0°
HP7	50°	0°
HP8	0°	90°

Tableau 2.1
Azimuts et élévations des haut-parleurs installés dans la chambre sourde.

Les motifs musicaux utilisés dans les tests furent tous enregistrés en chambre sourde et durent environ 50 secondes. Ce sont des extraits d'un aria pour Soprano de Mozart interprété par Phyllis Bryn-Julson, du 2^{ème} mouvement de la sonate pour flûte solo de Bach interprété par Itzvan Matuz, d'un quintette à vents de Darius Milhaud et, pour la parole, d'un texte de Le Clézio lu par René Caussé. Nous n'avons pas utilisé de musique symphonique car nous n'avons pas à notre disposition d'enregistrements anéchoïques de ce style de musique. De plus, nous avons restreint cette recherche à l'étude de la musique dite "classique".

Certains tests ont été réalisés avec une écoute au casque, lorsque les effets spatiaux n'étaient pas étudiés.

2.2 Réglage des configurations

Le réglage des configurations a consisté à régler les périphériques de façon à obtenir certaines valeurs des critères étudiés. Deux phases ont été nécessaires, l'une étant le réglage proprement dit, l'autre la vérification des valeurs obtenues des critères.

2.2.1 Réglage des périphériques

Le signal enregistré en chambre sourde est dans un premier temps filtré de façon à corriger les défauts des réponses en fréquence des haut-parleurs (figure 2.2), ceux-ci présentant une perte d'environ 5 dB à 250 Hz. Ce signal est donc diffusé comme son direct sur le haut-parleur HP0.

Les premières réflexions sont créées par des délais simples pouvant aller jusqu'au nombre de huit. Ces huit sorties sont mixées sur trois voies, filtrées ou non suivant les tests, puis contrôlées en niveau et distribuées par une matrice. Les haut-parleurs 4-5 et 6-8 sont couplés, à cause du nombre limité de sorties de cette matrice.

La réverbération est créée par un réverbérateur où les fonctions d'onde directe et de premières réflexions ne sont pas utilisées. La répartition des deux uniques sorties décorréliées du réverbérateur a été étudiée de façon à rendre le champ réverbéré le plus diffus possible (sortie + sur les haut-parleurs 2, 4-5 et 7, sortie - sur les haut-parleurs 1, 3 et 6-8). Les courbes suivantes (figure 2.3) montrent combien il est important que le degré de cohérence de signaux diffusés sur haut-parleurs soit le plus petit possible pour que la perception du champ sonore soit diffuse [26].

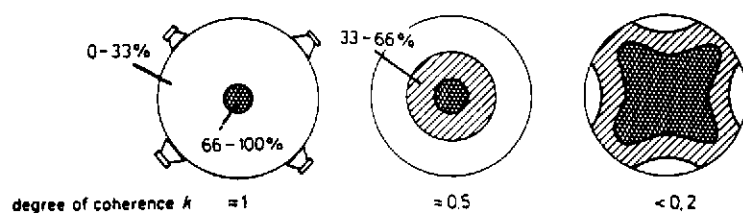


Figure 2.3

Localisation d'un signal diffusé par quatre haut-parleurs en fonction de leur degré de cohérence (Damaské d'après Blauert).

Le niveau de réverbération diffusé est semblable pour chaque haut-parleur exception faite du haut-parleur HP1 qui diffuse un niveau supérieur de 3 dB afin que le champ réverbéré avant soit équivalent au champ réverbéré arrière.

Lorsque les configurations ont été construites pour des tests passés au casque, tous les réglages ont été faits uniquement sur le réverbérateur (REV 1), en utilisant alors les fonctions d'onde directe et de premières réflexions.

2.2.2 Mesures des différents critères objectifs

Toutes les configurations ont été systématiquement mesurées à l'aide d'un système de mesure développé au CNET [20]. Le signal d'entrée est un bruit blanc pseudo-aléatoire (séquence binaire de longueur maximale) dont l'autocorrélation est une impulsion de Dirac (modulo la période du signal d'entrée que l'on choisit supérieure à la durée de la réponse impulsionnelle pour éviter tout recouvrement). Le calcul de la réponse impulsionnelle se fait par intercorrélation entre la séquence d'entrée et la sortie du canal acoustique (signal enregistré au microphone), au moyen de l'algorithme rapide de la transformée de Hadamard.

2.3 Sujets soumis aux tests

Les sujets n'ont pas fait l'objet d'une sélection très sévère car aucun audiogramme n'a été effectué avant de commencer les tests. Leur âge a été simplement limité à 35-40 ans avec une grande proportion de sujets d'environ 30 ans, sans troubles connus de l'audition. Aucune sélection n'a été faite sur leurs aptitudes musicales, mais une majorité de sujets avait un intérêt et une connaissance musicale certaine (musiciens amateurs). Le nombre de sujets ayant participé aux expériences est en moyenne de 12 par test, pour juger une moyenne de 8 configurations. Lorsque cela s'est avéré nécessaire, des sous-analyses limitées aux jugements d'acousticiens habitués à ce genre d'écoute ont été réalisées. Ce sont ces mêmes acousticiens plus "expérimentés" qui ont participé à l'étude de la nomination des facteurs perceptifs.

2.4 Procédure des tests

Le parti pris de ne pas imposer aux auditeurs de termes descriptifs sujets à appréciation sémantique, a naturellement orienté notre choix vers une méthode non verbale, qui ne fait appel qu'aux jugements de dissimilarité entre les différentes configurations testées. Les sujets sont donc assis au centre de la chambre sourde et dirigent eux-même la cadence des écoutes des configurations. Leur tâche est de noter entre 0 et 10 la différence de qualité acoustique entre deux écoutes (0 correspondant à aucune différence entre les deux configurations, 10 étant un maximum de différence). Le sujet doit aussi préciser laquelle des deux écoutes il préfère, mais cette donnée n'intervient pas dans l'ensemble des données initiales utiles à l'analyse. Elle ne sert qu'à créer un nouveau critère, calculé pour chaque individu. A chaque paire écoutée, les configurations sont affectées du poids +1 ou -1 suivant qu'elles sont préférées ou rejetées. La préférence de chaque configuration est la somme de tous les poids qui lui sont attribués au cours du test (figure 2.4 a).

*** FICHER INDSCAL ***

clar2.fic

	11	7	2				
ME75	ME76	ME86	ME77	ME78	ME85	ME79	
1							
-2	-4	4	2	4	-4	0	
2							
-6	-2	0	7	2	-4	3	
3							
-6	-4	2	6	2	-2	2	
4							
-3	-3	4	5	0	-3	0	
5							
-6	-3	2	4	6	-3	0	
6							
-2	-2	-2	2	4	-2	2	
7							
-6	-2	6	2	4	-4	0	

(a)

*** FICHER INDSCAL ***

clar2.fic

	11	7	2				
ME75	ME76	ME86	ME77	ME78	ME85	ME79	
1							
200.							
800.	700.						
600.	700.	800.					
800.	900.	200.	300.				
200.	200.	700.	800.	900.			
400.	200.	600.	300.	500.	400.		
2							
100.							
600.	700.						
300.	300.	400.					
500.	500.	200.	200.				
100.	100.	500.	300.	500.			
400.	200.	400.	100.	400.	200.		

(b)

Figure 2.4

Fichiers des données. a: Données des préférences de chaque sujet. b: Données des dissimilarités entre configurations pour chaque sujet.

Chaque test est basé sur l'écoute d'un nombre n réduit de configurations car, pour satisfaire aux exigences de la méthode d'analyse choisie, chaque configuration doit être comparée à toutes les autres. Aucune paire de configurations identiques n'est présentée aux sujets (la dissimilarité étant nulle dans ce cas). De plus, la souplesse de la procédure expérimentale des tests, supprimant l'effet d'ordre d'écoute, permet d'égaliser la dissimilarité entre la configuration j et la configuration k , notée δ_{jk} , à celle des configurations k et j , notée δ_{kj} . Un test consiste donc à écouter $n(n-1)/2$ paires de configurations. Les dissimilarités sont alors acquises par le programme sous forme de demi-matrices (figure 2.4 b). Un maximum de 10 configurations a été réglé pour un même test afin d'en limiter la durée à environ 40 minutes. On comprend donc que la difficulté de ce test est de se constituer sa propre échelle des différences. Pour avoir une idée de l'écart maximal (c'est à dire du 10), les configurations estimées les plus distantes par la majorité des auditeurs sont écoutées, comme entraînément, au tout début de chaque test.

Les messages sonores, enregistrés en chambre sourde, sont diffusés en continu et leur transformation est assurée par l'ensemble des périphériques du système présenté précédemment. Un même programme de commande et d'acquisition envoie des codes aux périphériques et permet le passage en temps réel d'une configuration à l'autre. Il permet ainsi au sujet de commuter, à volonté, entre deux configurations puis d'inscrire ses jugements de dissimilarité et de préférence (figure 2.5).

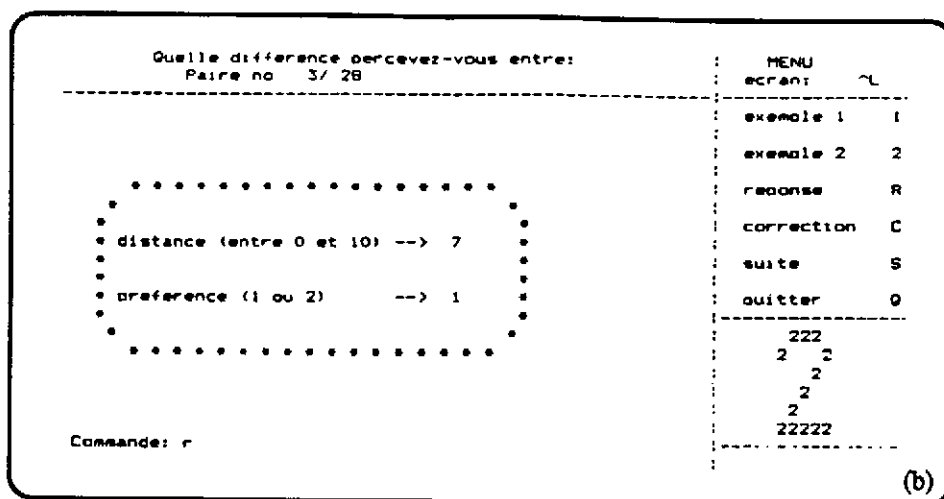
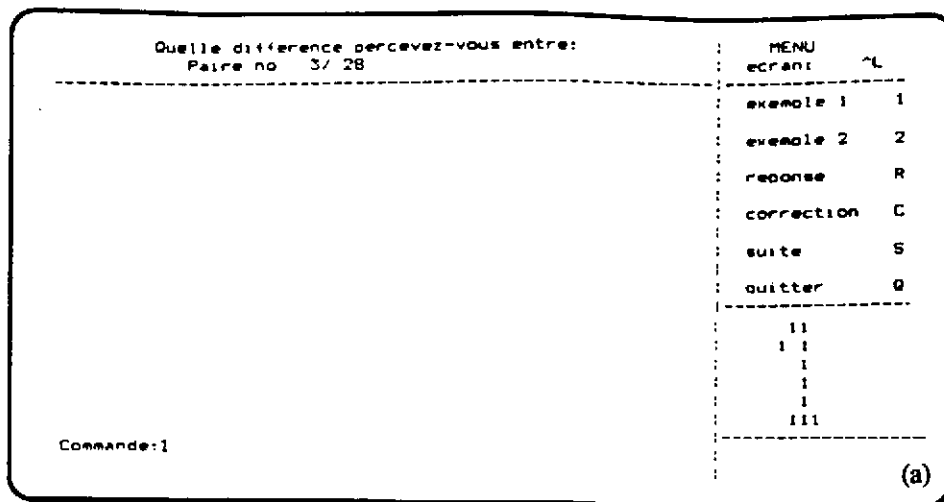


Figure 2.5

Ecran de contrôle du terminal à partir duquel sont envoyées les commandes des périphériques et sur lequel sont enregistrées les réponses des sujets. a: Commande de la première configuration d'une paire. b: Commande de la deuxième configuration et acquisition de la dissimilarité entre les deux configurations de la paire ainsi écoutée, ainsi que l'acquisition de la configuration préférée.

2.5 Nomination des facteurs perceptifs

Nous verrons dans le chapitre suivant que, les tests étant passés et les analyses effectuées, il reste à nommer les facteurs perceptifs qui structurent notre perception. Nous avons vu qu'aucune sélection systématique n'a été opérée sur les sujets pour passer les tests, mais le choix de termes qui décrivent les facteurs perceptifs a été effectué par six acousticiens, travaillant soit dans le domaine de l'acoustique des salles, soit dans le domaine de l'acoustique musicale.

Les sujets écoutent les configurations dans l'ordre dans lequel elles se situent le long du facteur étudié en terminant par l'écoute successive des configurations extrêmes. Des termes qui décrivent les effets perçus sont ensuite proposés. Une discussion est alors engagée pour choisir les noms des facteurs perceptifs qui doivent être compréhensibles par tous.

3. METHODE D'ANALYSE

Les analyses multidimensionnelles ont pour but d'extraire les facteurs subjectifs sur lesquels nous nous basons tous, pour appréhender un phénomène. Il est facile d'imaginer que des facteurs tels que *sucré* ou *épicé* sont des facteurs perceptifs qui structurent notre façon de goûter différentes cuisines. Même si les goûts diffèrent d'une personne à l'autre, nous sommes tous sensibles à ces facteurs. Les analyses multidimensionnelles permettent, à partir de données subjectives, (par exemple, les 19 notes données par les sujets qui ont passé le test de Wilkens, aux différentes paires d'adjectifs), d'extraire un nombre minimum de facteurs qui structurent la perception du phénomène étudié. Toujours pour Wilkens, trois facteurs ont été retenus: *ampleur du son, précision d'écoute et timbre*. Les données initiales diffèrent d'un sujet à l'autre, mais les facteurs sont communs à tous les sujets. Les données propres à chaque sujet sont retrouvées grâce aux importances respectives qu'ils accordent aux différents facteurs.

Les analyses factorielles permettent d'extraire de p données subjectives pour chacun des n stimuli, un nombre réduit r de facteurs à partir desquels les données initiales peuvent se retrouver, en pondérant les facteurs x par des coefficients w . Cela se traduit sous forme matricielle

$$\begin{bmatrix} d_{11} \dots d_{1n} \\ \dots \\ \dots d_{jk} \dots \\ \dots \\ d_{p1} \dots d_{pn} \end{bmatrix} \approx \begin{bmatrix} w_{11} \dots w_{1r} \\ \dots \\ \dots w_{j1} \dots \\ \dots \\ w_{p1} \dots w_{pr} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} x_{11} \dots x_{1n} \\ \dots x_{ik} \dots \\ x_{r1} \dots x_{rn} \end{bmatrix}$$

$$D \approx W \cdot X$$

où les matrices D et W sont propres à chaque sujet tandis que la matrice X est commune à tous les sujets. D est la matrice des données subjectives, W est la matrice des pondérations et X caractérise la structure du modèle proposé par l'analyse.

3.1 Analyse INDSCAL

On peut se demander comment un programme informatique peut trouver des facteurs perceptifs alors que les sujets eux-mêmes, lorsqu'ils passent le test, ne sont pas totalement conscients de la démarche qui leur permet d'estimer les différences.

Les dissimilarités entre les configurations de salles écoutées permettent à l'analyse de placer ces configurations dans un espace à r dimensions pour que les distances inter-configurations respectent les dissimilarités données. De la même manière, elle placerait les

viles les unes par rapport aux autres, à partir d'un tableau de distances inter-villes. Les configurations qui ont été estimées peu différentes (δ_{jk} petit) seront proches dans cet espace, par contre celles estimées très différentes (δ_{jk} proche de 10) seront éloignées dans ce même espace. Le nombre de dimensions est imposé au programme, mais on verra au paragraphe suivant comment on peut l'optimiser. Le programme peut, dans un premier temps, trouver autant d'espaces propres différents qu'il y a de sujets. Le même nombre de dimensions est imposé à tous les espaces propres.

Pour cette analyse (INDividual Differences SCALing) [21], les données initiales sont les dissimilarités δ_{jk}^i , entre les $j^{\text{ème}}$ et $k^{\text{ème}}$ configurations pour chaque sujet i . L'analyse estime les coordonnées x_{ji} des configurations dans un espace à r dimensions, de façon à limiter l'écart entre les distances estimées \hat{d}_{jk}^i inter-configurations et les dissimilarités δ_{jk}^i .

La première étape est de convertir les dissimilarités δ_{jk}^i en distances euclidiennes d_{jk}^i , tout simplement en ajoutant une constante a_i de façon à assurer l'inégalité triangulaire.

$$d_{jk}^i = \delta_{jk}^i + a^i \quad \text{où} \quad a^i = \max_{jkl} (\delta_{jl}^i - \delta_{jk}^i - \delta_{kl}^i)$$

Les distances estimées par le modèle s'écrivent

$$\hat{d}_{jk}^i = \sqrt{\sum_{t=1}^r w_t^i (x_{jt} - x_{kt})^2}$$

ou encore

$$\hat{d}_{jk}^i = \sqrt{\sum_{t=1}^r (y_{jt}^i - y_{kt}^i)^2} \quad \text{avec} \quad y_{jt}^i = \sqrt{w_t^i} x_{jt}$$

où les w_t^i sont les poids qu'accordent les sujets i aux différents facteurs t .

Si, comme nous le supposons, nous utilisons tous les mêmes facteurs pour appréhender un phénomène, par contre nous avons chacun notre propre sensibilité. Lorsque nous allons voir un film au cinéma, la qualité de l'image, le jeu des acteurs, la qualité du scénario, la mise en scène... sont des facteurs auxquels nous sommes tous sensibles. Ces facteurs indépendants forment un espace qu'on peut appeler *espace cinéma*. Mais certaines personnes sont beaucoup plus sensibles à l'histoire, d'autres aux acteurs, d'autres encore se moqueront de l'histoire pourvu que la mise en scène soit intéressante. Les premières auront un *espace cinéma* dilaté vers le *scénario*, les deuxièmes vers les *acteurs*, et enfin les dernières auront un espace écrasé sur la *mise en scène*.

Revenons aux espaces trouvés par l'analyse. On peut imaginer qu'un programme puisse superposer tous les espaces propres en les plaçant de façon à trouver alternativement

les axes de dilatation possibles et à faire coïncider les positions des configurations dans l'espace. Ces axes de dilatation sont les facteurs perceptifs communs à tous les sujets. L'espace moyen appelé espace perceptif, permet de retrouver tous les espaces propres, tout simplement en le dilatant dans un sens ou dans un autre suivant le sujet. Ces coefficients de dilatation sont les poids que les sujets accordent aux différents facteurs.

Il faut insister sur le fait qu'aucun terme descriptif n'est proposé par le programme. Nous avons déjà vu qu'une analyse pouvait être menée sans description des facteurs (Siebrasse au paragraphe 1.1). Seules, la connaissance des configurations testées et une écoute a posteriori permettent de donner un nom à ces axes.

Les distances d_{jk}^i sont transformées en produits scalaires b_{jk}^i . La variance des produits scalaires est normalisée pour tous les sujets i , afin de leur donner une importance égale.

$$(1) \quad b_{jk}^i = \frac{-1}{2}(d_{jk}^{i,2} - d_j^{i,2} - d_k^{i,2} + d_{..}^{i,2}) \quad \text{où}$$

$$d_j^{i,2} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n d_{jk}^{i,2} \quad d_k^{i,2} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n d_{jk}^{i,2} \quad \text{et} \quad d_{..}^{i,2} = \frac{1}{n^2} \sum_{j,k=1}^n d_{jk}^{i,2}$$

En effet, si l'on assimile d_{jk} à $\sqrt{\sum_{t=1}^r (y_{jt} - y_{kt})^2}$ pour tous les sujets i ,

$$(2) \quad d_{jk}^2 = \sum_{t=1}^r y_{jt}^2 + \sum_{t=1}^r y_{kt}^2 - 2b_{jk} \quad \text{avec}$$

$$b_{jk} = \sum_{t=1}^r y_{jt} y_{kt}$$

Si l'on choisit arbitrairement l'origine du repère au barycentre des configurations, alors

$$\sum_{j=1}^n y_{jt} = 0 \quad \text{pour tout } t \quad \text{donc} \quad \sum_{j=1}^n b_{jk} = 0$$

En développant les d_{jk}^2 , d_k^2 et $d_{..}^2$, on obtient

$$(3) \quad d_k^2 = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^r y_{jt}^2 + \sum_{t=1}^r y_{kt}^2$$

$$(4) \quad d_j^2 = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \sum_{t=1}^r y_{kt}^2 + \sum_{t=1}^r y_{jt}^2$$

$$(5) \quad d_{..}^2 = \frac{2}{n} \sum_{j=1}^n \sum_{t=1}^r y_{jt}^2$$

En écrivant l'équation (2)+(5)-(3)-(4) on retrouve l'équation (1)

La normalisation impose de plus pour chaque sujet $\sum_{j,k=1}^n b_{jk}^i = 1$

Les distances estimées par le modèle \hat{d}_{jk}^i peuvent elles aussi être converties en produits scalaires de vecteurs de composantes y_{ji}^i , dans un repère où l'origine est fixée arbitrairement au barycentre des configurations.

$$\hat{b}_{jk}^i = \sum_{t=1}^r y_{jt}^i \cdot y_{kt}^i \quad \text{avec} \quad \sum_{j=1}^n y_{jt}^i = 0$$

L'optimisation [22] consiste à minimiser, au sens des moindres carrés, la fonction d'erreur $S(W, X)$.

$$S(W, X) = \sum_{i,j,k} (b_{jk}^i - \hat{b}_{jk}^i)^2$$

soit

$$S(W, X) = \sum_{i,j,k} (b_{jk}^i - \sum_{t=1}^r w_t^i \cdot x_{jt}^L \cdot x_{kt}^R)^2$$

A chaque itération, les b_{jk}^i sont assimilés aux \hat{b}_{jk}^i . L'optimisation s'effectue alternativement au cours des itérations sur les poids w_t^i et sur les coordonnées x_{jt} . La première itération s'intéresse donc aux poids w_t^i . En posant

$$s = n(j-1)+k \quad \text{et} \quad g_{st} = x_{jt}^L \cdot x_{kt}^R$$

on obtient une relation classique dans les analyses multidimensionnelles, qui s'écrit sous forme matricielle

$$b_{jk}^i \approx \hat{b}_{jk}^i = b_{is}^* = \sum_{t=1}^r w_{it} g_{st} \quad \text{soit} \quad B^* = W \cdot G^T$$

on fixe arbitrairement les valeurs des composantes des matrices X^L et X^R de façon à calculer la matrice G . Pour calculer la matrice W , il faut inverser la matrice G^T . Or celle-ci n'est pas en général inversible. La méthode de pseudo-inversion qui consiste à éliminer les valeurs singulières de la matrice G^T , permet d'approximer la matrice W en écrivant

$$W = B^* \cdot G \cdot (G^T \cdot G)^{-1}$$

Les w_{it} étant maintenant calculés, la seconde itération va optimiser les composantes de la matrice X^L , en gardant les valeurs fixées à la première itération pour la matrice X^R . De la même manière on pose

$$u = m(i-1)+k \quad \text{et} \quad h_{ui} = w_{ii} x_{ii}^R$$

$$b_{jk}^i = b_{ju}^{**} = \sum_{i=1}^r x_{ji}^L \cdot h_{ui} \quad \text{soit} \quad B^{**} = W \cdot H^T$$

$$X^L = B^{**} \cdot H \cdot (H^T \cdot H)^{-1}$$

A chaque itération, l'erreur $S(W, X)$ diminue. La convergence vers un minimum local est assurée, à défaut d'un minimum global (qui est atteint expérimentalement d'ailleurs dans presque tous les cas). Lorsque le processus converge, les matrices X^L et X^R sont à peu près équivalentes. Elles sont alors égalisées et une dernière itération fixe les valeurs de la matrice W . Une dernière normalisation permet d'assurer une meilleure visualisation des plans représentant l'espace perceptif $\sum_{j=1}^r x_{ji}^2 = 1$.

Si tous les sujets répondent de la même manière au test, leurs espaces respectifs seront aussi les mêmes et le programme ne trouvera aucun axe de dilatation. Il donnera la position des configurations les unes par rapport aux autres mais le repère de l'espace proposé sera arbitraire. On peut alors effectuer une rotation des axes afin de trouver les couples facteurs perceptifs et critères objectifs qui optimisent leurs corrélations. Cela reviendrait en fait à faire une analyse en composantes principales.

La corrélation entre les poids des différents sujets sur les axes renseigne sur leur dispersion dans l'espace.

$$S_{ir} = \frac{\sum_{i=1}^s w_i^i w_r^i}{\sqrt{\sum_{i=1}^s (w_i^{i2}) \cdot (w_r^{i2})}}$$

Si cette corrélation tend vers 1, tous les sujets sont regroupés et une rotation des axes est alors permise. Si cette corrélation est nulle, les sujets sont alors séparés en deux groupes, les uns étant insensibles à l'axe i , les autres étant insensibles à l'axe r . Il est intéressant de connaître la valeur de S_{ir} dans le cas où les sujets sont dispersés uniformément dans un plan.

$$w_i^i = \cos\theta \quad \text{et} \quad w_r^i = \sin\theta$$

$$S_{ir} = \frac{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot d\theta}{\sqrt{\int_0^{\frac{\pi}{2}} \cos^2\theta \cdot d\theta \cdot \int_0^{\frac{\pi}{2}} \sin^2\theta \cdot d\theta}} = \frac{2}{\pi} = 0.64$$

La corrélation entre les coordonnées des configurations sur ces axes t et t' est donnée par la formule suivante:

$$S_{tt'}^* = \frac{\sum_{j=1}^n x_{jt} x_{jt'}}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{jt}^2) \cdot (x_{jt'}^2)}}$$

La valeur de $S_{tt'}^*$ mesure la quantité d'information conservée par les axes t et t' par rapport à la quantité d'information injectée a priori par les valeurs des critères des configurations.

3.2 Nombre de dimensions

Nous avons vu que le programme INDSCAL est capable de trouver une solution lorsqu'on lui impose le nombre de dimensions r . Le problème est donc maintenant de choisir le bon nombre de dimensions adapté à l'analyse. Ceci est impossible a priori. Aussi, pour chaque test, cinq analyses INDSCAL dont le nombre de dimensions décroît de 5 jusqu'à 1 sont systématiquement effectuées. Deux calculs appropriés vont nous permettre alors de choisir le nombre optimal de ces dimensions perceptives.

3.2.1 Variance expliquée

La variance expliquée R^2 est le carré de la moyenne des corrélations sur l'ensemble des sujets entre les produits scalaires b_{jk}^i et ceux estimés par le modèle \hat{b}_{jk}^i . Elle quantifie donc l'ajustement du modèle aux données initiales.

$$R = \frac{\sum_{i,j,k} (b_{jk}^i \cdot \sum_{t=1}^r w_t^i x_{jt} \cdot x_{kt})}{\sqrt{(\sum_{i,j,k} b_{jk}^i{}^2) \cdot (\sum_{i,j,k} (\sum_{t=1}^r w_t^i x_{jt} \cdot x_{kt})^2)}}$$

Le pourcentage de variance pour chaque axe est estimé en pondérant R^2 par le poids normalisé moyen que les sujets ont accordé à cet axe.

$$v_t = \frac{(\sum_{i=1}^I w_t^i) \cdot R^2}{\sum_{i,t} w_t^i{}^2}$$

Les distances estimées par le modèle, moyennées sur tous les sujets et normalisées s'écrivent donc

$$\bar{d}_{jk} = \sqrt{\sum_{t=1}^r v_t \cdot (x_{jt} - x_{kt})^2} \quad \text{notée aussi} \quad \bar{d}_{jk}^0$$

En théorie, la courbe d'évolution de R^2 en fonction du nombre de dimensions imposé à l'analyse, présente une croissance rapide puis un coude au niveau du nombre de dimensions qui semble le mieux approprié à l'analyse. Ensuite, malgré une légère amélioration de la variance par addition d'une dimension supplémentaire, l'interprétation ne s'en trouve pas améliorée. On se limitera donc au nombre de dimensions qui correspond à la rupture de pente de la courbe.

Or en pratique, dans certains cas, cette évolution est presque linéaire. Il est donc impossible de déterminer une quelconque dimension optimale.

3.2.2 Jackknife

Le jackknife [23] est une méthode qui permet d'étudier la stabilité d'une solution proposée par une analyse multidimensionnelle. Plus la solution est stable, moins l'introduction d'une perturbation aura d'effet sur celle-ci. On étudie alors systématiquement la perturbation due à la suppression d'un sujet ou d'une configuration. J. de Leeuw et J. Meulman proposent de calculer les erreurs sur les coordonnées des configurations. Or une configuration supprimée peut provoquer une rotation des axes par rapport à l'analyse globale. Ils proposent donc d'effectuer systématiquement des rotations et des dilatations afin de minimiser les erreurs. Nous avons choisi pour simplifier les calculs, de calculer les erreurs sur les distances interconfigurations afin d'éviter les problèmes de rotations.

Une configuration peut introduire, à elle seule, un facteur perceptif. La suppression de celle-ci peut considérablement influencer sur la solution. Pour optimiser le nombre de dimensions, il vaut mieux dans notre étude, perturber l'analyse par une suppression systématique d'un sujet. Par contre, la perturbation induite par la suppression d'une configuration informe sur la stabilité des distances inter-configurations. Pour quantifier les effets dus aux perturbations, on calcule une erreur globale, moyenne des erreurs induites par chaque suppression de sujet. Pour chaque analyse, cette erreur globale passe par un minimum lorsque le nombre de dimensions choisi optimise la stabilité de l'analyse.

On note \bar{D}^0 la matrice de distances moyennes données par l'analyse globale en r dimensions et \bar{D}^i la matrice des distances de la sous-analyse sans le sujet i . Pour chaque sous-analyse, une matrice d'erreur est calculée de la façon suivante:

$$\Delta_{jk}^i = | \bar{d}_{jk}^i - \bar{d}_{jk}^0 |$$

La moyenne quadratique sur toutes les sous-analyses estime ainsi pour chaque paire de configuration k et j une erreur notée σ_{jk} . L'erreur relative sera notée σ_{jk}^R

$$\sigma_{jk} = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s \Delta_{jk}^i{}^2} \quad \text{et} \quad \sigma_{jk}^R = \frac{\sigma_{jk}}{\bar{d}_{jk}^0}$$

$$\text{L'erreur relative globale } E^R \text{ vaut alors } \sqrt{\frac{2}{n(n-1)} \sum_{j=2, k=1}^{j=n, k=j-1} \sigma_{jk}^R{}^2}$$

Cette erreur relative globale passe par un minimum lorsque le nombre de dimensions imposé à l'analyse donne une stabilité maximale à celle-ci.

Le même raisonnement peut être tenu lorsque le jackknife s'applique aux configurations, en faisant attention aux zéros introduits dans les matrices Δ^j : $\bar{d}_{jk}^j = \bar{d}_{kj}^j = 0$. Une normalisation des matrices \bar{D}^j et \bar{D}^0 s'impose, en faisant abstraction de la ligne et de la colonne j pour la matrice \bar{D}^0 . Dans ce cas, la valeur d'erreur relative globale est moins intéressante que les valeurs d'erreur relative σ_{jk}^R pour chaque paire de configurations. Les erreurs relatives σ_{jk}^R témoignent de la validité des distances \bar{d}_{jk}^0 .

3.3 Conclusions sur l'analyse et l'interprétation des tests

Nous avons donc à notre disposition une méthode d'analyse qui devrait, nous l'espérons, nous aider à comprendre la perception de la qualité acoustique dans les salles. Lors de l'interprétation des tests perceptifs, plusieurs calculs systématiques sont nécessaires.

3.3.1 Nombre de dimensions

Tout d'abord, le nombre de dimensions approprié à l'analyse doit être déterminé. Les courbes donnant les évolutions de la variance des réponses du test R^2 (§ 3.2.1) et de l'erreur relative globale E^R (§ 3.2.2) permettent de fixer ce nombre de dimensions optimum.

3.3.2 Pourcentage de variance par axe

Les pourcentages de variance pour chaque axe v_i permettent de restituer les distances réelles et les angles réels entre configurations. En effet, le programme de visualisation normalise les coordonnées des configurations sur les axes et la lecture directe des distances et des angles est donc faussée. Par contre, le parallélisme entre segments est conservé lors des dilatations. C'est donc une propriété très importante. Si des variations d'un même critère sont schématisées dans l'espace solution par des segments parallèles, cela se traduit par le fait que les variations de ce critère sont toujours perçues par la même sensation et jugées comme appartenant au même phénomène perceptif.

3.3.3 Distances interconfigurations

L'espace solution proposé par l'analyse INDSCAL est une triangularisation de l'espace perceptif réel. Plus les dissimilarités données par les sujets sont faibles, plus la triangularisation est fine. Chaque triangle peut être assimilé alors au plan tangent à la surface représentant l'espace perceptif réel. Localement, les angles réels seraient donc alors conservés par l'espace solution. Si, par contre, les dissimilarités sont en moyenne très grandes, l'espace solution ne peut plus alors être assimilé à l'espace tangent et l'interprétation globale doit en tenir compte.

3.3.4 Dispersion de sujets

Les calculs de corrélation entre les poids des différents sujets sur les axes S_{it} permet d'envisager ou non une rotation des axes de l'analyse (fin du § 3.1). Les valeurs de S_{it} sont assez trompeuses car nous avons vu que lorsque les sujets sont répartis uniformément dans un plan solution, S_{it} vaut 0.64, valeur assez élevée ne permettant pas une rotation. Pour envisager une rotation, nous avons donc été assez sévères dans le choix de la valeur limite de S_{it} qui a été évaluée à environ 90% à partir surtout des tests NIV1 et NIV2 aux paragraphes 4.2 et 4.3. Il est sûr que cette limite est arbitraire et qu'il est parfois difficile de décider si oui ou non une rotation est permise. Nous verrons qu'il y a peu de cas où cette rotation a pu être envisagée. Le fait que les axes perceptifs soient fixés par l'analyse INDSCAL est un des atouts de cette méthode.

3.3.5 Projections de critères

Les critères objectifs, soit ayant servi à la construction des configurations, soit mesurés pour la circonstance, sont corrélés aux facteurs perceptifs fixés par l'analyse. Lorsqu'un facteur perceptif correspond simplement à la perception de la variation d'un critère, cette corrélation est significative. Lorsqu'un facteur correspond à la perception de la variation d'un critère uniquement dans une zone de valeurs, la corrélation globale entre critère et facteur n'est plus significative.

3.3.6 Corrélations entre coordonnées des configurations sur les axes

La valeur de S_{it}^* mesure la quantité d'information conservée par les axes t et t' par rapport à la quantité d'information injectée a priori par les valeurs des critères des configurations. Si les valeurs des critères varient initialement de façon indépendante, la corrélation entre les facteurs correspondants informe sur la dépendance ($S_{it}^* = 1$) ou l'indépendance conservée des facteurs ($S_{it}^* = 0$). Par contre, si les valeurs des critères sont initialement corrélées, le calcul S_{it}^* ne permet pas de mesurer l'indépendance des facteurs. Même si $S_{it}^* = 1$ cela ne remet pas en cause l'existence de ces deux facteurs perceptifs t et t' .

3.3.7 Nomination des facteurs

Enfin, une écoute structurée des configurations (§ 2.5) permet de proposer un terme ou un ensemble de termes pour chacun des facteurs.

Les chapitres suivants présenteront ainsi le détail des analyses qualitatives des tests psychoacoustiques. Un chapitre est consacré à l'étude du niveau sonore, un autre à l'étude du temps de réverbération et de la clarté, puis deux autres aux effets de coloration et de spatialisation.

4. ETUDE QUALITATIVE DU NIVEAU SONORE

Le niveau sonore en un point d'écoute est un critère qui intègre toute l'énergie qui arrive en ce point. Les premiers tests ont permis d'étudier ce critère mesurant l'énergie totale *NIV* (§ 1.3.1) avec d'autres critères purement temporels, c'est à dire la clarté *C 80* et le temps de réverbération *TR*.

4.1 Réglage du niveau sonore

Il est intéressant de présenter ici la façon dont les valeurs de ce critère ont été mesurées. Tous les niveaux des messages sonores enregistrés en chambre sourde ont été réglés de façon à avoir le même niveau linéaire équivalent en sortie. Les réglages de niveau des configurations ont été ensuite effectués à partir d'un bruit rose, de niveau égal au niveau équivalent des messages sonores.

Pour les tests passés en chambre sourde, le niveau d'écoute de chaque configuration a été simplement mesuré au sonomètre, sans pondération, sur le message sonore écouté pendant le test.

Pour les tests passés avec le casque, une équivalence entre le niveau d'écoute et le niveau électrique de sortie du casque a été recherchée. Pour cela, une tête artificielle a été installée dans la chambre sourde, avec le casque sur les oreilles. Le niveau électrique reçu par un des micros incérés dans les oreilles de la tête artificielle est alors mesuré. Ce niveau est recréé par un haut-parleur situé à un mètre de ce même micro. On peut alors mesurer au sonomètre, à la place du micro, le niveau sonore reçu dans une oreille, et faire l'équivalence avec le niveau d'une voie de sortie du casque. Les mesures de niveau d'écoute pour les configurations des tests écoutés au casque ont donc consisté à mesurer le niveau électrique d'une voie de sortie du casque. A partir de la mesure du niveau entendu dans une oreille, il est difficile de conclure sur le niveau d'écoute réel des configurations que les sujets perçoivent au cours d'un test avec les deux écouteurs sur les oreilles.

On comprend donc qu'il est délicat de comparer les valeurs des niveaux sonores de deux tests qui n'ont pas été passés dans les mêmes conditions expérimentales. Une étude de comparaison des valeurs de critères mesurés en chambre sourde et ceux mesurés sur des configurations écoutées au casque est présentée au paragraphe 8.1.1.

4.2 Niveau - temps de réverbération: NIV1

Ce test simple, passé dans la chambre sourde, a servi de mise au point du système électroacoustique de simulation des champs sonores. Le message écouté était chanté par la soprano Phyllis Bryn Julson. La caractérisation objective des configurations est représentée par le schéma suivant (figure 4.1):

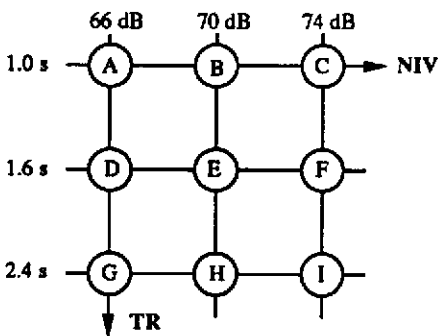


Figure 4.1

Caractéristiques objectives des configurations du test NIV1. La clarté C_{80} est fixée à 0 dB et les premières réflexions sont réparties sur les haut-parleurs HP1, HP2 et HP7.

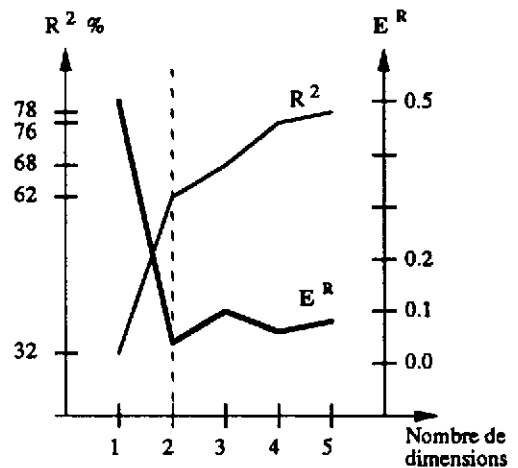


Figure 4.2

Optimisation du nombre de dimensions pour le test NIV1.

Au tout début de ce test, chaque sujet a écouté plusieurs fois des paires perceptivement très différentes comme les paires AI et CG, afin de calibrer leur estimation des dissimilarités. Puis les 72 paires de configurations ont été écoutées et jugées dans un ordre aléatoire.

Cinq analyses INDSCAL dont le nombre de dimensions décroît de 5 jusqu'à 1 ont été effectuées. Regardons les valeurs des variances R^2 ainsi que les valeurs de l'erreur relative globale E^R en fonction de ce nombre de dimensions sur la figure 4.2. Nous voyons que pour les deux mesures, les résultats concordent. Une analyse en deux dimensions semble donc la mieux appropriée. Les pourcentages de variance des réponses du test pour chaque axe valent 32% et 30%.

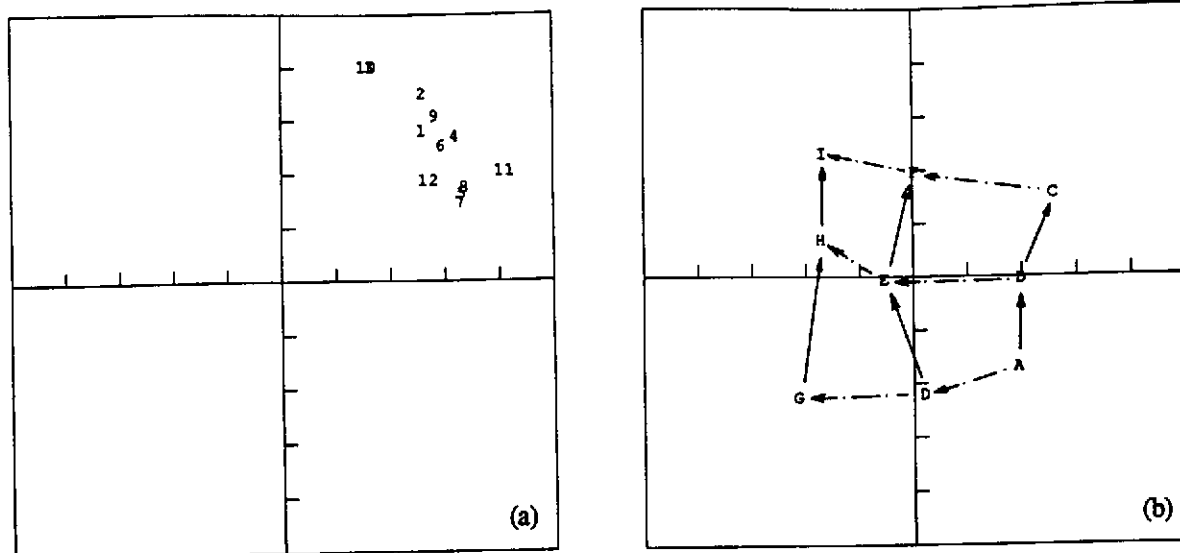


Figure 4.3

Plan 1-2 du test NIV1. a: Plan sujets. b: Plan stimuli.

—— variation de niveau.

- - - - variation de temps de réverbération.

Le premier diagramme appelé plan sujets (figure 4.3 a) place les différents sujets par rapport aux axes grâce à leurs poids respectifs w_i^j . Ici, nous voyons que les sujets sont assez dispersés dans le plan. Bien que S_{12} soit égal à 0.86, valeur qui semble élevée, il est difficile vu la répartition des sujets dans ce plan d'envisager une possible rotation. Les axes du repère peuvent donc être interprétés comme les axes perceptifs de l'espace solution.

Le deuxième diagramme (figure 4.3 b) place les configurations dans le plan solution appelé plan stimuli. Il faut toujours avoir à l'esprit que le programme normalise les coordonnées des configurations sur les axes. Leur position est donc modifiée par rapport à leur vraie position dans l'espace réel solution. Les axes à faible pourcentage de variance sont dilatés pour que la position des configurations sur ces axes puisse être distinguée. Les angles et les distances sont alors modifiés. Pour cette raison, une étude spécifique des distances sera présentée au chapitre suivant. Lorsque cela s'avèrera nécessaire, l'étude des angles sera aussi effectuée.

Les segments de droites - - - - reliant toutes les configurations où seul le temps de réverbération varie, sont approximativement parallèles à l'axe 1. Cela signifie qu'une variation de ce critère est perçue sur le facteur 1. Ce facteur perceptif est donc traduit dans le domaine objectif par le critère de temps de réverbération. Le même raisonnement sur l'axe 2 peut être tenu pour les variations de niveau schématisées par les segments de droite ——— .

Avant de regarder directement sur le graphique les distances et les angles entre les segments, il faut s'assurer de l'équivalence des variances expliquées sur chaque axe. Ici le facteur 1 explique 32% de la variance du test et le facteur 2 explique 30% de variance. Les angles et les distances ne sont donc pas déformés. Les segments représentant les variations de niveau et ceux représentant les variations de temps de réverbération sont perpendiculaires. Les deux critères sont bien indépendants dans ce plan. Ces deux critères étant objectivement décorrélés dans la construction des configurations, la valeur de S_{12}^* qui est égale à 0.005 peut permettre de conclure à l'indépendance des facteurs correspondants.

Ici la distance entre les couples où le niveau varie semble augmenter lorsque la valeur du temps de réverbération augmente. Les distances perceptives AB, DE, GH augmentent alors qu'elles sont mesurées objectivement par la même variation de niveau (4 dB). Serait-on plus sensible à une variation de niveau lorsque le temps de réverbération est élevé? C'est ce que tend à montrer ce test et nous verrons dans le chapitre sur la quantification des facteurs (§ 8.2.1) si cela peut être considéré comme une généralité.

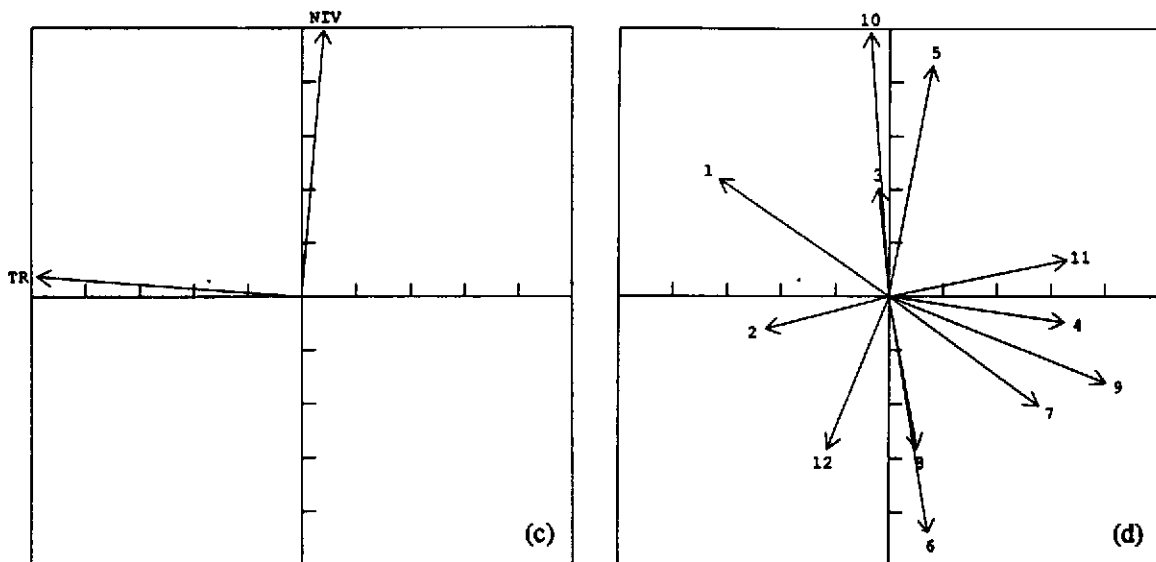


Figure 4.3
Plan 1-2 du test NIV1. c: Plan critères. d: Plan préférences.

Ces plans (figure 4.3 c et d) présentent les projections des critères étudiés et de la préférence de chaque sujet dans le plan stimuli. Ce ne sont donc pas des plans issus directement de l'analyse INDSCAL. Néanmoins, on les appellera par extension plan critères et plan préférences. La figure 4.3 c permet de visualiser la pertinence des critères objectifs dans le domaine perceptif. Plus la norme d'un vecteur est grande et plus sa direction se rapproche d'un axe, mieux il traduit objectivement l'effet perceptif caractérisé par cet axe. Les vecteurs dessinés dans ce plan ont comme composantes les corrélations entre les valeurs des critères et les coordonnées des configurations sur les différents axes. Ici, *NIV* est corrélé à 98% avec le facteur 2 et *TR* est corrélé à -98% avec le facteur 1.

Si l'on note c_j la valeur du critère c pour la configuration j , la corrélation de ce critère c sur les différents axes t s'écrira

$$Cor_{ct} = \frac{\sum_{j=1}^n (x_{jt} - \bar{x}_{jt}) \cdot (c_j - \bar{c}_j)}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (x_{jt} - \bar{x}_{jt})^2 \cdot \sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c}_j)^2}}$$

Nous savons que les coordonnées des configurations sont centrées et qu'elles sont normalisées à 1 sur chaque axe. Aussi

$$\bar{x}_{jt} = \frac{\sum_{j=1}^n x_{jt}}{n} = 0 \quad \text{et} \quad \sum_{j=1}^n x_{jt}^2 = 1 \quad \text{alors}$$

$$Cor_{ct} = \frac{\sum_{j=1}^n x_{jt} \cdot c_j}{\sqrt{\sum_{j=1}^n (c_j - \bar{c}_j)^2}}$$

Enfin le dernier plan appelé plan préférences (figure 4.3 d) présente les vecteurs préférences propres à chaque sujet. Dans ce test, les sujets 3, 5, 6, 8, 10 et 12 ont leur préférence fondée principalement sur le niveau. Les sujets 3, 10 et 5 préfèrent un niveau plus fort tandis que les sujets 6, 8 et 12 préfèrent un niveau plus faible. Un autre groupe de sujets se détache, les sujets 4, 7, 9 et 11 préférant un temps de réverbération faible. Seules les préférences des sujets 1 et 2 s'orientent vers les temps de réverbération forts. On constate une fois de plus que les préférences dépendent du goût de chacun.

Les coordonnées des vecteurs préférences sont calculées de la même manière que les vecteurs critères où les p_j^i , préférence de la configuration j calculée au cours du test qu'a passé le sujet i (§ 2.4), remplacent les c_j .

Ici les p_j^i sont centrées par construction. $\sum_{j=1}^n p_j^i = n \cdot \bar{p}_j^i = 0$

$$Cor_{pt}^i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{jt} p_j^i}{\sqrt{\sum_{j=1}^n p_j^i{}^2}}$$

Pour conclure sur ce test, il ne reste plus qu'à donner un nom aux facteurs perceptifs. Cette dernière phase a été effectuée après avoir fait passer un grand nombre de tests, afin que les auditeurs puissent se concentrer sur les facteurs perceptifs extraits des analyses. Le détail de toutes les configurations écoutées est présenté au paragraphe 4.5, mais ici, pour que l'interprétation soit complète et plus parlante, on peut avancer que les qualificatifs *faible - énergétique* pourraient caractériser les salles situées le long du second facteur, les qualificatifs *réverbérant - sec* pourraient caractériser celles situées le long du premier facteur. Ces derniers qualificatifs n'ont pas été les seuls proposés pour décrire le facteur associé au temps de réverbération. Les termes *grande salle - petite salle* ont aussi été avancés.

4.3 Niveau - Temps de réverbération couplé à la clarté: NIV2

Les configurations de ce test ont été construites uniquement avec le réverbérateur YAMAHA et les écoutes ont été effectuées au casque sur un extrait de texte de Le Clézio. La simulation devait se rapprocher des situations d'écoute rencontrées en salles de conférence. Pour le réglage des configurations, le critère C_{40} a été préféré au critère C_{80} car il est mieux adapté à la parole. Le critère C_{80} sera réservé aux messages musicaux.

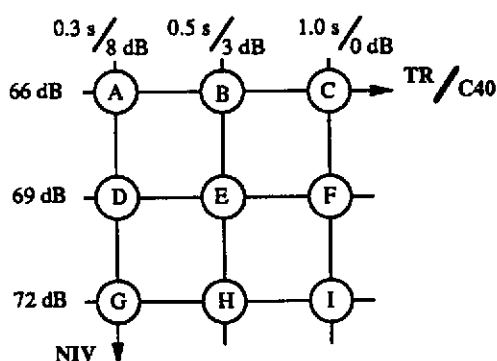


Figure 4.4
Caractéristiques objectives des configurations du test NIV2.

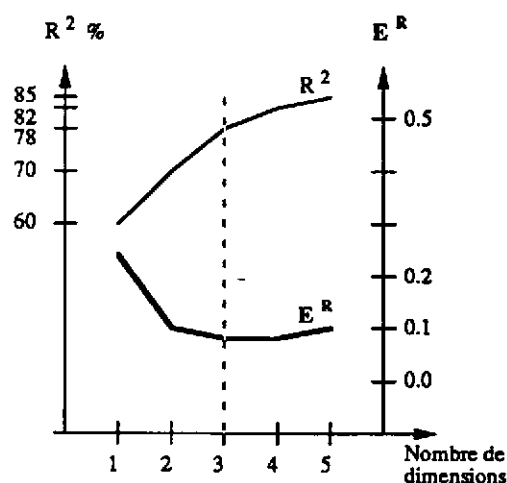


Figure 4.5
Optimisation du nombre de dimensions pour le test NIV2.

Trois dimensions sont nécessaires à l'interprétation de ce test. Elles ont respectivement des variances égales à 50%, 18% et 10%.

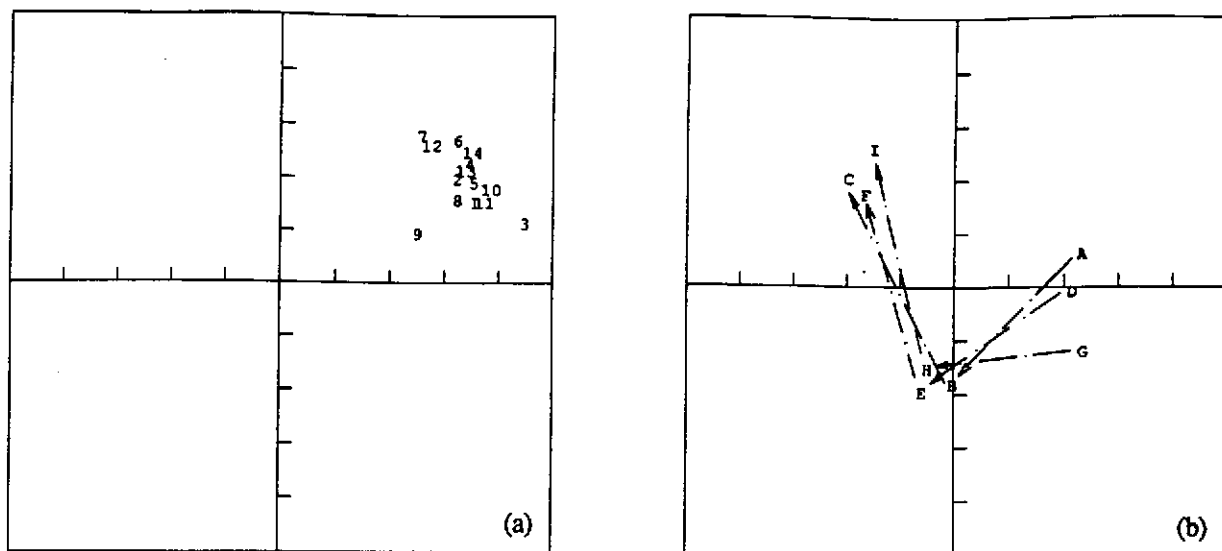


Figure 4.6
 Plan 1-2 du test NIV2. a: Plan sujets. b: Plan stimuli.
 — — — variation de couplage temps de réverbération - clarté.

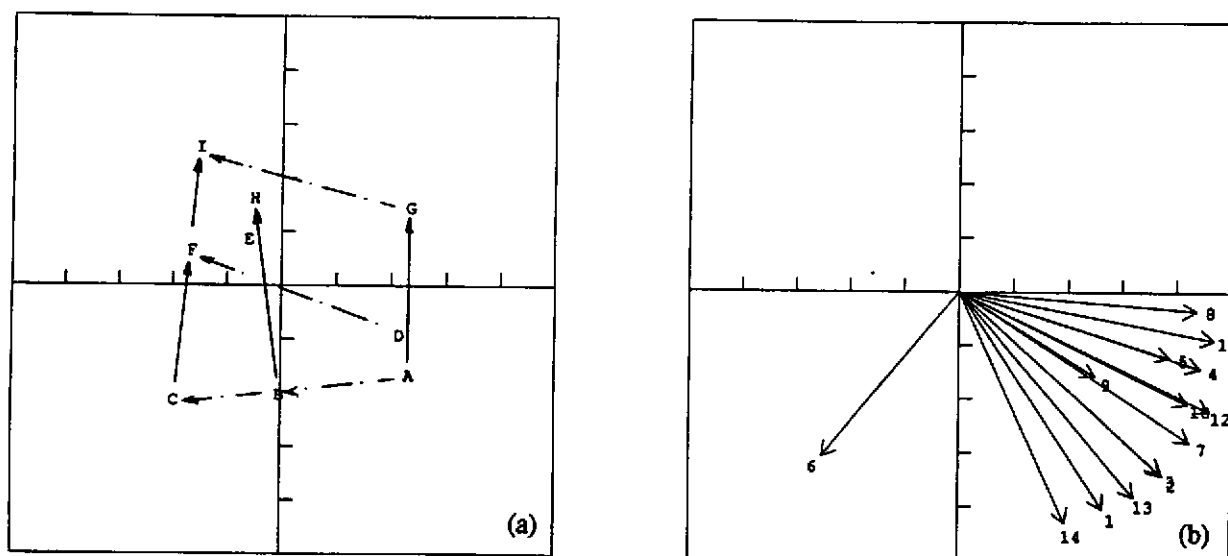


Figure 4.7
 Plan 1-3 du test NIV2. a: Plan stimuli. b: Plan préférences.
 — — — variation de couplage temps de réverbération - clarté.
 — — — variation de niveau.

Dans le plan sujets 1-2 (figure 4.6 a), ces derniers sont assez regroupés $S_{12} = 0.93$. Comme nous l'avons vu au paragraphe 3.3.4, les axes proposés par l'analyse ne sont peut être pas les facteurs perceptifs principaux. On remarque que S_{12} est supérieur à 0.90. Les critères TR et $C80$ sont complètement corrélés dans la construction des configurations. On est donc incapable d'attribuer la cassure qui existe dans le plan stimuli (figure 4.6 b), ni à l'un, ni à l'autre de ces critères. Le fait que l'on retrouve ici une corrélation importante entre les deux facteurs ($S_{12}^* = -0.41$) n'est donc pas significative. Ce plan 1-2 est difficile à interpréter.

Le plan stimuli 1-3 est plus facile à interpréter (figure 4.7 a). Tout d'abord, la dispersion des sujets évaluée par $S_{13} = 0.90$ ne semble pas nécessiter de rotation des axes. La valeur de $S_{13} \approx 0.90$ semble une limite intéressante pour décider de l'éventualité d'une rotation.

Les segments AG, BH et CI sont parallèles à l'axe 3 ($Cor_{NIV\ 3} = 0.94$). Même si les pourcentages de variance ne sont pas équivalents (50% et 10%), les segments AG, BH, CI et AC, DF, GI restent perpendiculaires car une dilatation suivant un axe ou un autre ne modifie pas l'angle entre les axes eux-mêmes. De plus, le critère *NIV* est décorrélé objectivement des critères *C 80* et *TR*. Les valeurs de $S_{31}^* = -0.18$ et $S_{32}^* = 0.01$ montrent donc que la structure indépendante du critère *NIV* est bien conservée par son facteur perceptif correspondant.

Les longueurs des segments parallèles à un même axe peuvent être comparées. On voit ici que la distance AG est inférieure à BH qui est encore inférieure à CI. On retrouve qu'une variation de niveau est mieux perçue lorsque le temps de réverbération est élevé.

Pour les préférences, nous voyons un consensus assez net dans le plan 1-3 (figure 4.7 b). A part le sujet 6 tous les sujets préfèrent une qualité acoustique de clarté forte et de niveau faible. Une clarté très forte est exigée pour la compréhension de la parole. Un niveau plutôt faible (66 dB) préféré par les sujets est peut être dû au fait que les messages sont écoutés au casque. Ce niveau monoral de 66 dB sous-estime peut-être le niveau réel d'écoute au casque, comme nous l'avons vu au début de ce chapitre. De plus, nous avons réglé les niveaux des tests de façon à ce qu'ils ne soient pas gênants pour les sujets qui doivent les écouter pendant 40 minutes. Or les niveaux mesurés sont plus forts pour les tests passés en chambre sourde ($NIV > 70$ dB) que ceux des tests passés au casque ($NIV < 70$ dB). On pourrait alors penser que les niveaux sonores mesurés au casque sont effectivement sous-estimés par rapport à ceux mesurés dans la chambre sourde, mais une étude de comparaison présentée au paragraphe 8.1.1 semble conclure à l'équivalence des valeurs de mesures de niveaux entre les deux conditions expérimentales. Il faut donc rester prudent sur ce problème de comparaison des niveaux sonores.

Pour conclure sur ces deux premiers tests, il semble que le niveau traduise bien le facteur que nous avons nommé *faible - énergétique*. Pour ces tests, le critère *NIV* semble indépendant des deux autres critères *C 80* et *TR*. Cela n'est pas aussi simple pour les tests suivants.

4.4 Niveau - Clarté - Temps de réverbération découplés

4.4.1 Test NIV3

Afin de découpler les critères $C80$ et TR , deux tests ont été passés au casque, sur les configurations suivantes, mais sur des messages musicaux différents:

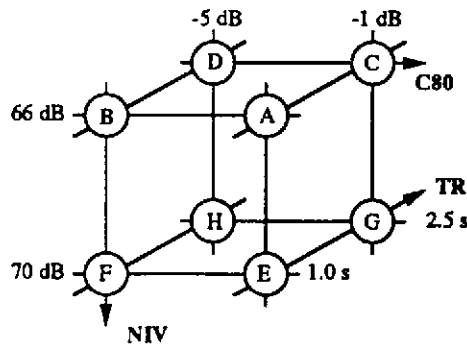


Figure 4.8
Caractéristiques objectives des configurations du test NIV3.

Le motif musical écouté lors du premier test appelé NIV3 BRYN, est un extrait de l'aria pour soprano de Mozart. Celui écouté pour le second NIV3 MATUZ est un extrait de la sonate pour flûte de Bach, interprété par Itzvan Matuz. Ces deux tests, construits à partir des mêmes configurations, devraient permettre de voir si l'espace perceptif est bien indépendant du type de musique écouté dans une salle. Nous allons présenter les deux tests en parallèle, en insistant sur l'analyse du niveau.

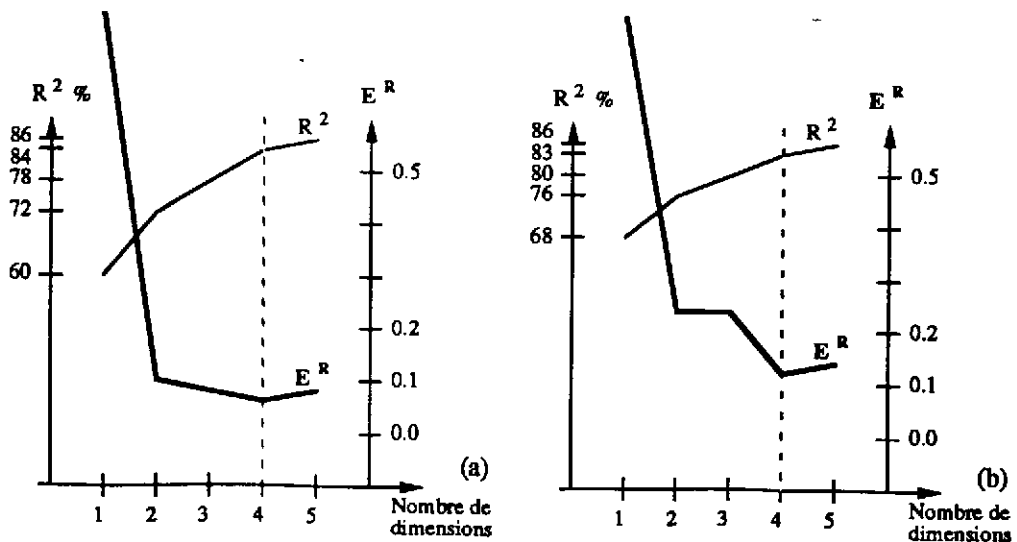


Figure 4.9
Optimisation du nombre de dimensions. a: pour le test NIV3 BRYN.
b: pour le test NIV3 MATUZ.

Il leur faut tous deux quatre dimensions pour être interprétés mais l'erreur est deux fois plus importante pour le test NIV3 BRYN que pour le test NIV3 MATUZ. Ceci peut s'expliquer par la différence de stabilité de niveau sonore. Bien que le niveau équivalent soit le même, la dynamique entre le *piano* et le *forte* de la chanteuse est bien supérieure à celle du flûtiste. Les différences de niveau ont donc été plus difficiles à estimer dans le premier cas. Dans les deux cas, l'axe 1 a un pourcentage de variance beaucoup plus important que les trois autres (65% 7% 7% 5% pour NIV3 BRYN et 42% 17% 15% 9% pour NIV3 MATUZ). Les distances entre les configurations FH, AC, BD et EG sont beaucoup plus importantes que les autres distances interconfigurations sur les autres axes. Nous ne sommes plus ici dans les conditions tangentielles de l'analyse (§ 3.3.2) et les angles sont difficilement interprétables. L'axe 1 gêne la finesse d'interprétation des autres facteurs tant il prédomine dans ce test.

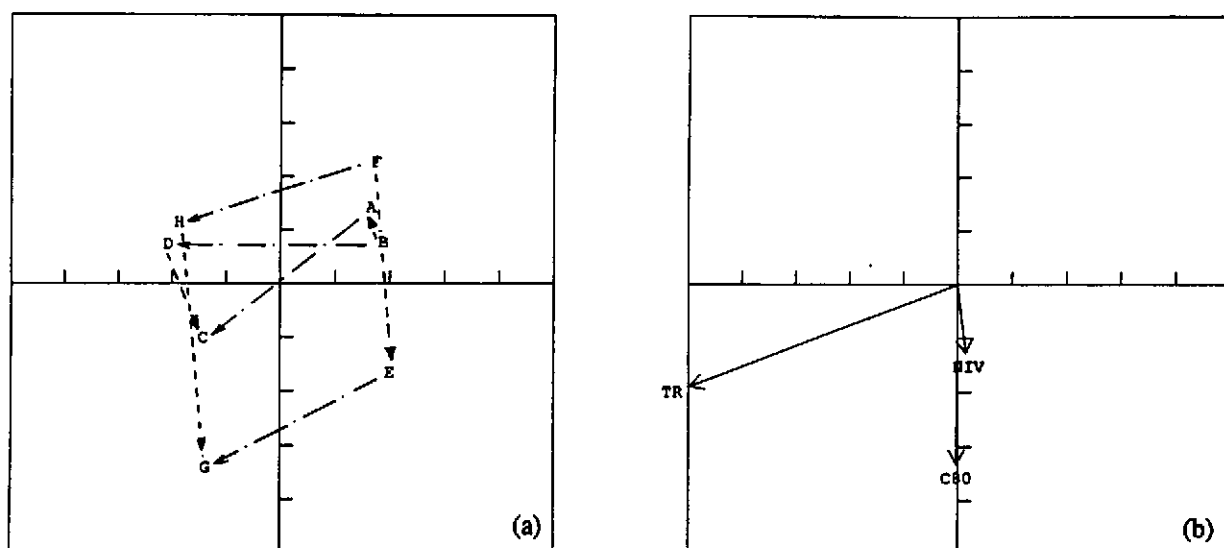


Figure 4.10
Plan 1-4 du test NIV3 BRYN. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

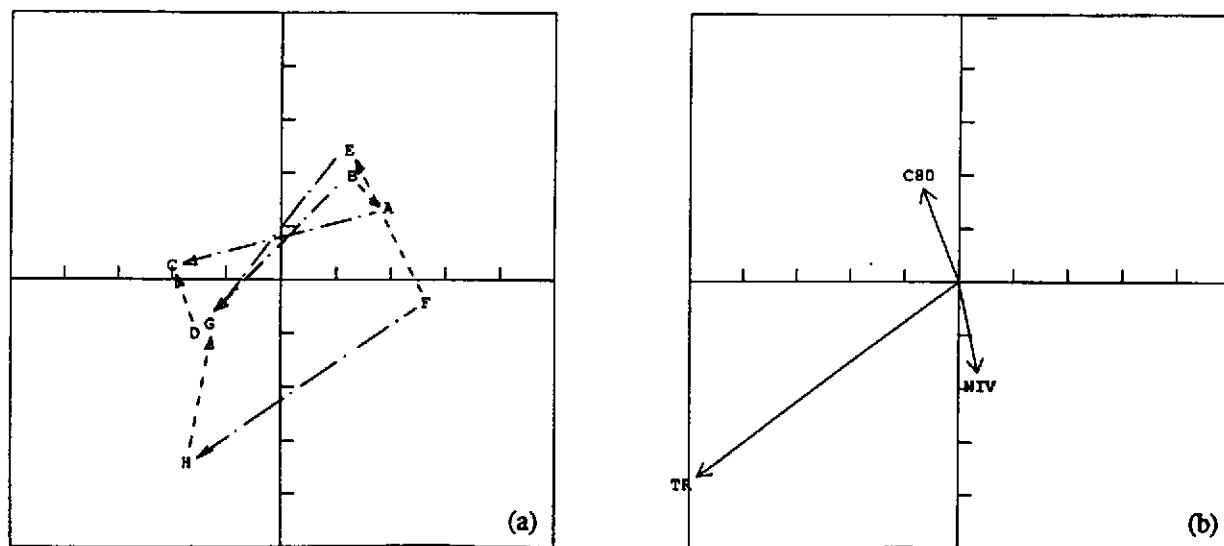


Figure 4.11
Plan 1-2 du test NIV3 MATUZ. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

— — — — — variation de temps de réverbération.
- - - - - variation de clarté.

L'axe 1 est corrélé à -98% avec le TR pour les deux tests, et si l'on suppose que l'autre axe correspond à la clarté $C 80$, celle-ci y est beaucoup moins bien corrélée (-66% et 35%). Le couple BA est mal perçu et est surtout inversé par rapport aux autres couples où la clarté $C 80$ varie. Ceux-ci sont représentés par les segments -----. Les variations de TR et de $C 80$ ne sont pas complètement parallèles aux axes ce qui pose le problème de la rotation ($S_{14} = 0.86$ pour NIV3 BRYN et $S_{12} = 0.83$ pour NIV3 MATUZ). Si l'on suppose alors que la rotation n'est pas permise, les variations des critères $C 80$ et TR ne sont pas perçues en tant que facteurs perceptifs mais plutôt comme des combinaisons de facteurs. Il y aurait donc une substitution de ces variations de critères sur les facteurs perceptifs. On remarque que toutefois, une augmentation de temps de réverbération est perçue paradoxalement avec une augmentation de clarté pour le test NIV3 BRYN tandis que c'est plus normalement l'inverse pour le test NIV3 MATUZ. Cela confirme bien que les angles de substitution ne sont pas ici directement interprétables. De plus, les deux axes ont des corrélations non négligeables ($S_{12}^* = 0.60$ pour NIV3 MATUZ et $S_{14}^* = 0.30$ pour NIV3 BRYN) alors que les critères $C 80$ et TR sont objectivement décorrélés. Ces deux facteurs ne conservent donc pas l'indépendance des critères correspondants.

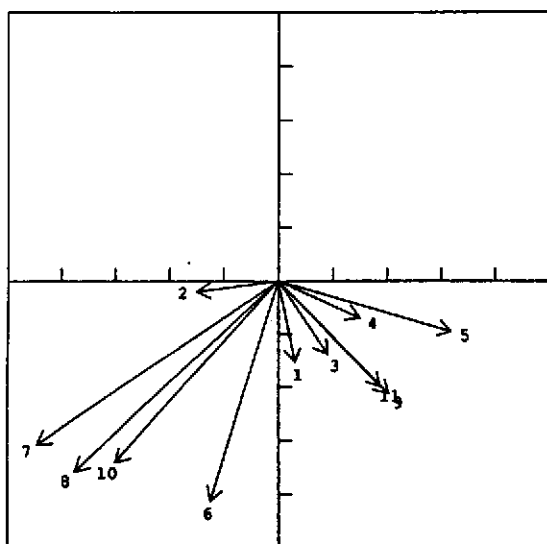


Figure 4.10
Plan 1-4 du test NIV3 BRYN. c: Plan préférences

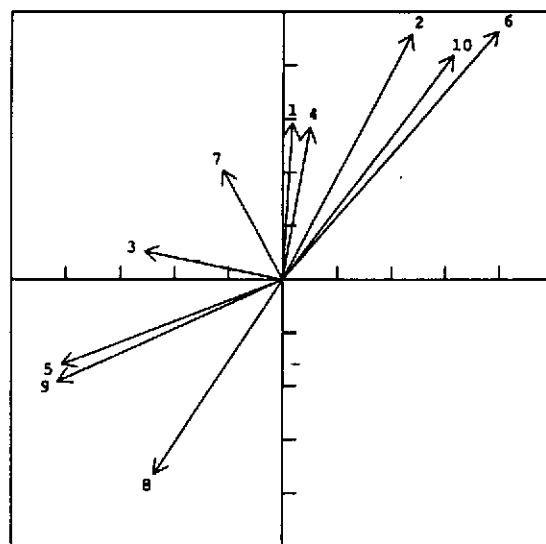


Figure 4.11
Plan 1-2 du test NIV3 MATUZ. c: Plan préférences

On peut aussi supposer que le second axe est introduit par un rejet des configurations F et H car toutes les préférences (figures 4.10 c et 4.11 c) s'éloignent de ces deux configurations de salles (Clartés très faibles $C 80 = -5$ dB et niveau fort pour le casque $NIV = 70$ dB). Il est difficile d'opter pour l'une ou l'autre des interprétations.

Les plans suivants expliquent les variations de niveau.

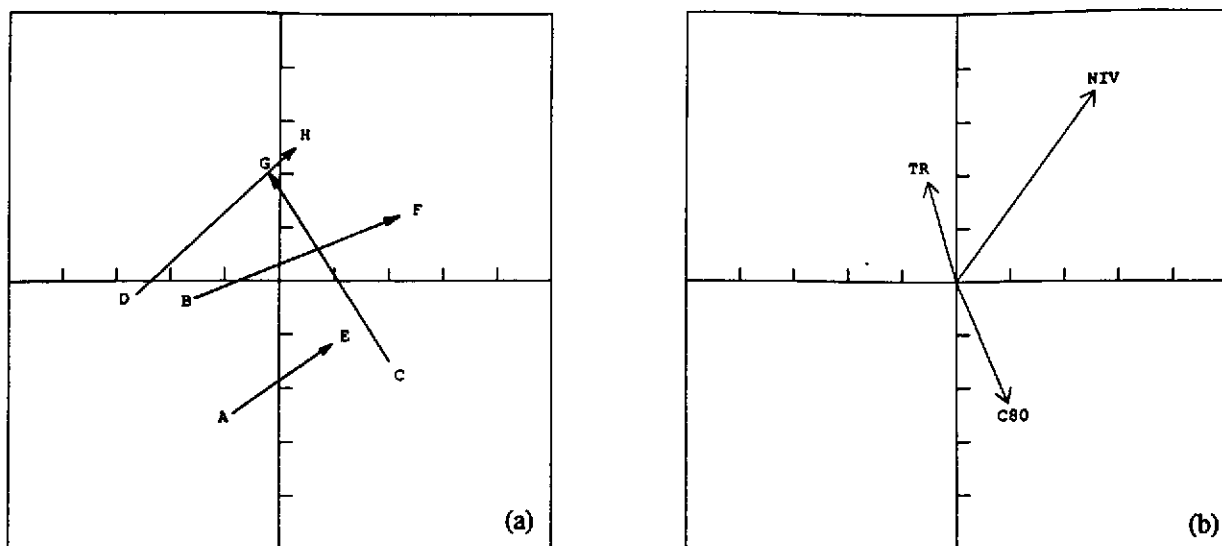


Figure 4.12
Plan 2-3 du test NIV3 BRYN. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

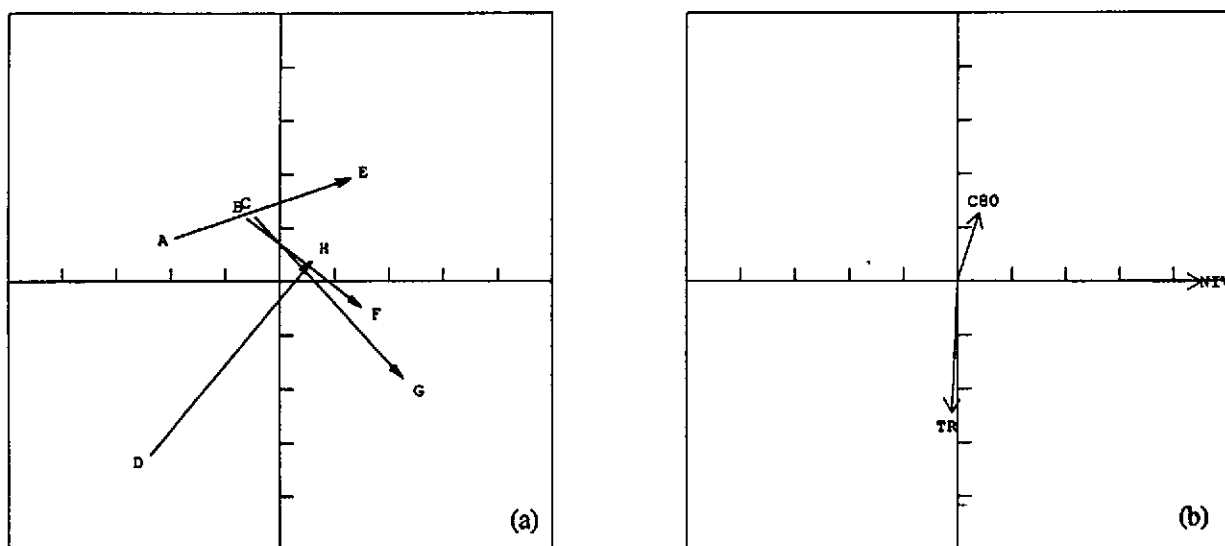


Figure 4.13
Plan 3-4 du test NIV3 MATUZ. a: Plan stimuli. b: Plan critères.
— variation de niveau.

Une rotation des axes est interdite ici car les corrélations S_{23} et S_{34} pour respectivement les tests NIV3 BRYN et NIV3 MATUZ valent 0.71 et 0.52. Bien que la corrélation du niveau sur l'axe 3 du test NIV3 MATUZ soit égale à 91% et 73% pour ce même axe dans le test NIV3 BRYN, les segments — représentant ces variations ne sont pas parallèles entre eux. Les plans présentent des points communs: Les segments DH sont perpendiculaires aux segments CG. Un autre test étudiant le niveau devrait préciser si la présence de deux axes est toujours utile pour représenter les variations du critère *NIV*.

4.4.2 Test NIV4

Pour équilibrer les variances des axes proposés par l'analyse précédente, deux nouveaux tests NIV4 BRYN et NIV4 MATUZ ont été préparés, où les trois critères *NIV*, *C 80* et *TR* varient de la façon suivante:

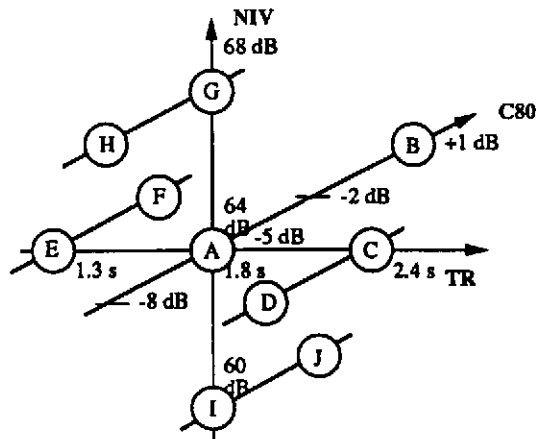


Figure 4.14
Caractéristiques objectives des configurations du test NIV4

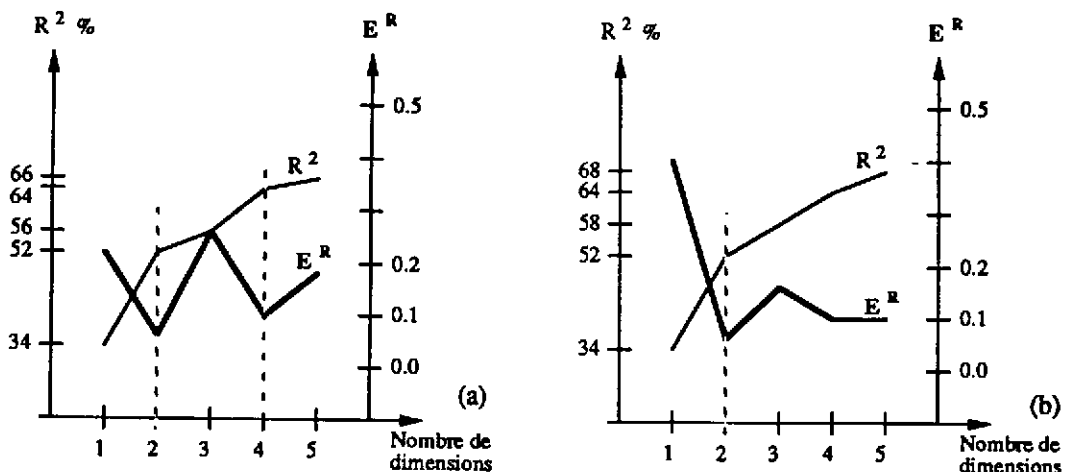


Figure 4.15
Optimisation du nombre de dimensions. a: Pour le test NIV4 BRYN. b: Pour le test NIV4 MATUZ.

Le nombre optimal de dimensions semblant être limité à 2, nous allons d'abord analyser les tests en deux dimensions.

4.4.2.1 Analyses en deux dimensions

Les positions des sujets dans les plans 1-2 (figures 4.16 a et 4.17 a) ne sont ni très concentrées, ni très dispersées ($S_{12} = 0.90$). Les axes sont-ils fiables? Les pourcentages de variance étant à peu près équivalents surtout pour le test NIV4 BRYN (27% et 24% pour NIV4 BRYN, 33% et 19% pour NIV4 MATUZ), les angles sont interprétables directement. Les variations de niveau sont perpendiculaires aux autres variations de critères. Par contre, les variations de temps de réverbération — · — et de clarté - - - - sont complètement confondues. On peut conclure ici que les deux facteurs utiles sont combinaisons linéaires de deux facteurs, l'un lié aux variations de niveau *NIV*, l'autre lié aux variations du complexe *TR* et *C 80*.

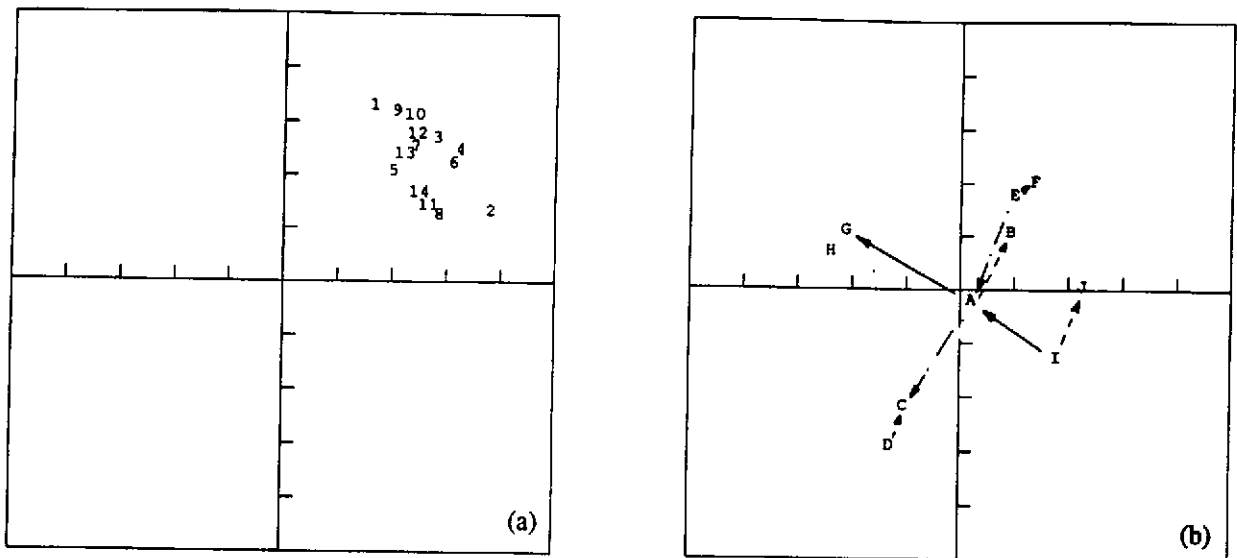


Figure 4.16

Plan 1-2 du test NIV4 BRYN. a: Plan sujets. b: Plan stimuli.

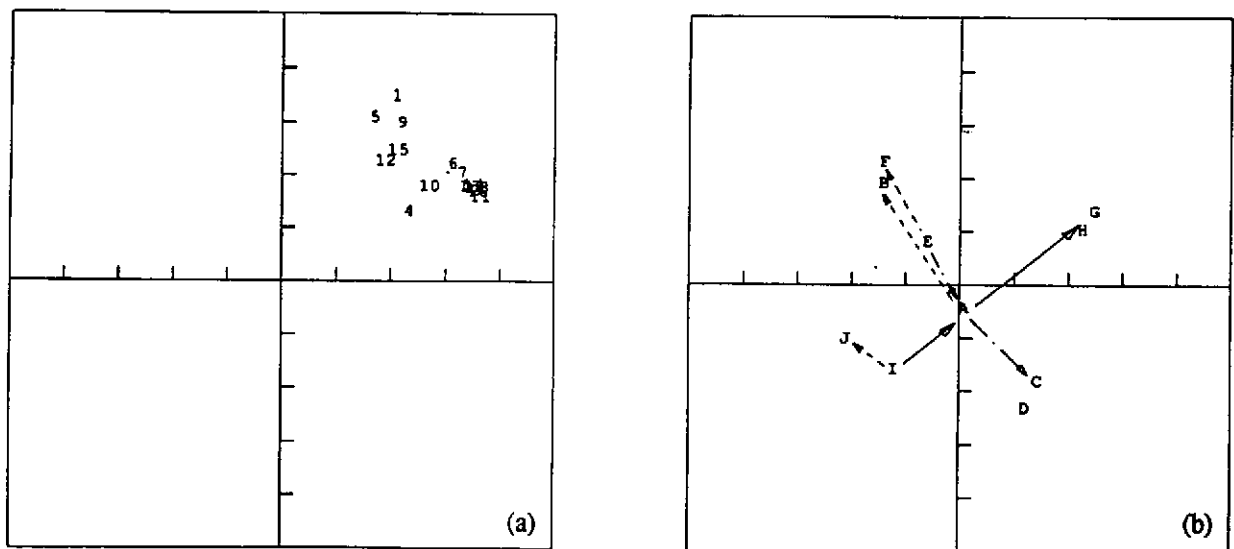


Figure 4.17

Plan 1-2 du test NIV4 MATUZ. a: Plans sujets. b: Plan stimuli.

— · — variation de temps de réverbération.

- - - - variation de clarté.

———— variation de niveau.

Que ce soit pour les tests NIV3 ou NIV4, les différences de messages sonores n'ont pas modifié les espaces perceptifs. L'hypothèse qu'une caractérisation objective pourrait être indépendante du message sonore écouté semble ici confirmée.

4.4.2.2 Analyse de NIV4 BRYN en quatre dimensions

La courbe des erreurs relatives globales en fonction du nombre de dimensions présente pour le test NIV4 BRYN un minimum local pour 4 dimensions (figure 4.15 a). L'analyse poussée à 4 dimensions permet d'expliquer 64% de la variance totale au lieu de 52% seulement pour 2 dimensions. Les pourcentages affectés aux axes sont respectivement 25%, 16%, 12% et 11%.

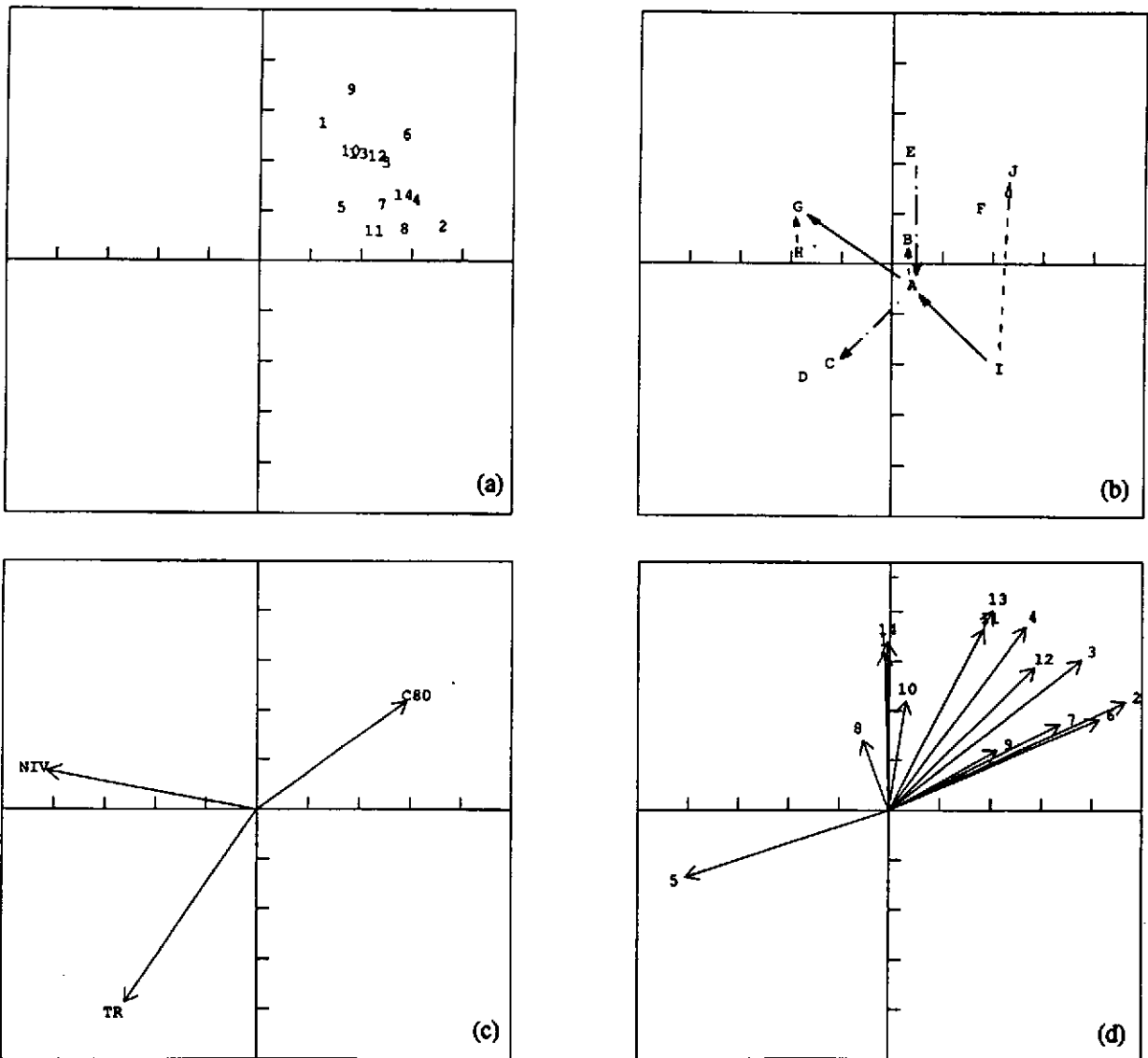


Figure 4.18

Plan 1-2 du test NIV4 BRYN analysé en 4 dimensions. a: Plan sujets. b: Plan stimuli. c: Plan critères. d: Plan préférences.

Ce plan 1-2 permet de faire quelques remarques:

- Les sujets sont ici plus dispersés dans l'espace ($S_{12} = 0.79$) (figure 4.18 a). Toutes les corrélations sont d'ailleurs inférieures à 0.90. Les axes proposés sont donc plus fiables.

- On retrouve ici la confusion entre les variations de temps de réverbération et de clarté qui sont parallèles à l'axe 2.

- Le temps de réverbération est corrélé à 77% avec ce facteur commun.

- On trouve ici un consensus vers les plus fortes clartés ou les temps de réverbération assez faibles, mis à part le sujet 5 qui est en dehors du groupe.

- L'axe 1 est bien corrélé au niveau (80%) mais la corrélation est encore meilleure dans le plan 1-3 ($Cor_{NIV}^2_1 + Cor_{NIV}^2_3 = 0.99$). Il faut encore deux axes pour traduire perceptivement les variations du critère *NIV* (figure 4.19).

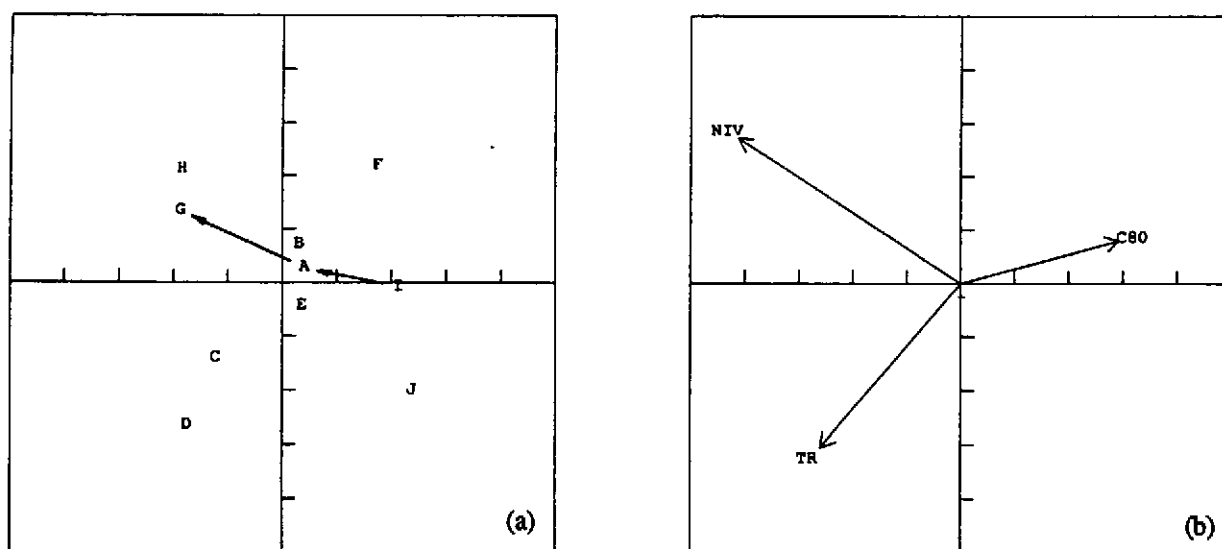


Figure 4.19

Plan 1-3 du test NIV4 BRYN analysé en 4 dimensions. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

— variation de niveau.

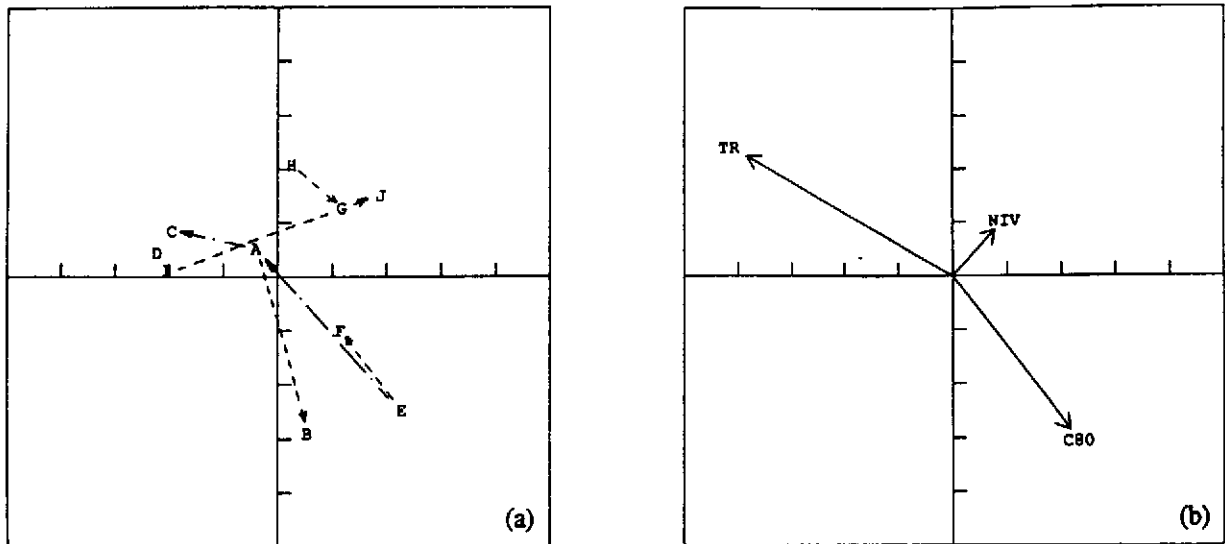


Figure 4.20

Plan 2-4 du test NIV4 BRYN analysé en 4 dimensions. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

— · — variation de temps de réverbération.
 - - - - - variation de clarté.

Ce plan 2-4 (figure 4.20) correspond au plan de perception des variations de critères *TR* et *C 80*. La corrélation objective de ces deux critères est de 36%. La corrélation S_{24}^* (-0.26) n'est donc pas significative de la dépendance des deux facteurs correspondants. Bien que les variations de ces deux critères soient assez confondues perceptivement, deux facteurs semblent tout de même être nécessaires pour en expliquer la perception. On remarque toutefois que le couple *AB* pour lequel la clarté devient positive, est celui qui s'oriente le plus sur l'axe 4.

Mais revenons à l'existence des deux axes de niveau. L'étude de la nomination de ces axes a permis de clarifier un peu ce problème.

4.5 Nomination des axes de niveau

Nous avons écouté suivant une procédure décrite au paragraphe 2.5, un grand nombre de configurations ayant des temps de réverbération variant de 0.5 à 2.5 secondes et des clartés variant de -9 dB à +9 dB. Les configurations ont été écoutées aux différents niveaux réglés pour les tests.

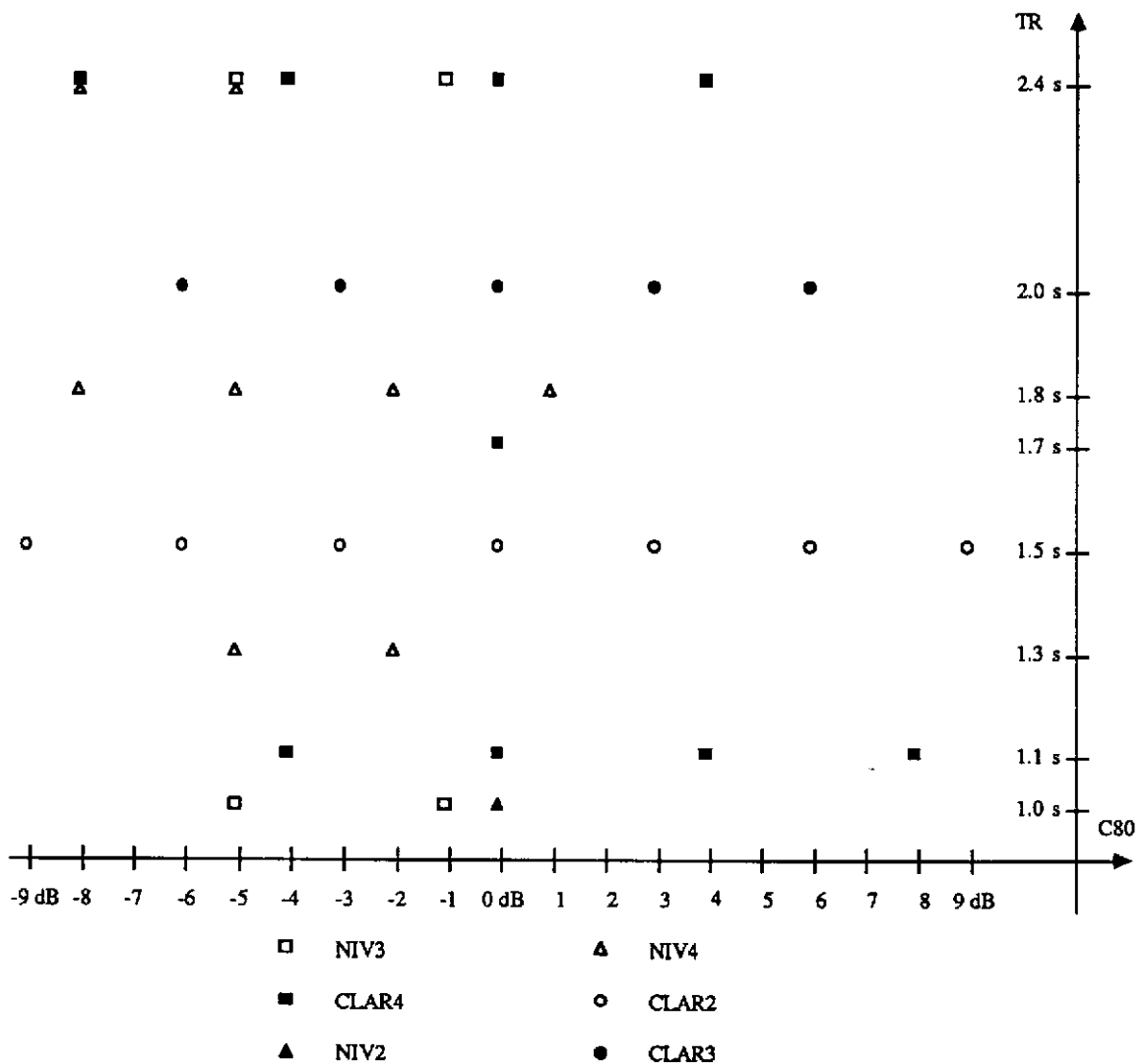


Figure 4.21

Configurations écoutées par des sujets expérimentés afin de nommer les facteurs perceptifs qui se retrouvent d'une analyse à l'autre.

Les quelques personnes ayant participé à cette écoute avaient une oreille exercée à ce genre d'analyse. Les termes descriptifs avancés ne sont que des propositions de description des facteurs qui se retrouvent d'une analyse à l'autre.

Lorsque le niveau varie de 60 dB à 74 dB pour une configuration où tous les autres critères sont constants, deux impressions successives sont perçues. Tant que le niveau reste faible, l'impression de l'auditeur est d'être absent de la salle. Progressivement, cette impression diminue jusqu'à ce que l'auditeur ait réellement l'impression d'être présent dans la salle. Passé ce seuil, l'impression de force sonore domine. Nous retrouvons bien deux facteurs différents de perception de niveau, le premier sélectionne les salles suivant l'impression de présence (*absent - présent*), le second suivant l'impression de force sonore (*faible - énergique*). Lorsque le niveau devient excessif, il est caractérisé soit par le terme *fort saturé* lorsque la clarté est élevée, soit par le terme *fort brouillé* lorsque la clarté est faible.

La valeur du seuil de présence dépend des valeurs du temps de réverbération et de la clarté. Ce seuil est d'autant plus faible que la clarté est forte ou le temps de réverbération faible. Si la clarté dans une salle est très faible (-8 dB) avec un grand temps de réverbération (2.5 s), l'auditeur aura toujours l'impression d'être absent alors que, si les conditions sont inversées, l'auditeur aura bien l'impression d'être présent dans la salle, même si le niveau est faible. Il faut remarquer que cette écoute a été effectuée au casque et que l'effet observé serait peut être différent si elle avait été réalisée dans la chambre sourde. En effet, il est difficile de se sentir acoustiquement absent d'une salle alors qu'on y est présent physiquement! Ceci pose le problème du couplage entre la perception acoustique et la perception visuelle. Revenons alors à l'interprétation des facteurs de niveau des tests précédents.

4.5.1 Test NIV3

L'axe 3 nous l'avons vu, est correctement corrélé au niveau. Il peut correspondre au facteur *faible - énergique* (figures 4.12 et 4.13). L'autre facteur, pouvant être celui que nous avons appelé *absent - présent*, différencie surtout les configurations A, B, C et D de niveau faible (66 dB). La configuration D de *TR* élevé (2.5 s) et de *C* 80 faible (-5 dB) est à une extrémité de ce facteur. A l'autre extrémité devrait se trouver la configuration A. Or la configuration C est toujours la plus éloignée de D. En étudiant plus à fond les valeurs énergétiques des critères sélectionnés, il s'avère que le niveau de l'onde directe joue un rôle sur ce facteur. En effet, les valeurs extrêmes de ce critère parmi les quatre configurations étudiées ici, sont de 52 dB pour la configuration D et de 58 dB pour C, A ayant une onde directe de 56.5 dB. Il est possible que l'impression de présence dans une salle nécessite un niveau d'onde directe minimum que la configuration C aurait dépassé.

L'orthogonalité des segments DH et CG s'explique par le fait que la variation de niveau visualisée par DH est ressentie comme une entrée dans la salle tandis que cette même variation visualisée par CG est ressentie comme une augmentation de force sonore.

4.5.2 Test NIV4

Revenons au plan 1-3 de ce test (figure 4.19).

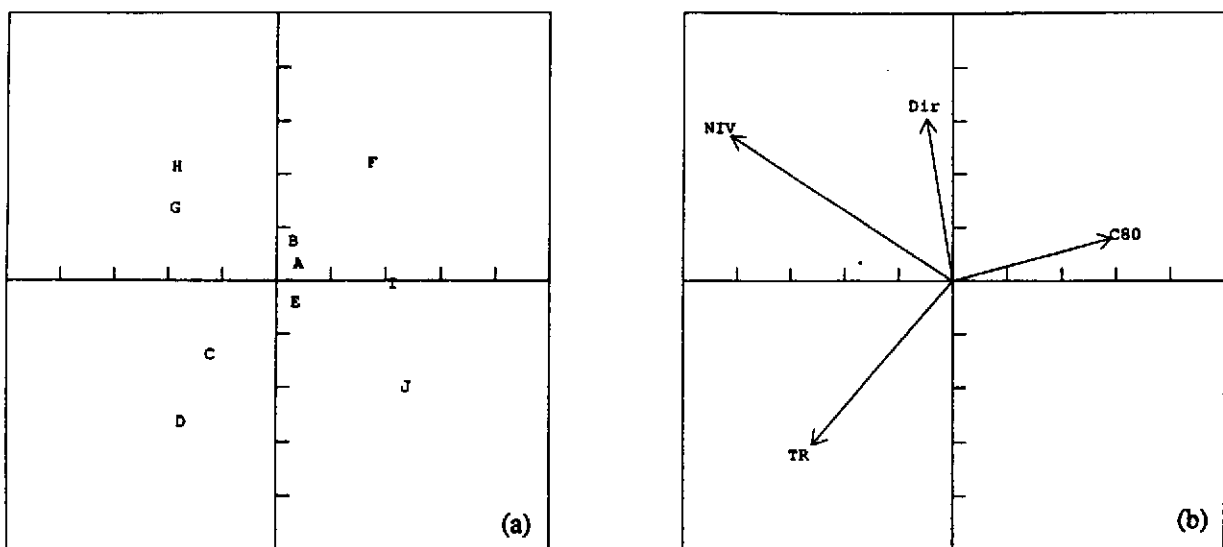


Figure 4.19

Plan 1-3 du test NIV4 BRYN analysé en 4 dimensions. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

L'axe 1 correspond plutôt au facteur appelé *faible - énergique*. Les configurations J, C et D sont à une extrémité de l'axe 3. J est à niveau faible, C et D sont tous deux à clarté faible et temps de réverbération fort. On retrouve les conditions d'impression d'absence de la salle. Les configurations G, H et F soit de niveau fort, soit de temps de réverbération faible, sont à l'autre extrémité de cet axe. Cet axe peut donc être rapproché du facteur perceptif appelé *absent - présent*. C'est le critère de niveau de l'onde directe *Dir* qui est le mieux corrélé à ce facteur ($Cor_{Dir3} = 0.62$). Les configurations B, F et G ont une onde directe supérieure à 53 dB et les configurations D, I et J ont une onde directe inférieure à 49 dB.

4.6 Conclusion concernant le niveau

Le critère niveau global *NIV* traduit objectivement la perception de la force sonore dans une salle, pour des valeurs suffisantes de celle-ci. Le facteur perceptif correspondant peut être caractérisé par les termes descriptifs *faible - énergique*. Il est généralement indépendant des autres facteurs rencontrés jusqu'ici.

Lorsque ce niveau est faible, la salle elle-même est ressentie comme étant très distante. Pour qu'un auditeur ait l'impression d'être effectivement présent dans une salle, il semble que le niveau de l'onde directe doive dépasser un certain seuil. Ce seuil pourrait être estimé à 53 dB d'après les tests étudiés pour des configurations simulées par le réverbérateur YAMAHA et écoutées au casque. Le facteur correspondant est appelé *absent - présent*. Il semble d'après les tests précédents que l'effet de seuil du critère *Dir* soit caractéristique de ce facteur.

5. ETUDE QUALITATIVE DES CRITERES C80 ET TR

5.1 Enoncé du problème dû au critère C80

La clarté $C80$, comme nous l'avons vu, semble beaucoup plus indépendante du niveau NIV que du temps de réverbération TR . Une série de tests a été menée pour étudier plus à fond les substitutions entre le critère $C80$ et les deux autres critères déjà cités. Ces tests ont été passés au casque sur un extrait d'une sonate pour flûte de Bach.

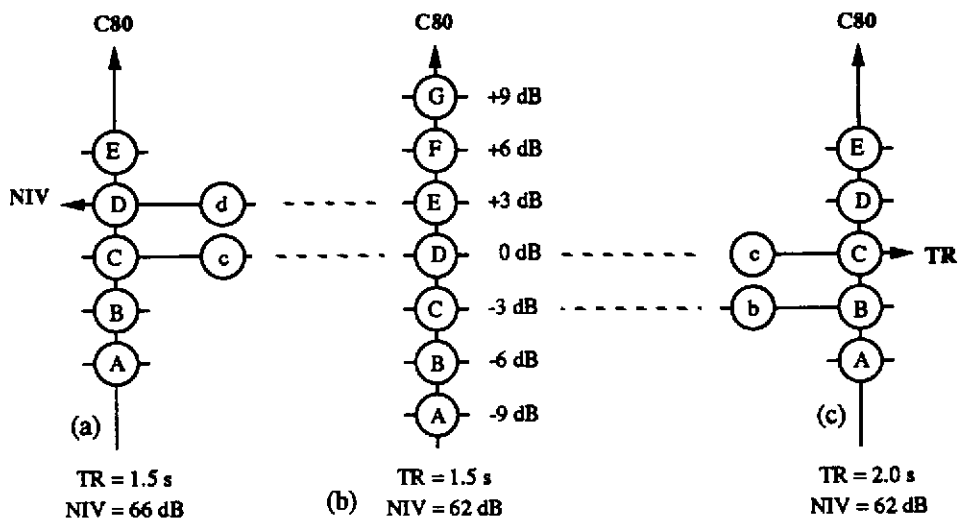


Figure 5.1

Caractéristiques objectives de configurations pour lesquelles la clarté principalement varie. a: Configurations du test CLAR1. b: Configurations du test CLAR2. c: Configurations du test CLAR3.

Il est important ici de préciser que toute la chaîne des configurations où seule la clarté varie a le même niveau sonore. Les variations de clarté de -9 dB à -6 dB et encore de -6 dB à -3 dB sont obtenues en faisant varier principalement le niveau des 80 premières millisecondes. En effet une variation du niveau de la réverbération aurait eu un effet sur le niveau sonore global, la réverbération étant prédominante dans cette zone. Parallèlement, les variations de clarté pour des valeurs de +3 dB à +6 dB et surtout de +6 dB à +9 dB sont obtenues par variation du niveau de la réverbération.

5.1.1 Clarté - niveau: CLAR1

Ce premier test se voulait être un test de confirmation de l'indépendance des deux critères. Les configurations c et d du test CLAR1 sont semblables aux configurations D et E du test CLAR2.

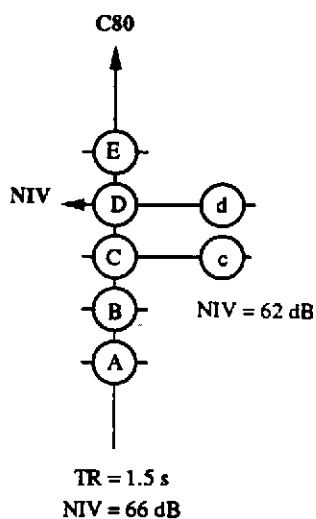


Figure 5.1
a: Configurations du test CLAR1.

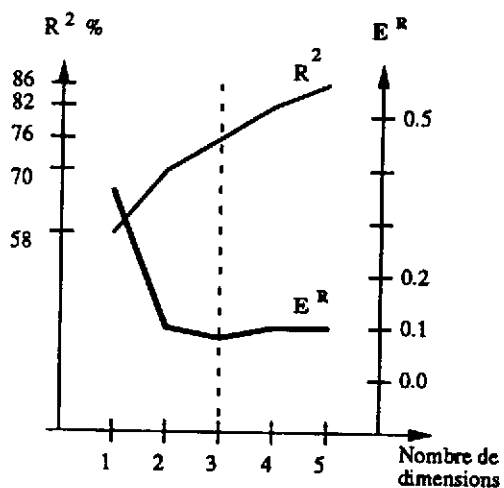


Figure 5.2
Optimisation du nombre de dimensions pour le test CLAR1.

Trois dimensions expliquent 76% de la variance totale du test. La première dimension en explique à elle seule 54%, les deux autres 11% chacune. Dans ce test, les sujets sont si dispersés dans l'espace solution que les facteurs perceptifs seront confondus avec les axes du repère.

Dans le plan stimuli 1-2 (figure 5.3 b), les configurations B, C et D où seule la clarté varie, sont alignées sur l'axe 1 (C_{80} varie de -3 dB à +3 dB). Le critère de clarté est corrélé à -87% avec ce facteur. Les configurations A de clarté très faible et c de niveau faible et clarté moyenne sont à l'extrémité du facteur 2. Celui-ci est corrélé à 90% avec le critère *Dir* (figure 5.3 c). Ici les configurations A et c ont une onde directe inférieure à 53 dB tandis que toutes les autres ont une onde directe supérieure à 55.5 dB. Ce facteur peut correspondre au facteur que nous avons déjà rencontré et que nous avons appelé *absent - présent*.

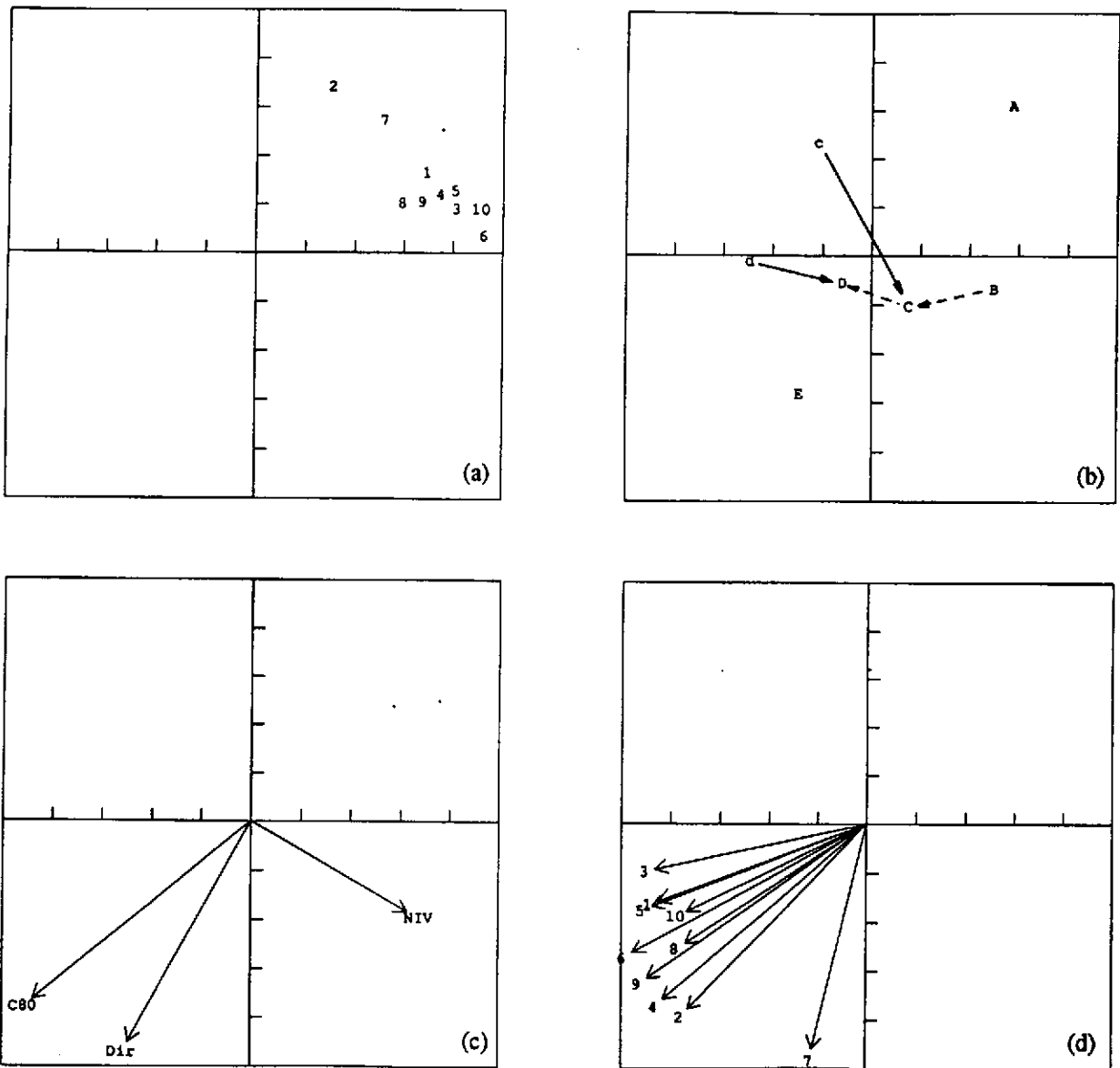


Figure 5.3

Plan 1-2 du test CLAR1. a: Plan sujets. b: Plan stimuli. c: Plan critères. d: Plan préférences.

— variation de niveau.

- - - - variation de clarté.

Dans le plan 2-3 (figure 5.4), on remarque que les segments AB et DE sont orthogonaux, les pourcentages de variance étant égaux pour les axes 2 et 3. Aucune rotation n'est permise ici ($S_{23} = 0.71$). On remarque aussi que le critère *Dir* est le critère le mieux corrélé à l'axe 3 ($Cor_{Dir\ 3} = 0.52$).

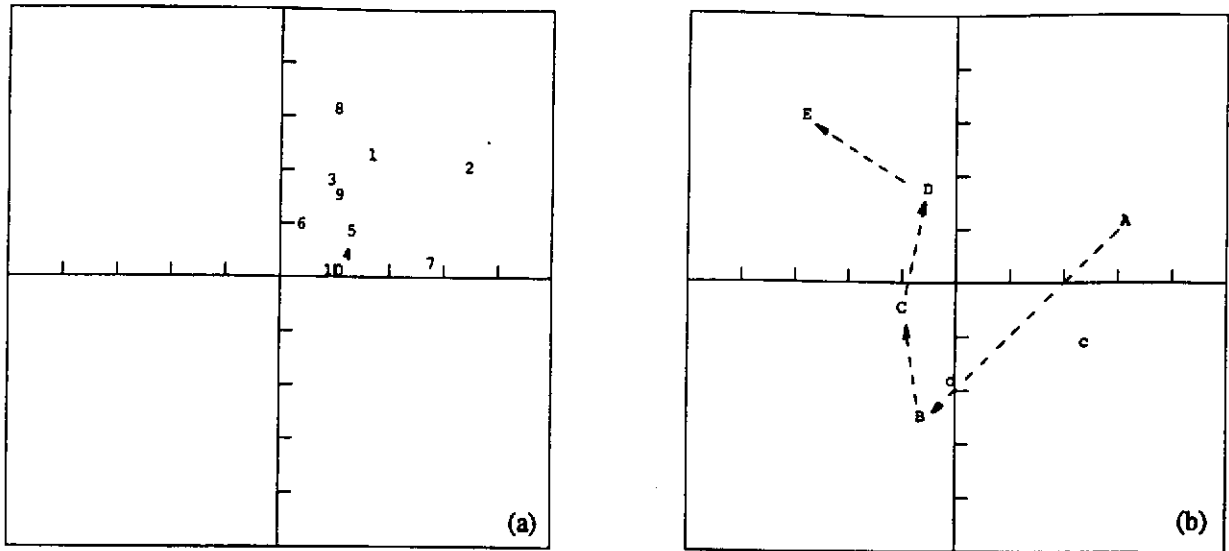


Figure 5.4
Plan 2-3 du test CLAR1. a: Plan sujets. b: Plan stimuli.

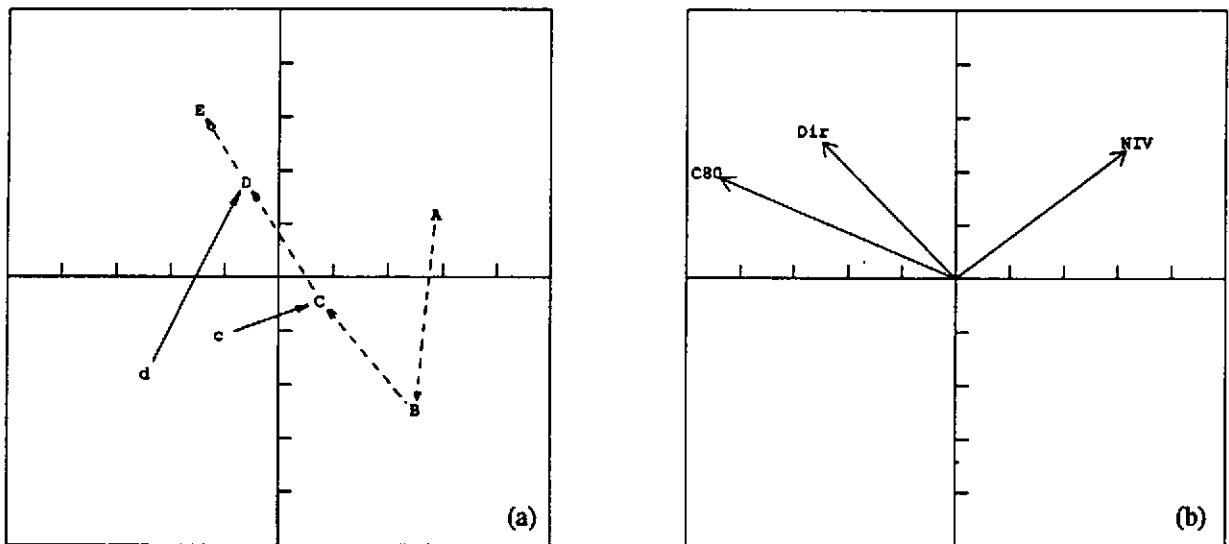


Figure 5.5
Plan 1-3 du test CLAR1. a: Plan stimuli. b: Plan critères.
----- variation de clarté.
—— variation de niveau.

On voit sur le plan 1-3 (figure 5.5) que les variations de clarté *C 80* sont perçues à la fois sur ces deux facteurs à partir d'une clarté de -3 dB. Le critère *NIV* n'est pas corrélé à un axe en particulier mais il semble localement s'orienter perpendiculairement à la courbe décrite par les variations de clarté.

Il est intéressant de comparer ce test à son équivalent qui étudie la clarté *C 80* et le critère *TR*.

5.1.2 Clarté - temps de réverbération: CLAR3

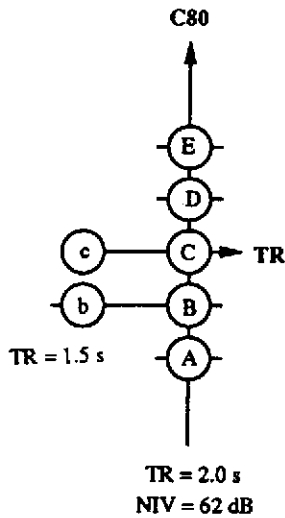


Figure 5.1
c: Configurations du test CLAR3.

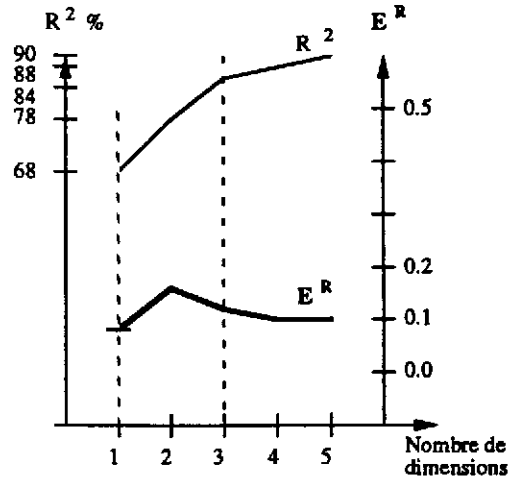


Figure 5.6
Optimisation du nombre de dimensions pour le test CLAR3.

D'après le jackknife, il faudrait interpréter ce test en une seule dimension, pouvant supposer déjà qu'une seule dimension serait un facteur perceptif commun aux variations de TR et de $C80$, vue la substitution observée dans les tests précédents. Par contre on peut aller à trois dimensions d'après la courbe des variances. Nous avons donc choisi de l'analyser en 3 dimensions, Les pourcentages de variance sont alors de 49%, 20% et 15%.

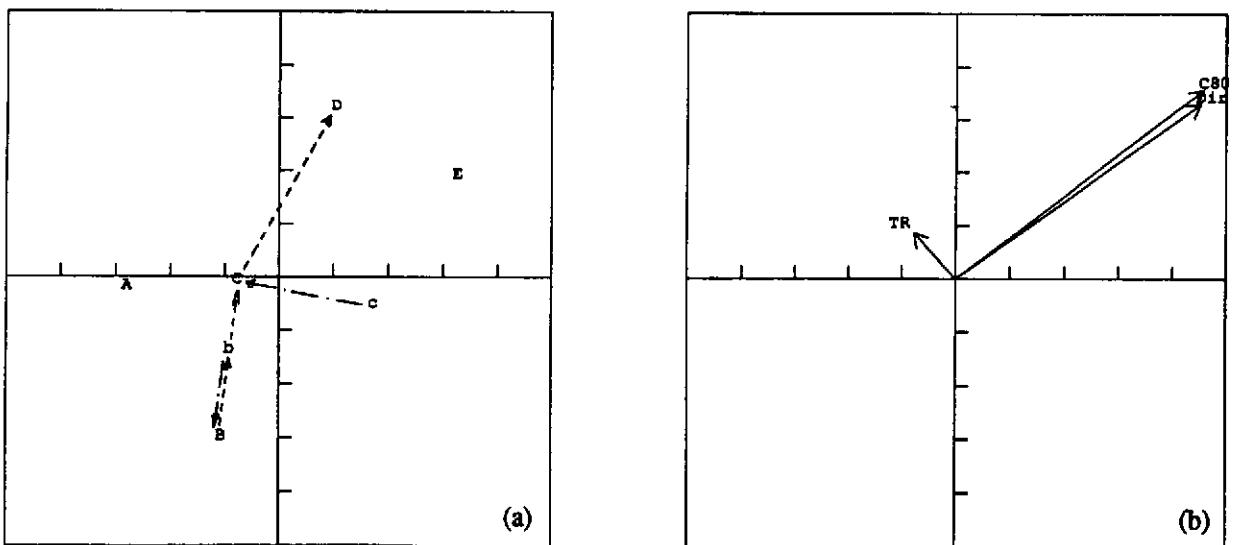


Figure 5.7
Plan 1-2 du test CLAR3. a: Plan stimuli. b: Plan critères

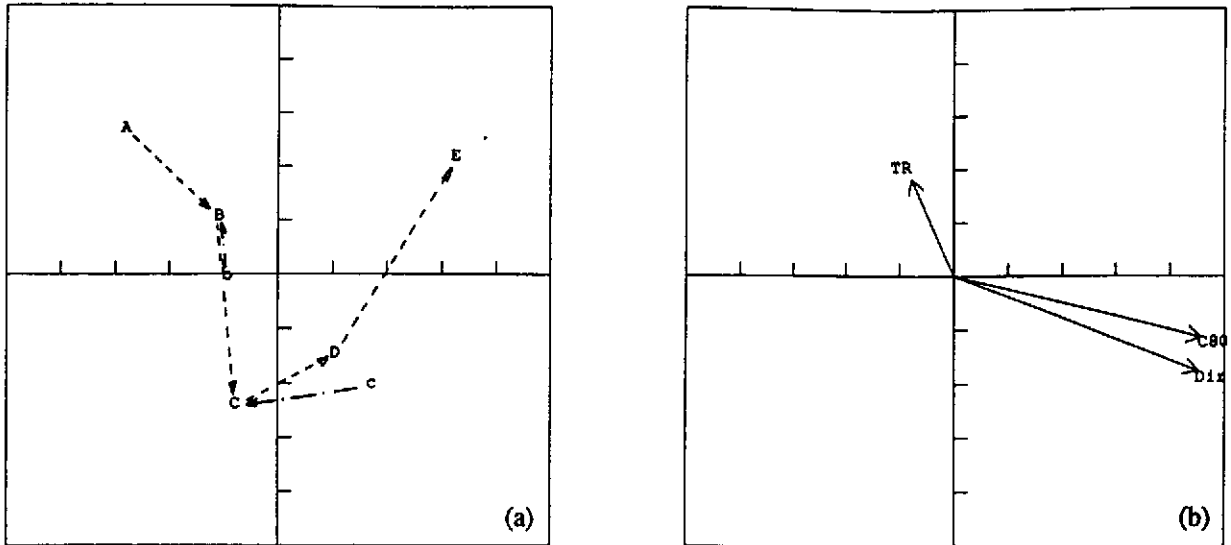


Figure 5.8

Plan 1-3 du test CLAR3. a: Plan stimuli. b: Plan critères

----- variation de clarté.

— — — variation de temps de réverbération.

Nous retrouvons les plans stimuli 1-2 et 2-3 du test CLAR1. Le critère *TR* est très mal projeté dans cet espace perceptif, ses variations étant difficiles à orienter. Il semble quand même que les variations de ce critère s'orthogonalisent lorsque la clarté augmente (le segment *bB* est complètement confondu avec les variations de clarté tandis que *cC* leur est perpendiculaire). Nous remarquons aussi que la clarté est bien projetée dans le plan 1-2 et que la variation de clarté dans une zone moyenne (-3 dB à +3 dB), visualisée par les segments *BC* et *CD*, est ressentie sur l'axe 2.

La complexité de ces deux tests est peut être due à la présence, dans les matrices de dissimilarités données par les auditeurs, de très grandes distances qui ne permettraient pas d'analyser ces tests dans les meilleures conditions, c'est à dire où les plans proposés pourraient être assimilés aux plans tangents à la surface perceptive réelle (§ 3.3.3). De plus, la longue chaîne formée par les configurations A à E semble diriger les tests, ce qui expliquerait la similitude des tests CLAR1 et CLAR3.

5.2 Suppression des grandes dissimilarités

Afin de supprimer les grandes dissimilarités, nous avons réétudié les mêmes tests en supprimant les configurations extrêmes A et E rendant ainsi une certaine rigidité à leur construction objective.

5.2.1 Clarté et niveau: CLAR1

D'après l'évolution de la variance R^2 en fonction du nombre de dimensions de l'espace solution ainsi que celle des mesures de stabilité, ce test simplifié nécessite encore trois dimensions, de pourcentages de variance respectifs 38%, 24% et 18%.

Figure 5.9
Optimisation du nombre de dimensions pour le test CLAR1 dont les configurations extrêmes ont été supprimées.

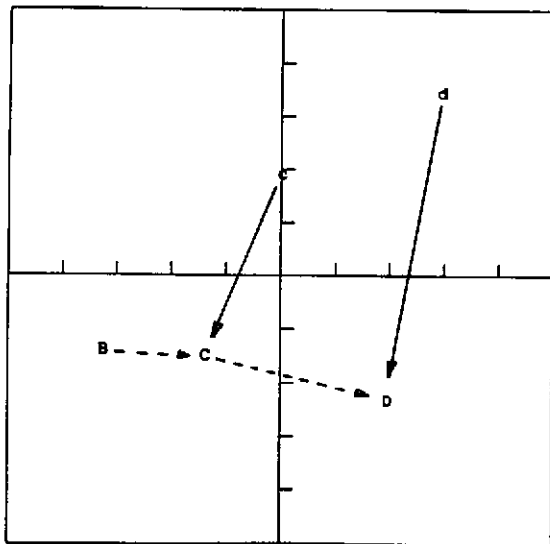
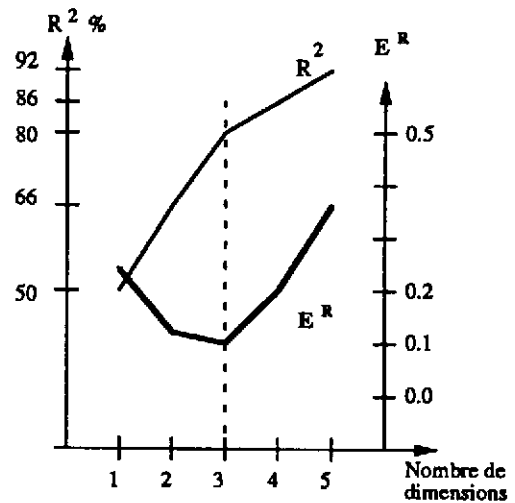


Figure 5.10
Plan 1-2 stimuli du test CLAR1 simplifié.

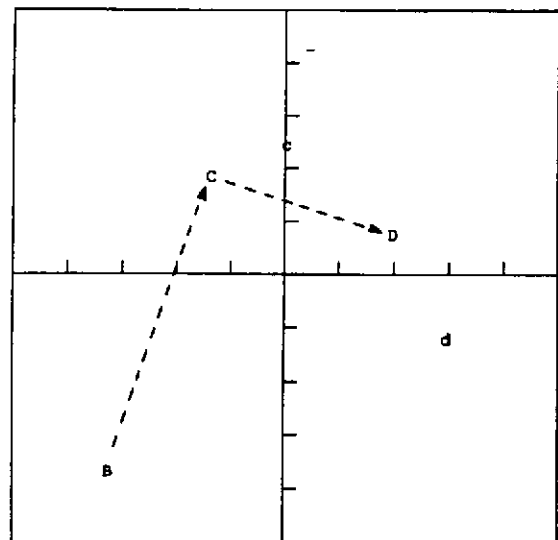
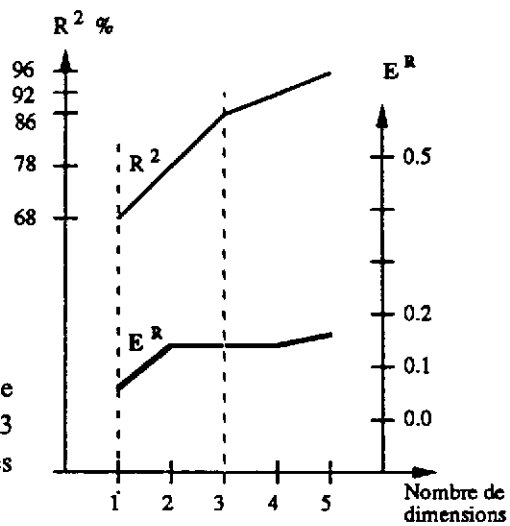


Figure 5.11
Plan 1-3 stimuli du test CLAR1 simplifié.

L'espace solution est simple à analyser. Le deuxième axe est corrélé à 96% avec le critère niveau (figure 5.10). Le plan stimuli 1-3 (figure 5.11) montre encore une cassure dans la perception des variations de clarté. On peut ici définitivement conclure à l'indépendance des facteurs liés aux variations de clarté C_{80} moyennes et de niveau NIV .

5.2.2 Clarté et temps de réverbération: CLAR3

Figure 5.12
Optimisation du nombre de dimensions pour le test CLAR3 dont les configurations extrêmes ont été supprimées.



La suppression des configurations extrêmes ne change rien à la détermination du nombre de dimensions. L'évolution de R^2 préconise une étude en trois dimensions tandis qu'une seule dimension suffit pour optimiser la stabilité. Si comme précédemment nous étudions le test en trois dimensions (52%, 22% et 12%), les plans sont les suivants:

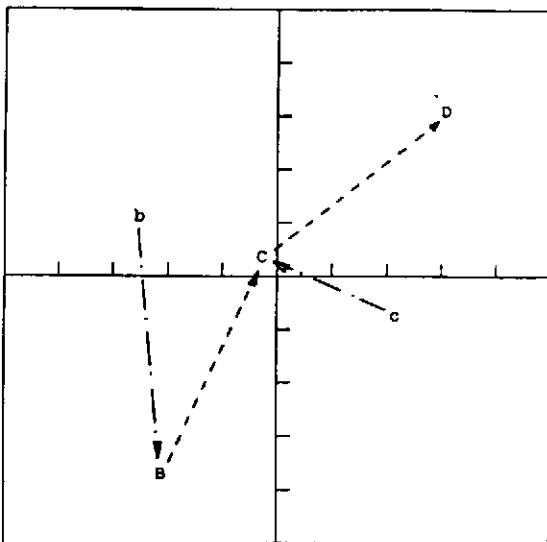


Figure 5.13
Plan 1-2 stimuli du test CLAR3 simplifié.

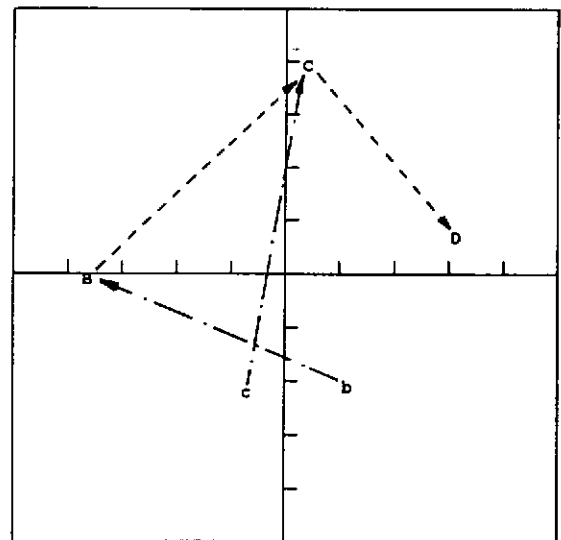


Figure 5.14
Plan 2-3 stimuli du test CLAR3 simplifié.

Les variations de temps de réverbération sont représentées par deux segments Cc et Bb pratiquement perpendiculaires dans le plan stimuli 2-3. On retrouve encore la cassure dans la perception d'une variation de clarté C 80. Tout ceci amène à supposer l'existence d'une courbure dans notre espace perceptif lié aux critères C 80 et TR. Si celle-ci est importante, les plans proposés sont éloignés des plans tangents et les angles de substitution sont difficiles alors à caractériser.

5.2.3 Clarté et temps de réverbération: CLAR4

Pour aller plus loin dans l'étude de la perception des variations de critères C 80 et TR, le test suivant a été construit de façon à lui donner une structure plus adéquate à ce type d'analyse que celle des tests CLAR1, CLAR2 ou CLAR3.

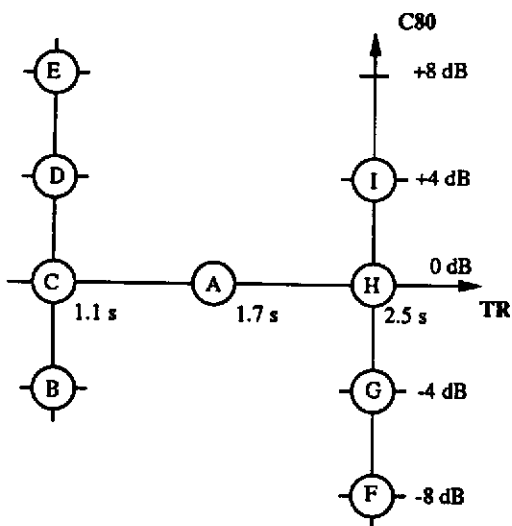


Figure 5.15
Caractéristiques objectives des configurations du test CLAR4.
NIV = 70 dB

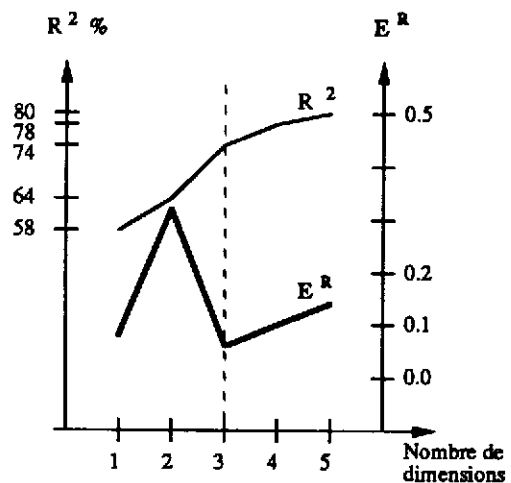


Figure 5.16
Optimisation du nombre de dimensions pour le test CLAR4.

Trois dimensions alors sont nécessaires pour expliquer 74% de la variance totale du test (33%, 26% et 15%). Tous les S_{pr} sont inférieurs à 0.90 ce qui semble fixer les facteurs perceptifs sur les axes proposés par l'analyse.

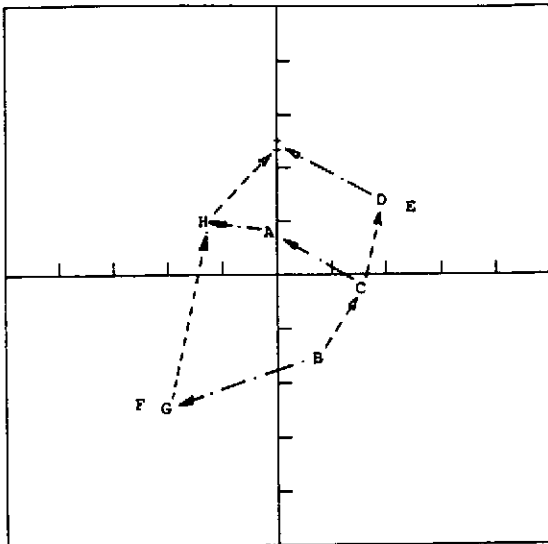


Figure 5.17
Plan 1-2 stimuli du test CLAR4.
- - - - variation de clarté.

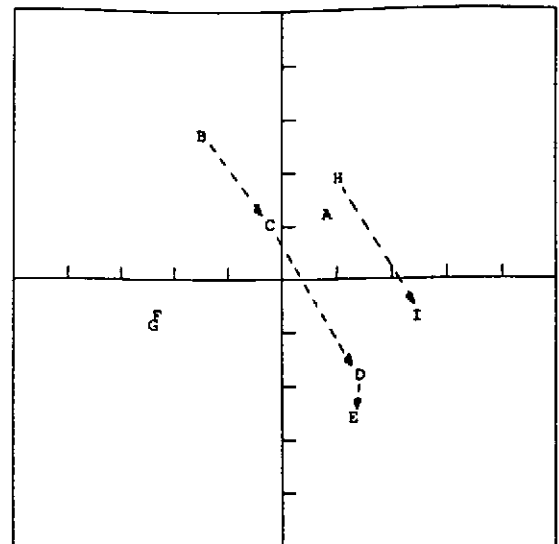


Figure 5.18
Plan 2-3 stimuli du test CLAR4.
— — — variation de temps de réverbération

Les segments représentant les variations de temps de réverbération — — sont presque parallèles à l'axe 1. Celui-ci est corrélé à -88% avec le critère TR . Les couples GH, HI, BC et CD où seule la clarté $C80$ varie dans une zone moyenne sont aussi parallèles mais avec une substitution négative sur le facteur 1. Le critère $C80$ est corrélé à 86% avec l'axe 2. Ces deux facteurs expliquent 30% de variance chacun et sont assez corrélés entre eux ($S_{12}^* = 0.55$). TR et $C80$ sont donc deux critères construits objectivement de manière indépendante, mais perçus sur deux facteurs dépendants. Sur le plan stimuli 2-3, plan spécifique de la clarté, les variations de $C80$ de -4 dB à +8 dB pour un temps de réverbération faible (1.1 s) sont presque linéaires et s'orientent progressivement vers l'axe 3 surtout pour le couple DE. On retrouve le parallélisme des segments représentant les variations de clarté supérieure à +4 dB, HI et CD. Le couple FG par contre est projeté uniquement sur l'axe 1. Une variation de clarté est ici assimilée à une variation de temps de réverbération.

Il semble donc que le critère clarté $C80$ dans une zone moyenne de valeurs (ici de -4 dB à +4 dB), traduise correctement un facteur perceptif important. Celui-ci est indépendant du facteur de niveau sonore, mais il est dépendant du facteur lié au temps de réverbération. Dans une zone de clarté faible (< -4 dB), il semble que les variations de temps de réverbération et de clarté soient perçues de la même façon. Par contre, dans une zone de clarté forte (> +4 dB), celles-ci semblent complètement différenciées.

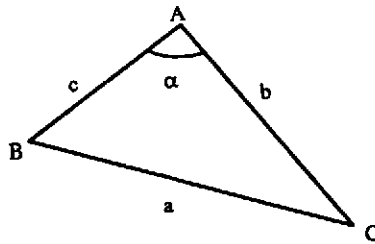
La troisième dimension semble ici correspondre à la perception des variations de clarté pour des valeurs supérieures à +4 dB. Les effets des grandes distances ont été réduits ici et la structure du test est mieux adaptée à l'analyse INDSCAL que celle des tests précédents. On est tenté de conclure ici qu'un nouveau facteur perceptif est utile pour traduire les variations de clarté pour des valeurs élevées.

5.2.4 Etude locale des distances et angulations entre configurations

Parallèlement aux analyses, nous avons étudié les courbures introduites par les jugements des dissimilarités. Si la cause de cette courbure provient uniquement des grandes distances, elle ne devrait pas se retrouver à partir des données initiales de dissimilarités non modifiées par l'analyse lorsque les configurations sont perceptivement proches.

Les données de dissimilarités sont moyennées sur tous les sujets de façon à obtenir une matrice de dissimilarités inter-configurations que nous appellerons matrice de distances brutes. La moyenne s'effectue sur toutes les matrices de dissimilarités normalisées de façon à donner la même importance à tous les sujets. Afin de revenir au plus près aux données de dissimilarité des tests, cette matrice moyenne est multipliée par la moyenne des variances de chacune des matrices initiales.

Si la perception des variations d'un critère est liée à un facteur et que ce facteur a un comportement linéaire, trois configurations où seul ce critère varie devraient être alignées. Si elles ne le sont pas, l'angle peut être calculé par la formule simple suivante:



$$\alpha = \arccos \left(\frac{b^2 + c^2 - a^2}{2 \cdot b \cdot c} \right)$$

Les tableaux de la page suivante présentent les résultats de ces calculs.

TEST	NIVEAU	TEMPS DE REVERBERATION
NIV1	150° 180° 120°	-
NIV2	130° 180° 180°	103° 111° 110°
NIV4 MATUZ	115°	95°
NIV4 BRYN	106°	130°
CLAR4	-	95°

(a)

TEST	CLAR1	CLAR2	CLAR3	CLAR4
-6 dB	-	40°	-	-
-3 dB	107°	102°	150°	180°
0 dB	130°	130°	180°	180° 95°
+3 dB	150°	130°	180°	125°
+6 dB	-	150°	-	-

(b)

Tableau 5.1

Angles calculés à partir des distances brutes entre trois configurations pour lesquelles un seul critère objectif varie. a: Angulations subjectives du niveau et du temps de réverbération. b: Angulations subjectives de la clarté.

Le critère *NIV* est linéaire dans la zone de perception du facteur de force sonore (tests NIV1 et NIV2). Par contre, une angulation apparaît lorsque le deuxième facteur de niveau est présent dans le test (tests NIV4 MATUZ et BRYN). Ceci semble logique. Le critère *TR* n'est pas perçu linéairement bien que les analyses précédentes n'en ait pas visiblement fait état. Ceci est étonnant car l'angulation correspondante est importante ($\approx 110^\circ$). La non linéarité du critère *C80* pour des valeurs faibles se transforme progressivement en une perception linéaire pour des valeurs de clarté fortes. L'angulation ne semble pas en rapport avec les résultats de courbure proposés par les analyses INDSCAL.

Les courbures ne sont pas identiques pour tous les critères, ce qui laisse supposer que la nature du critère lui-même intervient dans cet effet. L'angulation perceptive pour les variations de *TR* n'est pas traduite par l'analyse INDSCAL tandis que celle de la clarté semble exagérée. La supposition avancée dans ce paragraphe, qui voudrait que la courbure soit due uniquement aux grandes dissimilarités, n'est pas suffisante. Cette courbure existe intrinsèquement dans la perception des variations de certains critères.

Les écoutes a posteriori au casque s'avèrent donc utiles maintenant pour interpréter les trois facteurs perceptifs.

5.3 Ecoute descriptive des qualités acoustiques des configurations

L'écoute des configurations a confirmé la substitution entre la perception d'une variation de temps de réverbération et d'une variation de clarté. Celle-ci est en effet d'autant plus grande que la valeur de la clarté diminue et que celle du temps de réverbération augmente.

Dans leurs zones respectives de valeurs moyennes, les deux facteurs perceptifs différencient les salles suivant leur caractère *sec - réverbérant* pour l'un et *net - brouillé* pour l'autre. Lorsque la clarté devient importante, les auditeurs ont l'impression de se rapprocher de la source sonore. Ce changement d'impression explique la nécessité d'un troisième facteur dans l'étude de la clarté.

Dans une zone de clarté extrêmement faible et de temps de réverbération fort, le brouillage et la réverbérance sont tels que l'on retrouve alors l'effet d'absence dû au niveau très faible de l'onde directe (§ 4.6). Dans une zone de clarté moyennement faible (≈ -5 dB), une augmentation d'énergie précoce est perçue par un raccourcissement du temps de réverbération. Lorsque la clarté augmente, au fur et à mesure que les premières millisecondes augmentent en énergie, cette substitution disparaît elle aussi progressivement.

L'effet de rapprochement est en général dû à la perception du niveau de l'onde directe. Nous verrons par la suite l'importance de celle-ci mais on peut déjà avancer qu'une variation de clarté dans une zone de valeur forte est perçue comme l'émergence de l'onde directe.

5.4 Substitutions entre les variations de critères C80 et TR

Celles-ci se situent principalement sur les variations de temps de réverbération et de clarté pour des valeurs faibles. Ce sont aussi dans ces zones que les courbures les plus fortes ont été rencontrées. Or ces effets de substitution sont des effets très locaux que l'analyse globale INDSCAL a du mal à représenter. Nous avons donc essayé de développer la surface perceptive plongée dans un espace à trois dimensions en un plan sur lequel les substitutions pourraient être étudiées. Cela suppose donc de construire ce plan à partir de configurations proches les unes des autres afin de respecter l'effet local des substitutions. Deux méthodes ont été utilisées pour développer l'espace perceptif.

5.4.1 Réduction du nombre de dimensions sous-jacentes

Le nombre de dimensions choisi pour nos analyses multidimensionnelles optimise la représentation euclidienne de l'espace perceptif. Trois dimensions sont nécessaires pour traduire perceptivement les variations de deux critères objectifs $C80$ et TR . Les configurations situées dans cet espace peuvent se trouver sur une surface courbée ou non, paramétrée par deux variables seulement. Le développement mathématique de cette surface permet de suivre localement les positions des configurations les unes par rapport aux autres.

Cette représentation paramétrique des structures non linéaires a été développée par Suzanne Winsberg à l'IRCAM et J. Doug Carroll de AT&T Bell Labs [24]. Le but de cette méthode est de réduire le nombre de dimensions des espaces multidimensionnels, pour ne retenir que le minimum de variables nécessaires à la représentation d'une structure. Les données initiales sont les coordonnées x_{ji} des configurations dans l'espace à r dimensions. L'espace solution doit répartir ces mêmes configurations dans un espace à p dimensions, avec $p \ll r$. Les coordonnées des n configurations seront alors notées χ_{jv} , v variant de 1 à p .

Le modèle est le suivant:

$$x_{ji} \approx \hat{x}_{ji} = f_i(\chi_{j1}, \chi_{j2}, \dots, \chi_{jp})$$

f_i est une fonction continue et différentiable.

Prenons le cas où la structure peut être représentée en une seule dimension, les configurations se situant sur une courbe dans l'espace. Les coordonnées s'écrivent alors $x_{ji} = f_i(\chi_j)$. La fonction f est souvent construite à partir de L fonctions polynomiales d'ordre k reliées en des points de jonctions que l'on appelle les noeuds. Ce genre de fonctions possède toutes les caractéristiques nécessaires à la fonction f .

$$f_i(\chi_j) = \sum_{l=1}^L (\sum a_{lk} \chi_j^k)$$

La solution finale est obtenue par minimisation au sens des moindres carrés de la fonction d'erreur $\sum (x_{ji} - \hat{x}_{ji})^2$. L'algorithme optimise alternativement les fonctions f_i et les paramètres χ_{jv} en partant d'une solution initiale où les grandes distances sont arbitrairement dilatées pour ne prendre en compte que les espaces perceptifs très locaux.

Si nous étendons la représentation à deux variables, les fonctions $f_i(\chi_{j1}, \chi_{j2})$ définissent donc des surfaces. Les coordonnées des configurations j seront donc limitées à deux, χ_{j1} et χ_{j2} . Le plan ainsi défini est un développement de la surface sur laquelle se situent les configurations dans l'espace.

Cette représentation simplifiée a été tentée pour le test CLAR4 où trois dimensions étaient nécessaires pour l'analyse INDSCAL. La courbure était importante pour les valeurs de clarté faibles et presque inexistante pour les valeurs de clarté fortes. La solution proposée est la suivante, où les 15 croix par configuration représentent les positions des configurations pour les 15 sujets ayant participé à ce test.

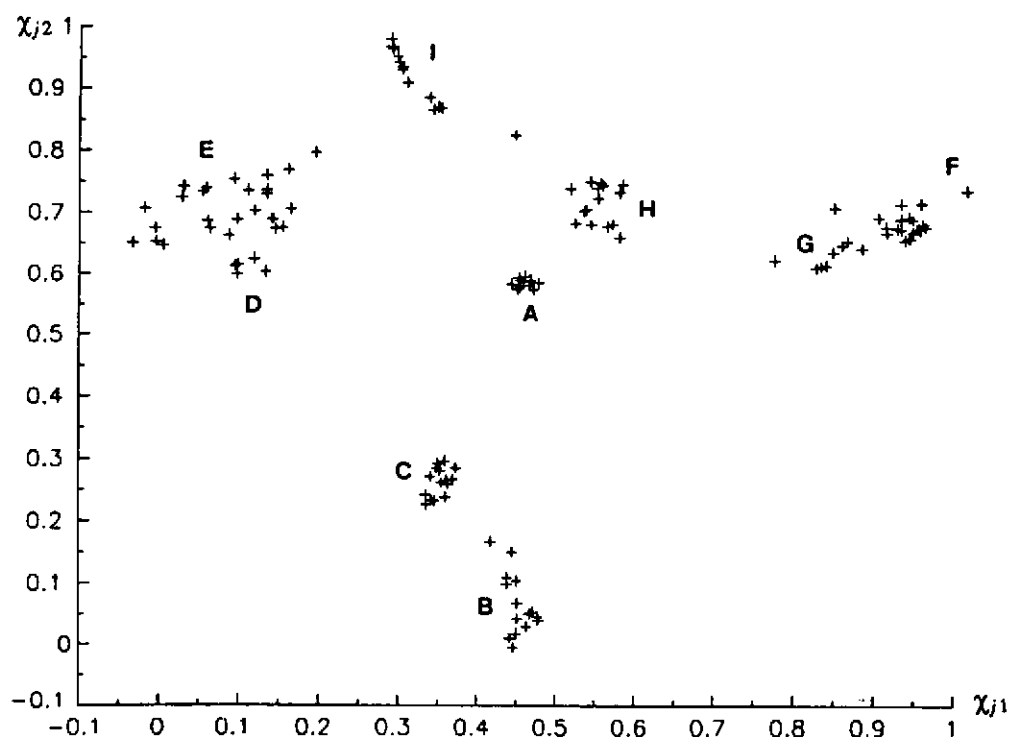


Figure 5.19

Représentation à deux variables χ_{j1} et χ_{j2} de l'espace perceptif du test CLAR4.

Ce plan solution montre que les variations de clarté représentées par les configurations B, C, D et E pour une valeur de temps de réverbération de 1.1 s, sont perçues linéairement. Par contre, lorsque le temps de réverbération augmente pour atteindre 2.5 s, la non linéarité s'observe pour les configurations F, G, H et I. De plus, les segments HG et GF (clarté C 80 qui décroît) s'orientent progressivement dans la direction d'une augmentation de temps de réverbération représentée par les segments DI, CH et BG. On observe donc une substitution entre les critères TR et $C 80$ dans les valeurs faibles de clarté et les valeurs fortes de temps de réverbération.

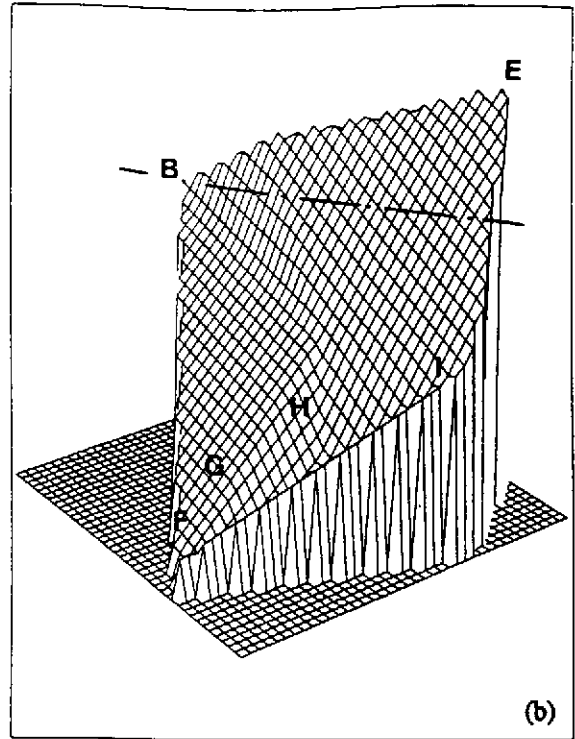
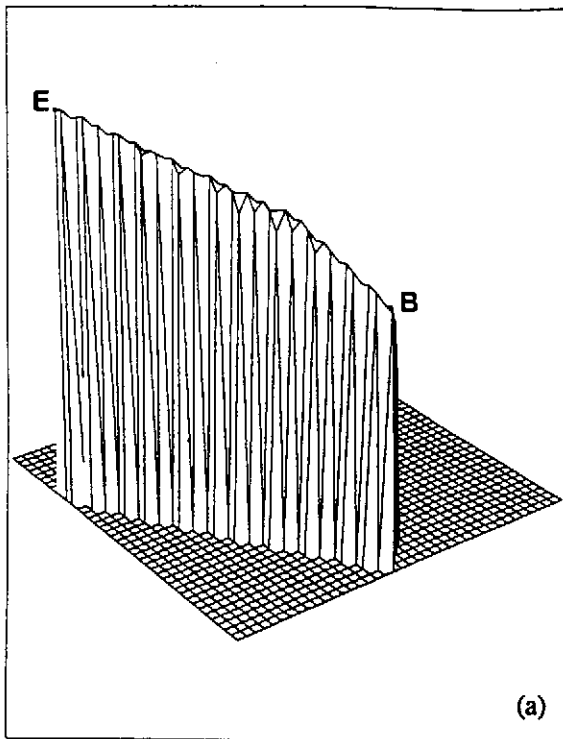


Figure 5.20

Fonction $f_1(x_{j1}, x_{j2})$ de la représentation à deux variables de l'espace perceptif du test CLAR4. a: Surface définie par la fonction f_1 vue de l'origine de la figure 5.19. b: Surface définie par la fonction f_1 vue environ de la configuration H de la figure 5.19.

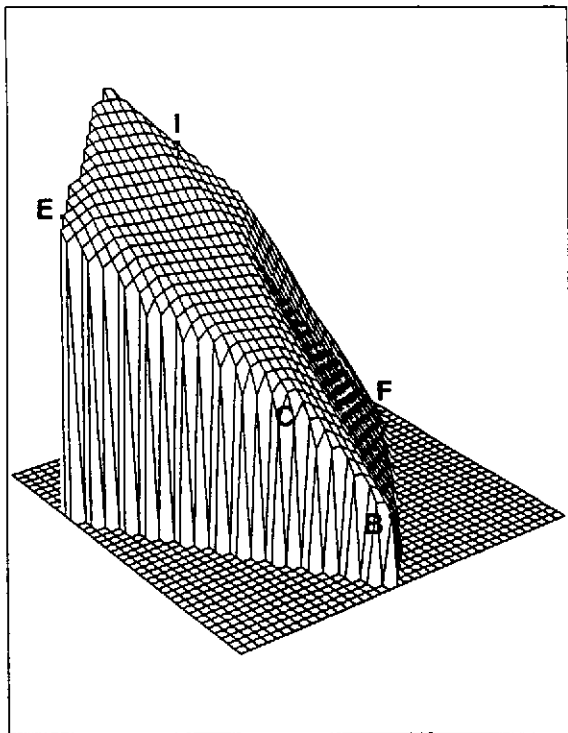


Figure 5.21

Surface définie par la fonction f_2 de la représentation à deux variables de l'espace perceptif du test CLAR4. Surface vue de l'origine de la figure 5.19.

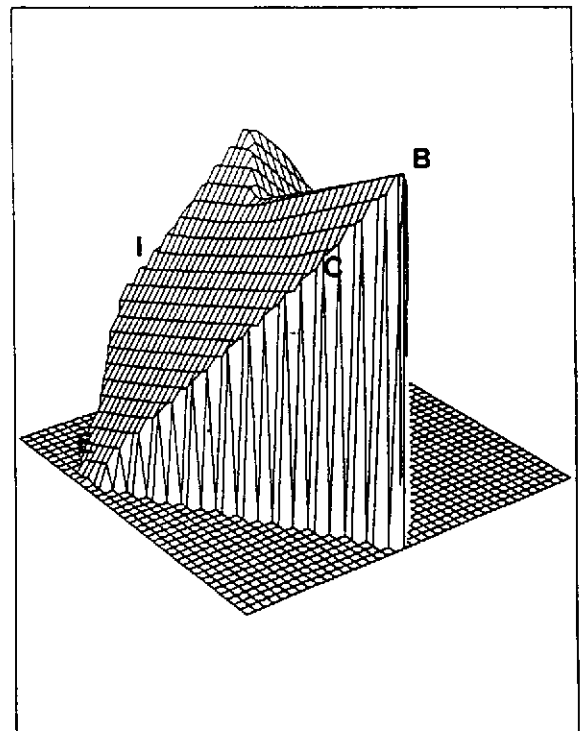


Figure 5.22

Surface définie par la fonction f_3 de la représentation à deux variables de l'espace perceptif du test CLAR4. Surface vue de l'origine de la figure 5.19.

La fonction qui fait correspondre la représentation simplifiée à un axe de l'analyse INDSCAL permet de mieux interpréter ce dernier. La fonction correspondant à l'axe 1 est plane et les courbes de niveau, qui caractérisent un certain effet perçu sur le facteur 1, s'écartent des configurations ayant un même TR (B à E) pour se rapprocher d'un temps de réverbération plus élevé lorsque la clarté augmente. Cet axe est un facteur perceptif qui est donc traduit dans le domaine objectif par le critère TR avec toutefois une influence du critère $C80$.

Les fonctions correspondant aux axes 2 et 3 de l'analyse INDSCAL sont des surfaces courbes, la deuxième fonction étant tout de même moins perturbée que la dernière. Sur ces deux fonctions, la surface est plane pour des valeurs de clarté fortes (E et I) et se courbe vers les valeurs faibles (F). Ces deux fonctions montrent que ce sont les valeurs de clarté faible et temps de réverbération fort qui perturbent les facteurs correspondants.

5.4.2 Quantification de la substitution entre les critères TR et $C80$

Une deuxième méthode moins visuelle mais plus intéressante au niveau de la quantification des substitutions a donc été effectuée. Nous avons calculé les angles entre les différents segments représentant les variations de ces critères. Les angles étant modifiés par la méthode INDSCAL, ceux-ci ont été calculés à partir des distances brutes. Or, les angles ainsi calculés ne sont pas les angles réels dus à la perception, car les dissimilarités permettent uniquement de construire des projections. Lorsque l'espace est peu courbé, les projections peuvent être assimilées aux plans tangents et les angles sont proches des angles réels, mais lorsque la courbure devient aussi importante que celle que nous avons rencontrée pour la clarté, les angles β_j sont alors sous estimés par les angles α_j .

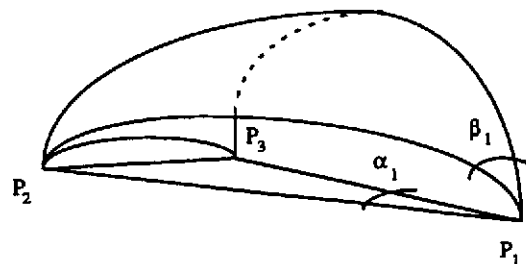


Figure 5.23

Angles β_j dessinés sur une surface courbe et projection α_j de ceux-ci sur une surface plane.

Un calcul très approximatif de courbure et de correction des angles, à partir des données de dissimilarités, a tout de même permis de caractériser le plus localement possible cette substitution [25].

Si l'on étudie la courbure C d'un espace à partir de trois points, celle-ci est formalisée de la manière suivante:

$$C = \frac{S}{R^2} = \left(\sum_{j=1}^3 \beta_j \right) - \pi$$

S est la surface de l'espace défini par les trois points et β_j est l'angle au sommet j sur la surface courbe. R est le rayon de courbure moyen.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

Une première approximation consiste à prendre $R = R_1 = R_2$

L'angle β_j projeté dans le plan devient α_j .

$$\beta_j = \lambda \cdot \alpha_j$$

$$\text{donc } \sum_{j=1}^3 \beta_j = \lambda \cdot \sum_{j=1}^3 \alpha_j.$$

La somme des angles α_j dans le plan est toujours égale à π .

$$C = \lambda \cdot \pi - \pi \quad \text{d'où} \quad \lambda = \frac{\pi + \frac{S}{R^2}}{\pi} \quad (a)$$

La transformation des angles α_j en β_j dépend donc du rayon de courbure R et de la surface S . R peut être estimé à partir d'une surface plus large mais triangularisée, en supposant que le rayon de courbure est constant sur trois triangles consécutifs. Ceci est intéressant car nous avons accès à ces surfaces à l'aide des données de dissimilarités. Pour simplifier les calculs, S est assimilé en approximation à une surface plane.

Soit maintenant une surface triangularisée définie par trois surfaces consécutives, la courbure est définie alors par le calcul suivant:

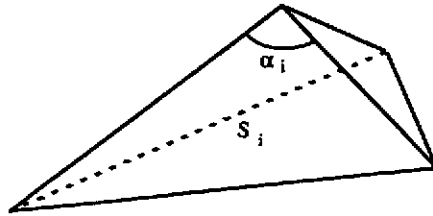


Figure 5.24
Courbure d'une surface calculée à partir d'une triangularisation.

$$C = 2\pi - \sum_{i=1}^3 \alpha_i = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i}{R^2}$$

S_i est la surface de chaque triangle i .

R est le rayon de courbure de l'espace.

α_i est l'angle au sommet commun aux trois triangles, du triangle i .

Les angles α_i sont calculables à partir de distances entre les configurations. Le rayon de courbure s'écrit alors:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^3 S_i}{2\pi - (\sum_{i=1}^3 \alpha_i)}$$

En supposant que le rayon de courbure ainsi calculé est constant sur chacun des triangles consécutifs, et en réinjectant cette valeur dans la formule (a) pour chaque triangle, les angles de substitution β_i entre les variations de temps de réverbération et de clarté sur la surface perceptive elle-même ont pu être retrouvés.

L'espace perceptif du test CLAR3 difficilement interprétable jusqu'à présent, permet d'appliquer la théorie précédente. Les configurations B, C et c définissent une surface où s'intègre la configuration b.

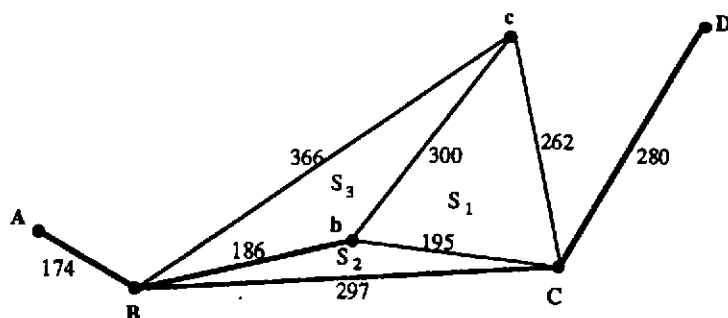


Figure 5.25

Etude locale des distances brutes entre les configurations B, C, c et b du test CLAR3.

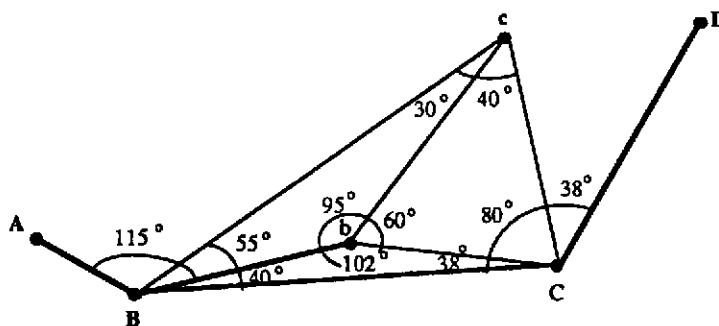


Figure 5.26

Etude locale des angles calculés à partir des distances brutes entre les configurations B, C, c et b du test CLAR3.

$S_1 = 25331$, $S_2 = 17738$ et $S_3 = 27793$. La somme des angles au sommet vaut 257° . La courbure est donc de 1.8. Le rayon de courbure moyen sur ces trois triangles vaut donc $R = \sqrt{\frac{S_1 + S_2 + S_3}{C}} = 198$. Les coefficients correcteurs des angles ramenés à chaque triangle valent respectivement 1.2, 1.14 et 1.23. Cela suffit à retrouver des angles cohérents de substitution présentés sur la figure suivante.

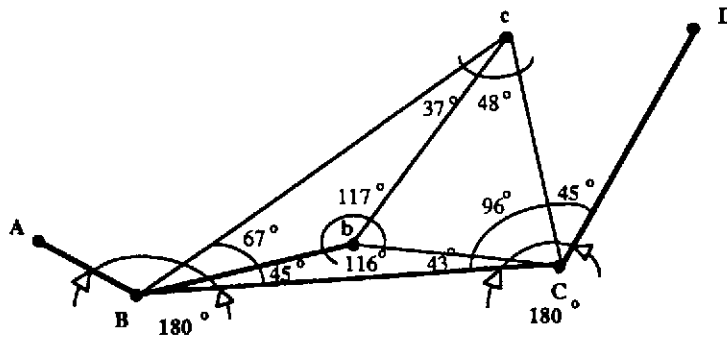


Figure 5.27

Etude locale des angles entre les configurations B, C, c et b ramenés sur la surface courbe de l'espace perceptif du test CLAR3.

Les angles de substitution entre les segments bB et BC puis entre cC et CD valent tous deux 45° . C'est donc une substitution encore importante (50%) pour des clartés de -3 dB et 0 dB et un temps de réverbération de 2 s.

Les mêmes calculs ont été effectués sur le test CLAR4. La première surface étudiée est formée par les points B, C, D et A. Il s'avère que celle-ci est plane. Les angles ne sont donc pas modifiés par la courbure. On trouve ici entre BC et CA un angle de 72° ($C80 = 0$ dB et $TR = 1.1$ s), les points B, C et D sont alignés.

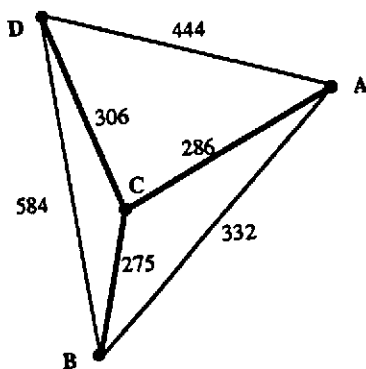


Figure 5.28

Etude locale des distances brutes entre les configurations B, C, D et A du test CLAR4.

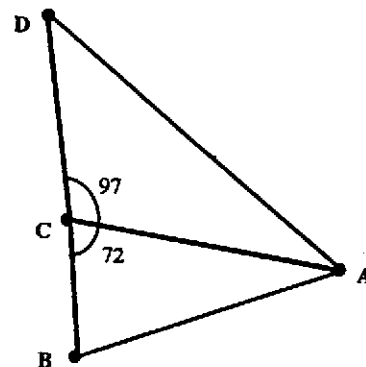


Figure 5.29

Etude locale des angles entre les configurations B, C, D et A du test CLAR4.

La surface formées par les points C, A, H et I possède une courbure assez importante de 1.95. Le calcul de réajustement montre une angulation de 65° entre les segments AH et HI ($C80 = 0$ dB et $TR = 2.5$ s). On voit que la substitution augmente avec le temps de réverbération.

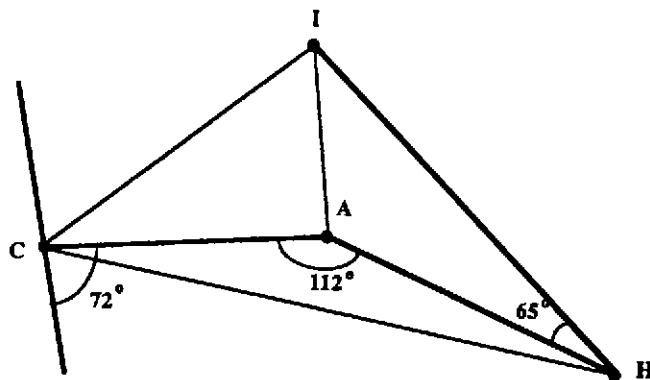


Figure 5.30
Etude locale des angles entre les configurations C, A, H et I ramenés sur la surface courbe de l'espace perceptif du test CLAR3.

Enfin les quatre points A, H, G et F sont sur un plan. Les segments AH et GF sont parallèles, la substitution est donc ici totale.

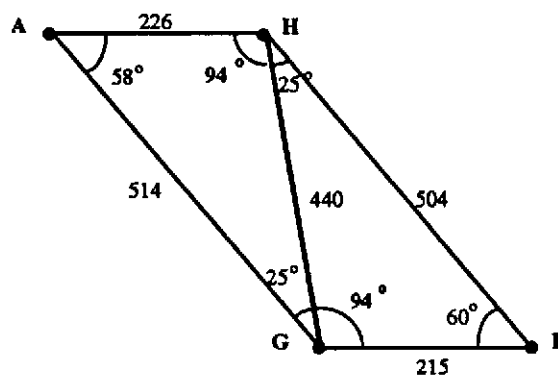


Figure 5.31
Etude locale des distances brutes et des angles entre les configurations A, H, G et F du test CLAR4.

Les tests CLAR3 et CLAR4 ont permis de quantifier la substitution entre les effets perceptifs dus aux variations de clarté et de temps de réverbération. Pour des clartés très faibles (-8 dB à -4 dB), les variations de clarté C_{80} et de temps de réverbération TR sont complètement substituées entre elles, les segments les représentant étant parallèles dans l'espace perceptif. Lorsque la clarté est autour de -3 dB l'angle devient alors égal à 45° . Pour des clartés autour de 0 dB, l'angle vaut 45° pour un temps de réverbération de 2 secondes, 65° pour un temps de réverbération de 2.5 secondes et 70° pour 1.1 secondes. Bien que les résultats ne soient pas complètement concordants, on remarque que la substitution à clarté constante, a tendance à diminuer lorsque la valeur du temps de réverbération diminue aussi et que cette substitution a tendance à augmenter lorsque la clarté diminue à temps de réverbération constant.

Nous avons déjà soulevé le problème de la perception d'une variation de clarté dans une zone de clarté forte comme une variation de niveau sonore de l'onde directe. Aucun test jusqu'à présent n'a été construit pour contrôler cet effet. Aussi nous avons construit dans la chambre sourde une série de tests où l'onde directe est un critère prédominant.

5.5 Relation entre les variations des critères C_{80} et Dir

5.5.1 SPACE1

Tous les tests SPACEn présentés dans la suite de ce rapport ont été passés dans la chambre sourde sur un extrait de sonate pour flûte de Bach. Un premier test SPACE1 a permis de bien comprendre l'importance de l'onde directe et des premières réflexions dans la perception de la qualité acoustique lorsque la clarté C_{80} est forte. Pour ce test, les configurations ont été construites à partir de trois clartés C_{80} en diffusant les premières réflexions sur les haut-parleurs HP1 et HP2 (figure 2.1). Le premier haut-parleur diffuse quatre réflexions retardées de 10 à 40 ms, le second diffuse aussi quatre réflexions retardées de 40 à 80 ms. L'onde directe est toujours diffusée sur le haut-parleur frontal. Les niveaux sonores émis par les deux haut-parleurs HP1 et HP2 sont égaux. Pour chaque clarté, trois configurations sont construites où l'onde directe varie par pas de 2 dB. Pour que la clarté C_{80} ne varie pas, le niveau des premières réflexions a été ajusté, de sorte que la valeur du critère appelé distance de réverbération H varie par pas de 2 dB entre -7 dB et -3 dB.

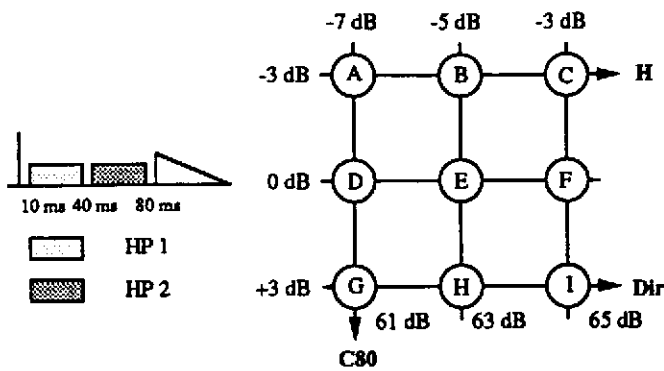


Figure 5.32
 Caractéristiques objectives des configurations
 du test SPACE1.
 NIV = 70 dB, TR = 1.6 s.

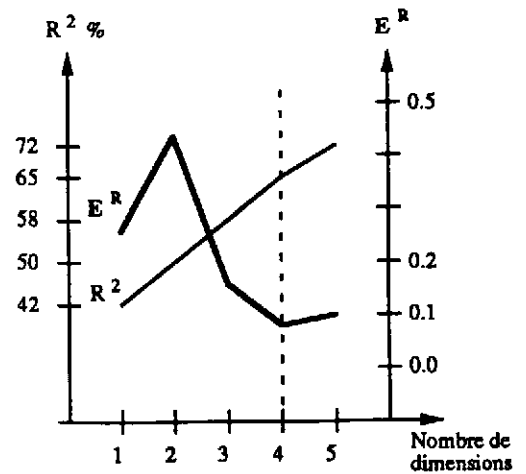


Figure 5.33
 Optimisation du nombre de dimensions pour le
 test SPACE1.

Quatre dimensions sont nécessaires pour expliquer 65% de la variance totale du test (22%, 20%, 13% et 10%).

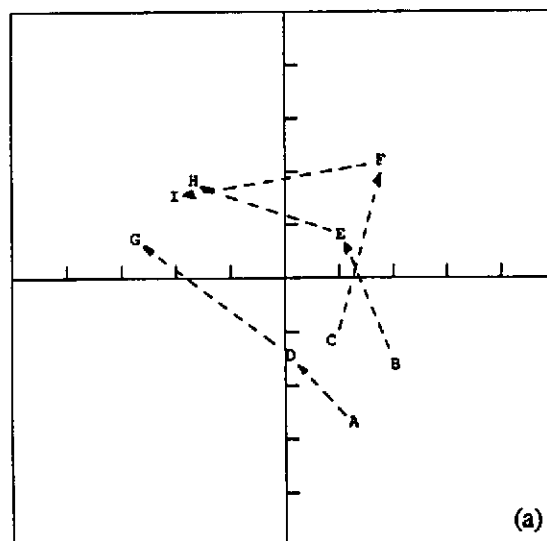


Figure 5.34
 a: Plan 1-2 stimuli du test SPACE1.
 - - - - variation de clarté lorsque l'onde directe
 est constante.

Les segments AD, DG, BE et EH correspondant aux variations de clarté C 80 où l'onde directe est constante, sont à peu près parallèles, mais non colinéaires à l'axe 1 ni à l'axe 2. Les sujets étant assez dispersés dans ce plan ($S_{12} = 0.83$ valeur inférieure à 0.90), les axes sont à considérer comme des facteurs perceptifs et les variations de clarté décrites plus haut sont donc perçues sur deux facteurs.

Ces trois facteurs sont difficiles à interpréter immédiatement et l'écoute des configurations a permis ici de comprendre que le facteur appelé *net - brouillé* correspondait au critère C 80, uniquement lorsque les variations de ce critère étaient obtenues par translation des blocs énergétiques avant et après 80 ms. Si la répartition énergétique change à l'intérieur même des 80 premières millisecondes, un effet de coloration apparaît. Cet effet peut être traduit par le rapport entre le niveau de l'onde directe seule et celui des premières réflexions. En effet, lorsque l'onde directe domine les premières réflexions, l'acoustique de la salle peut être qualifiée de *contrastée* tandis que cette qualité semble sans relief (*plate*) lorsque ce sont les premières réflexions qui dominent. Le premier facteur correspondrait donc à cet effet de coloration. Le deuxième facteur correspondrait plus au facteur classique de la clarté. Le quatrième facteur est bien senti comme celui du rapprochement. Les variations de niveau de l'onde directe schématisées par sont encore d'autant plus perçues que la clarté est forte (surtout pour les configurations G, H et I).

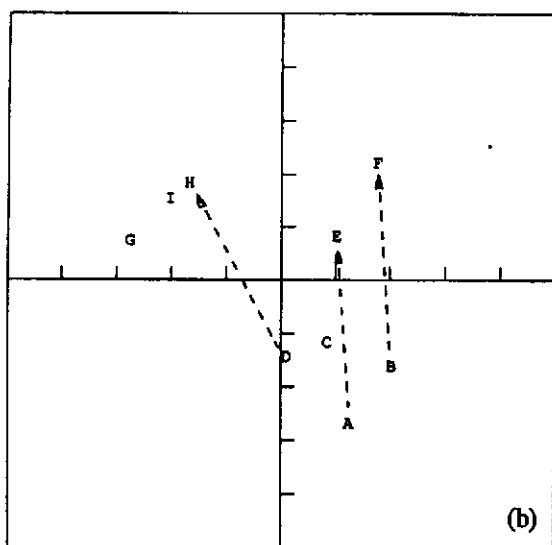


Figure 5.34

b: Plan 1-2 stimuli du test SPACE1.

- - - - - variation de clarté par translation des blocs énergétiques avant et après 80 millisecondes.

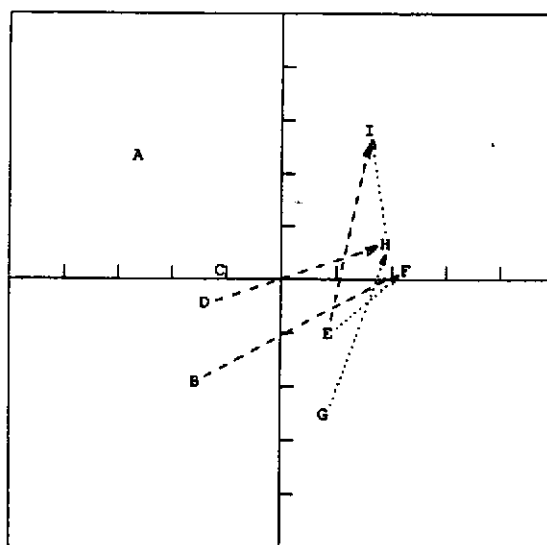


Figure 5.35

Plan 2-4 stimuli du test SPACE1.

- - - - - variation de clarté par translation.
 variation d'onde directe.

A l'aide des éclaircissements apportés par les écoutes des configurations, nous pouvons revenir aux plans perceptifs. Le critère *Dir/REF* y a été projeté et est fortement corrélé au facteur 1 ($COR_{Dir/REF 1} = 0.8$). Les variations de clarté obtenues par translation des 80 premières millisecondes ainsi que de la réverbération tardive sont parallèles au facteur 2 lorsque la clarté reste inférieure à 0 dB (figure 5.34 b). En effet les segments AE et BF sont bien parallèles à l'axe 2 mais dès que la clarté devient égale à +3 dB, le facteur 4 devient nécessaire. Le plan 2-4 montre un parallélisme entre les segments BF et DH. La perception de la variation de clarté commence à s'accompagner de la perception du niveau de l'onde directe. Le segment EI est lui complètement parallèle au quatrième facteur. Une variation de clarté est alors non plus perçue comme une amélioration de netteté mais comme un effet de rapprochement dû uniquement à la variation de l'onde directe. Les deux critères *C 80* et *Dir* se succèdent donc.

TEST SPACE1	
Configurations	Dir / REF
A	-0.9 dB
B	1.8 dB
C	2.3 dB
D	-3.4 dB
E	-0.4 dB
F	2.1 dB
G	-5.3 dB
H	-3.2 dB
I	-0.7 dB

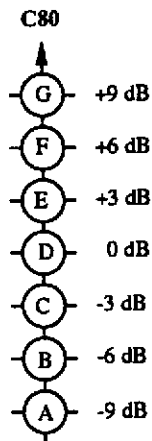
Tableau 5.2
Valeurs du critère *Dir/REF* pour les configurations du test SPACE1.

Nous venons d'étudier les effets perceptifs dus aux variations de clarté mais nous pouvons aussi étudier les effets dus aux variations de niveau d'onde directe alors que la clarté ne varie pas. Outre l'effet de coloration dû au critère *Dir/REF*, nous remarquons qu'un niveau d'onde directe qui augmente, dans une zone moyenne de clarté *C 80*, a un effet positif sur le facteur 2. Il y a ici substitution entre le critère *Dir* et le facteur correspondant au critère *C 80*.

Le troisième facteur correspond à un effet spatial, aussi son interprétation n'est pas présentée ici. Le critère *H* qui a servi de critère de construction des configurations est mal projeté dans l'ensemble de cet espace perceptif. Sa norme totale, calculée à partir des corrélations de ce critère sur tous les axes, atteint à peine 60%.

5.5.2 CLAR2

Un autre test passé au casque lors de l'étude de la clarté avait été construit en faisant varier uniquement C_{80} de -9 dB à +9 dB sans bien maîtriser alors le niveau de l'onde directe. Il est intéressant de le présenter ici car il illustre aussi les rapports entre onde directe Dir et clarté C_{80} .



TR = 1.5 s
NIV = 62 dB
Figure 5.1
b: Configurations du test CLAR2.

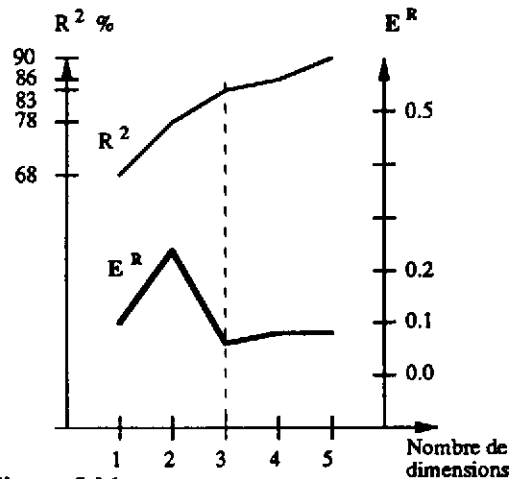


Figure 5.36
Optimisation du nombre de dimensions pour le test CLAR2.

Les trois dimensions (60%, 12%, 11%) traduisent l'évolution de la perception lors des variations de clarté C_{80} . Le premier plan explique les variations de clarté dans des zones de valeurs moyennes et fortes, le facteur 3 expliquant les variations de C_{80} lorsque les valeurs sont faibles.

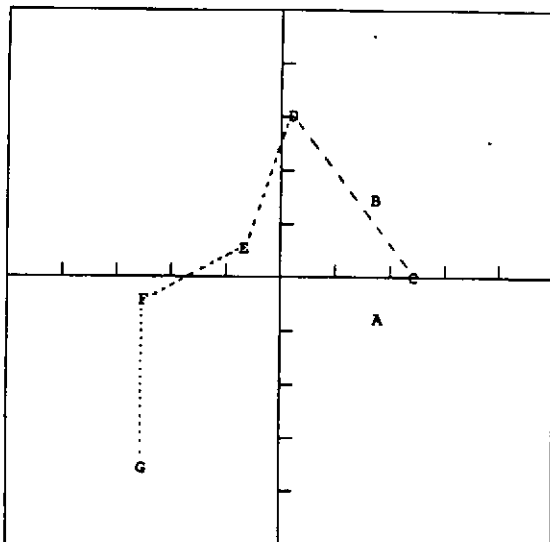


Figure 5.37
Plan 1-2 stimuli du test CLAR2.
- - - - variation de clarté.
..... variation d'onde directe.

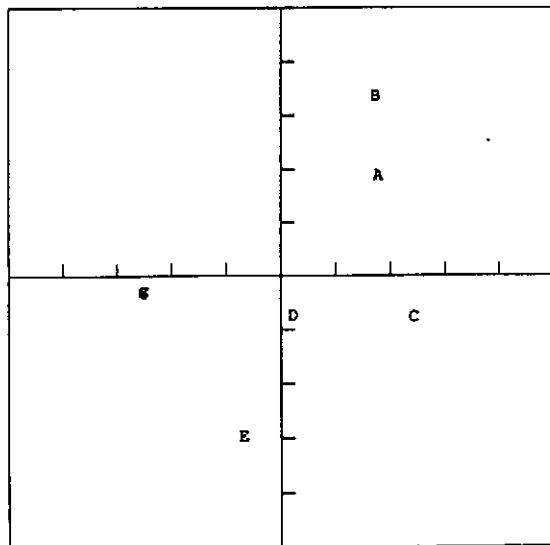


Figure 5.38
Plan 1-3 stimuli du test CLAR2.

CLAR2	
Configurations	Dir
A	39 dB
B	48 dB
C	52 dB
D	54 dB
E	56 dB
F	57 dB
G	59 dB

Tableau 5.3
Valeurs du critère *Dir* pour les configurations du test CLAR2.

Dès que la clarté devient positive, les variations de l'onde directe sont perçues sur le facteur 2. Celles-ci ont été mieux perçues pour les couples DE et FG que pour le couple EF. Si l'on regarde plus attentivement les valeurs d'onde directe pour ces quatre configurations, cela s'explique parfaitement. Le critère *Dir* prédomine donc progressivement sur le critère *C 80*. Il semble parfaitement traduire le facteur de rapprochement dans une zone de clarté positive. On remarque aussi que la configuration E est à une extrémité du facteur 3 (figure 5.38). Le très faible pourcentage de variance de cet axe par rapport au premier ne permet pas d'interpréter cet effet.

5.5.3 CLAR4

Ce test déjà présenté pour l'étude des substitutions entre *C 80* et *TR* présente une particularité dans la construction des configurations à clarté forte (§ 5.2.3). La variation de clarté de +4 dB à +8 dB est uniquement obtenue par diminution du niveau de la réverbération tardive, sans variation de l'onde directe. Or, le couple correspondant DE est perçu uniquement sur le facteur de rapprochement. Dans ce cas, la substitution de la clarté sur ce dernier facteur est complète (figure 5.18).

5.6 Conclusion concernant la clarté

On pourrait ici conclure sur l'étude de la perception des variations du critère $C80$ à partir de valeurs faibles jusqu'aux fortes valeurs. Celle-ci est résumée dans le schéma ci-dessous, où les valeurs des limites de clarté $C80$ sont estimées pour une valeur de temps de réverbération moyenne de 1.6 secondes. Si la valeur du critère TR est supérieure, les limites doivent être décalées dans un sens croissant, au contraire si la valeur de TR est inférieure à 1.6 s, les limites doivent plutôt être décalées dans un sens décroissant.

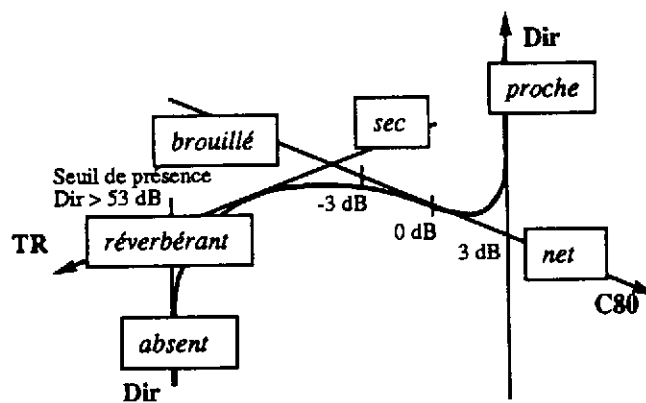


Figure 5.39

Perception des variations de la clarté à partir de valeurs faibles pour terminer par de fortes valeurs du critère $C80$. Les valeurs limites de $C80$ sont données approximativement pour un temps de réverbération moyen de 1.6 secondes.

Il reste encore à étudier les effets dus à la direction d'arrivée de l'énergie afin de mieux définir les énergies à prendre en compte pour l'onde directe, les premières réflexions et la réverbération tardive. Cela sera présenté dans le chapitre sur la spatialisation. Mais auparavant, nous allons étudier les effets de coloration dans les salles, à peine abordés dans le test SPACE1 avec le critère Dir/REF .

6. EFFETS DE COLORATION

Les premières réflexions jouent un grand rôle dans l'effet de coloration d'une salle. Le critère de déviation spectrale DS avait été proposé pour traduire cet effet perceptif. Mais les premières réflexions ne sont pas seules en cause dans cet effet. Les valeurs de certains critères comme NIV et TR dans chaque bande d'octave conduisent eux aussi à produire des effets de coloration. Ces deux manières de jouer sur la coloration des salles ont donc été étudiées, toujours à l'aide d'analyses multidimensionnelles INDSCAL. Tous les tests appelés TIMB.. ont été passés au casque sur un extrait d'un quintette à vents de Darius Milhaud. Ce morceau a été choisi car son spectre moyen était à la fois riche en graves et en aigus.

6.1 Coloration due à la répartition des premières réflexions

6.1.1 TIMBDS

Un premier test TIMBDS a été construit, sans essayer de régler les valeurs de critères de coloration mais en jouant naturellement sur les différentes façons de répartir les réflexions dans les premières 80 millisecondes. Le critère de déviation spectrale DS a été mesuré afin d'étudier sa pertinence dans le domaine perceptif. Il est d'autant plus important que la première réflexion est proche de l'onde directe et que son niveau se rapproche du niveau de celle-ci. Ce test a donc été construit en jouant sur le nombre des premières réflexions, sur leurs niveaux et sur leurs délais par rapport à l'onde directe.

Dir	REF	C80	Dir	REF	Dir	REF	Dir	REF
			10 ms	80 ms	35 ms	60 ms		
61 dB	64 dB	0 dB	A		D		G	
62 dB	62 dB	-2 dB	B		E		H	
63 dB	63 dB	0 dB	C		F		I	

Figure 6.1

Caractéristiques objectives des configurations du test TIMBDS.

$TR = 1.6$ s, $NIV = 69$ dB.

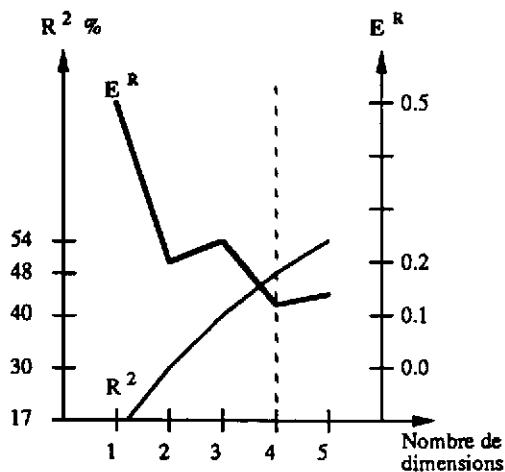


Figure 6.2
Optimisation du nombre de dimensions pour le test TIMBDS.

TEST TIMBDS	
Configurations	DS
A	5.8 dB
B	5.2 dB
C	3.4 dB
D	4.9 dB
E	7.3 dB
F	7.3 dB
G	4.6 dB
H	6.8 dB
I	6.8 dB

Tableau 6.1
Valeurs des mesures de déviation spectrale *DS* pour les configurations du test TIMBDS.

Le choix de quatre dimensions a donc été retenu, mais cela n'explique que 48% de la variance totale du test. Il faut dire que ce test a été jugé difficile par l'ensemble des sujets. Les dimensions expliquent respectivement 13%, 12%, 12% et 11%. Elles sont donc toutes comparables.

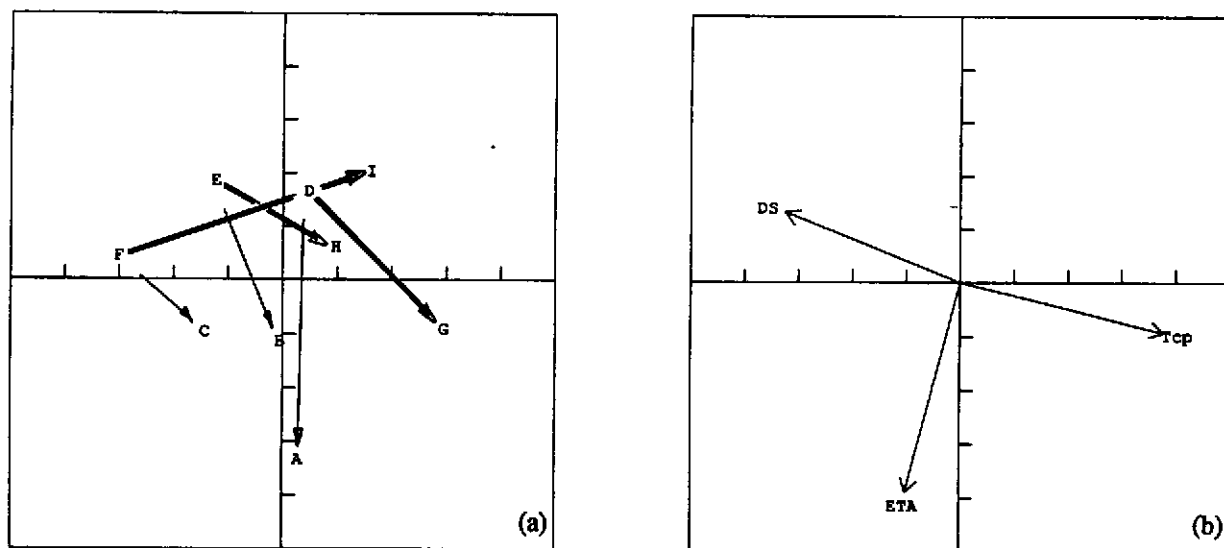


Figure 6.3
Plan 1-2 du test TIMBDS. a: Plan stimuli. b: Plan critères
 ——— variation de temps central précoce.
 ——— variation d'étalement.

Sur le plan stimuli 1-2 (figure 6.3 a), les segments AD, BE et CF ont une grande composante sur le facteur 2, tandis que les couples FI, EH et DG s'orientent plutôt sur le premier facteur. Les configurations A, B et C sont à une extrémité du second facteur tandis que l'ensemble des autres est repoussé à l'autre extrémité. Il est alors logique de penser que la répartition en temps des premières réflexions intervient sur ce facteur. Le premier facteur sépare le lot des configurations DEF et GHI, les configurations ABC étant à une position intermédiaire. On peut penser ici que le barycentre en temps des premières réflexions serait un critère adéquat pour traduire objectivement ce facteur. Ce barycentre que nous appellerons temps central précoce T_{cp} , et l'écart type en temps des réflexions que nous appellerons étalement ETA , ont donc été calculés et projetés dans le plan 1-2. Le nouveau critère ETA est en effet bien corrélé au facteur 2 ($Cor_{ETA\ 2} = -0.78$) et le critère T_{cp} est lui corrélé à 76% avec le facteur 1. On remarque que le critère DS est moins bien projeté dans ce plan que les critères précités ($Cor_{DS\ 1} = -0.65$, $Cor_{DS\ 2} = -0.24$).

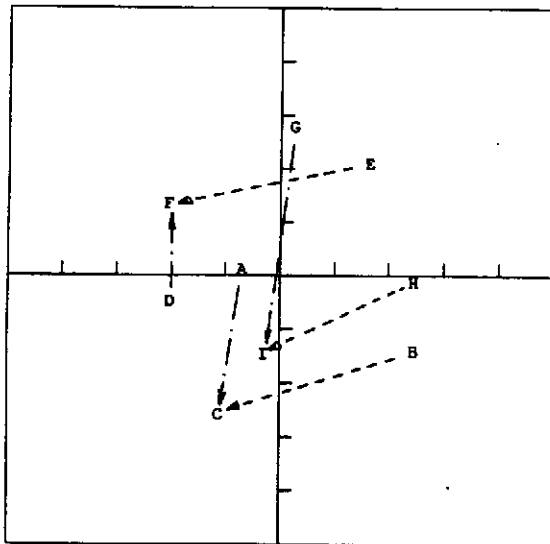


Figure 6.4

Plan 3-4 stimuli du test TIMBDS.

----- variation de clarté.

— — — — — variation du rapport Dir/REF .

TEST TIMBDS		
Configurations	ETA	T_{cp}
A	20 ms	45 ms
B	20 ms	45 ms
C	20 ms	45 ms
D	0 ms	30 ms
E	0 ms	30 ms
F	0 ms	30 ms
G	0 ms	60 ms
H	0 ms	60 ms
I	0 ms	60 ms

Tableau 6.2

Valeurs des critères ETA et T_{cp} pour les configurations du test TIMBDS.

Le plan 3-4 (figure 6.4) traduit perceptivement les variations de clarté C_{80} . Les configurations B, E et H sont à l'extrémité du facteur 3. D'après les résultats du chapitre précédent, les couples où la variation de clarté est obtenue par translation des blocs énergétiques avant et après 80 ms devraient être parallèles au facteur appelé *net - brouillé*. En effet, les couples BC, HI et EF sont presque parallèles au facteur 3 et la clarté C_{80} y est corrélée à -84%. De même d'après les résultats du test SPACE1, les variations de rapports d'énergie à l'intérieur des 80 premières millisecondes devraient être perçues sur le facteur appelé *plat - contrasté*. Les segments AC, DF et GI où seul le critère *Dir/REF* varie sont bien parallèles au facteur 4, avec un léger report sur le facteur de clarté lorsque l'onde directe augmente. Mais il y a une inversion pour le couple DF. On peut imaginer que lorsque le niveau d'une seule réflexion proche de l'onde directe est supérieure de 3 dB au niveau de l'onde directe, il peut y avoir confusion entre ces deux énergies, surtout lorsque l'écoute est faite au casque. Ceci pose le problème de la définition de l'onde directe.

Les deux premiers critères *Tcp* et *ETA* ayant uniquement été introduits par ce test, un deuxième test a été construit dans la chambre sourde pour confirmer ou infirmer les résultats de celui-ci.

6.1.2 SPACE3

Nous revenons ici au système de construction des champs sonores dans la chambre sourde (figure 2.1). Les configurations ont été réglées de façon à jouer sur les étalements et sur les temps centraux précoces des premières réflexions ainsi que sur leur répartition dans l'espace. Le niveau de l'onde directe est constant ainsi que la clarté qui est réglée à 0 dB.



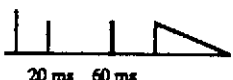





 10 ms 40 ms 80 ms	 HP 1 (A) HP 2 (B)
 20 ms 60 ms	 HP 1 (C) HP 2 (D)
 10 ms 40 ms	 HP 1 (E) HP 2 (F)
 10 ms 40 ms 80 ms	 HP 2 (G) HP 3 (H)

Figure 6.5

Caractéristiques objectives des configurations du test SPACE3.

$C 80 = 0 \text{ dB}$, $NIV = 70 \text{ dB}$, $TR = 1.6 \text{ s}$.

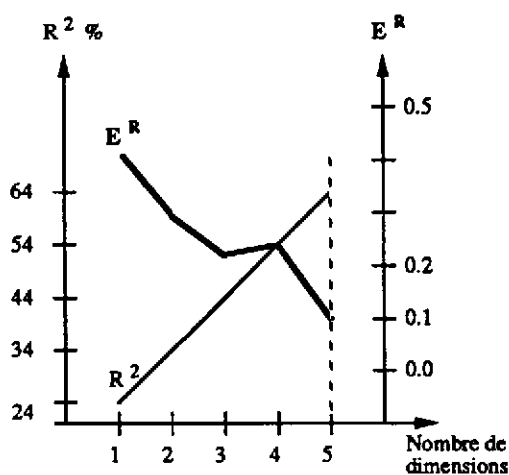


Figure 6.6

Optimisation du nombre de dimensions pour le test SPACE3.

Ce test a été estimé comme étant particulièrement délicat, mais nous avons respecté le nombre de dimensions proposé par les courbes précédentes, c'est à dire que le test a été analysé en 5 dimensions. Celles-ci ont respectivement expliqué 22%, 10%, 10%, 10% et 9% de la variance du test.

Sur ces cinq dimensions, pas une seule n'a pu être corrélée au critère étalement *ETA*. Ce résultat nous a semblé décevant car il mettait en doute les conclusions du test TIMBDS. Or nous verrons dans le chapitre 8 sur les quantifications des facteurs que ce résultat n'est pas si étonnant.

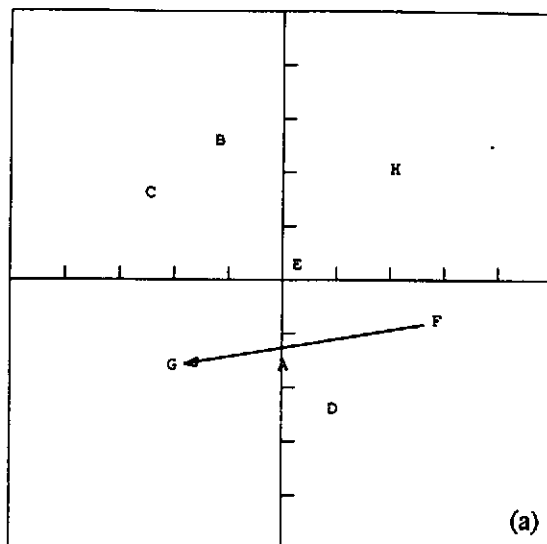


Figure 6.7

Plan 2-5 du test SPACE3. a: Plan stimuli.

— variation de temps central précoce.

Seul ce plan 2-5 est analysé ici car les autres facteurs relèvent des effets de spatialisation qui seront présentés plus loin. Pour l'étude du temps central précoce, il faut projeter le couple FG où seul ce critère varie de 20 ms à 60 ms. Celui-ci est bien parallèle au facteur 2 mais la position de la configuration H, proche de la configuration F semble mettre en doute la validité de ce critère. Une variation de critère *Dir/REF* est difficile à isoler car les configurations n'ont pas été réglées en fonction de ce critère. Les différences sont uniquement dues à des imprécisions de réglage.

L'écoute des configurations a encore éclairci dans ce cas l'interprétation des facteurs. Le facteur 2 a bien été identifié comme étant un effet dû aux variations du temps central précoce. Plus les réflexions sont retardées par rapport à l'onde directe, plus le morceau musical semble *heurté* tandis que lorsque celles-ci sont proches de l'onde directe, le morceau semble au contraire *coulant*. Le même effet a été senti pour le test précédent TIMBDS. Ici, la configuration H où les premières réflexions s'étaient entre 40 et 80 ms est perçue comme très fluide. Ceci est dû au fait que ces réflexions tardives arrivent de l'arrière de la salle et semblent être complètement intégrées à la réverbération. Cette même configuration H semble aussi *contrastée* car l'onde directe est séparée spatialement des

premières réflexions. Le cinquième facteur correspond bien à celui que nous avons appelé *plat - contrasté*. La configuration D est repoussée à une extrémité de ce facteur à cause d'un réglage excessif du niveau des haut-parleurs 2 et 3. Bien que le critère *ETA* n'ait pas été validé dans ce test, les effets perceptifs correspondants ont été écoutés à partir des configurations du test TIMBDS. Lorsque les réflexions sont bien réparties entre 10 et 80 ms, le caractère *doux* de la qualité acoustique peut être opposé au caractère *dur* lorsque les réflexions sont concentrées en un seul instant.

Les deux critères *Tcp* et *Dir/REF* ont été redéfinis par rapport à ceux calculés pour le test TIMBDS du paragraphe précédent, afin de mieux correspondre aux effets perceptifs. Les réflexions tardives venant de l'arrière de la salle ne sont donc plus prises en compte dans le calcul de l'énergie des premières réflexions *REF*.

Les premières réflexions prises en compte par ces critères ont été évaluées par le calcul suivant:

$$REF = 10 \log \left(\int_{5 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} \frac{h_o^2(t) \cdot dt}{P_{ref}^2} - \int_{60 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} \frac{h_{car}^2(t) \cdot dt}{P_{ref}^2} \right)$$

$h_{car}(t)$ est la réponse impulsionnelle mesurée avec un micro cardioïde orienté vers l'arrière.

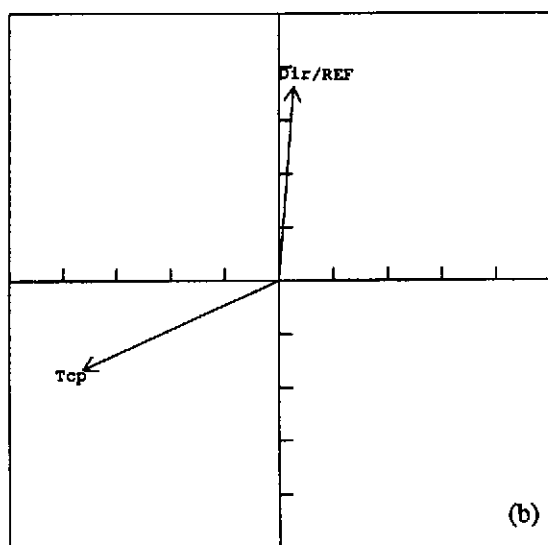


Figure 6.7
Plan 2-5 du test SPACE3. b: Plan critères.

TEST SPACE3		
Configurations	Dir / REF	Tcp
A	0.8 dB	43 ms
B	2.2 dB	25 ms
C	0.3 dB	37 ms
D	-0.3 dB	20 ms
E	0.7 dB	25 ms
F	0.3 dB	25 ms
G	0.8 dB	61 ms
H	2.6 dB	0 ms

Tableau 6.3
Valeurs des critères *Dir/REF* et *Tcp* pour les configurations du test SPACE3, après pondération en espace des premières réflexions.

	NIV = NIV 8 kHz 1 kHz	NIV = NIV - 5 dB 8 kHz 1 kHz	TR 1 kHz
NIV _{63 Hz} = NIV + 5 dB 1 kHz	AE 1 kHz -1.6 dB	DH 1 kHz -1.6 dB	A B C D 1.6 s
NIV _{63 Hz} = NIV - 5 dB 1 kHz	BF 1 kHz -0.6 dB	CG 1 kHz -NIV _{ref}	E F G H 2.4 s

Figure 6.8

Caractéristiques des configurations du test TIMBNV.

$C_{80} = 0$ dB, $NIV = 70$ dB.

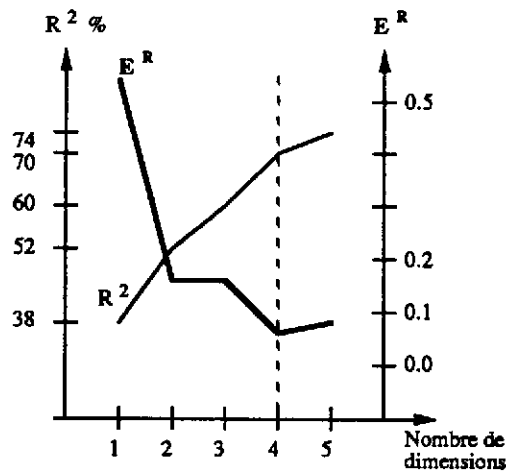


Figure 6.9

Optimisation du nombre de dimensions pour le test TIMBNV.

Les quatre dimensions nécessaires pour analyser ce test ont des pourcentages de variance respectifs de 32%, 15%, 12% et 10%. Les corrélations $S_{u'}$ sont toutes inférieures à 0.86 ce qui a priori fixe les facteurs perceptifs sur les axes de l'analyse.

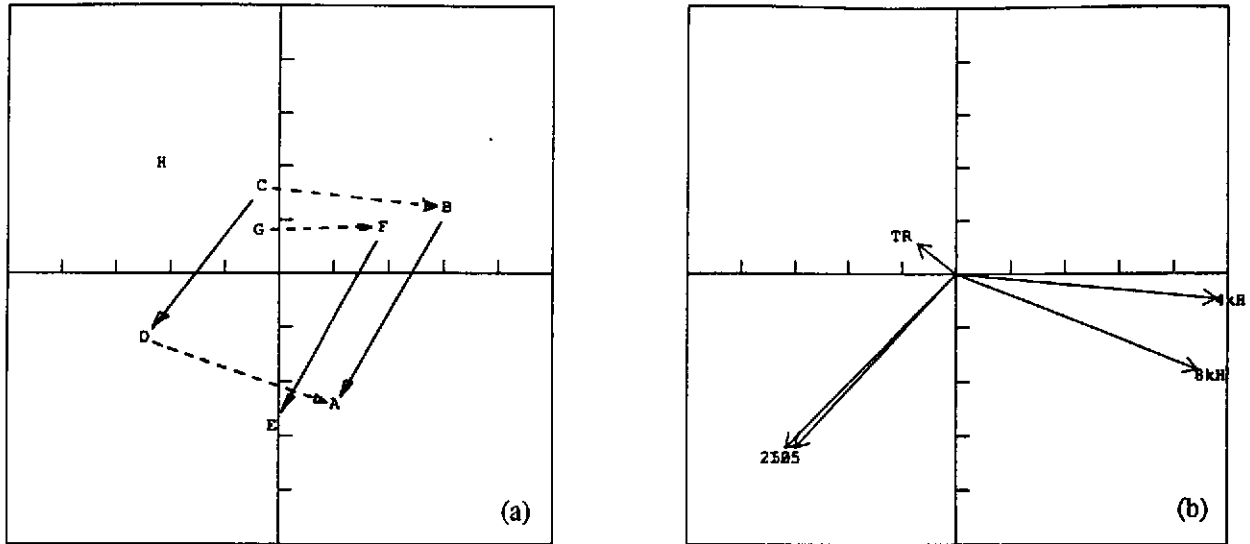


Figure 6.10

Plans 1-2 du test TIMBNV. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

—— variation de niveau dans les graves.
 - - - - variation de niveau dans les aigus.

Les variations de pentes dans les graves schématisées par les segments AB, EF et DC ——— sont parallèles entre elles mais ont systématiquement une composante sur le facteur 1. Ce dernier paraît traduire les variations de niveau dans les aigus représentées par les couples AD, FG et BC - - - . On remarque bien sûr que la configuration H échappe à la logique de ce plan. L'inclinaison des premiers segments peut s'expliquer par le fait que la variation du niveau dans les graves s'accompagne d'une variation dans les aigus de plus de 1 dB par octave afin de respecter un niveau global perçu constant. Cela voudrait donc dire que nous sommes sensibles aux variations simultanées des niveaux eux-mêmes plutôt qu'aux variations de pente dans les graves ou les aigus. Cette inclinaison n'est pas aussi systématique pour les segments AD, FG et BC car la variation induite dans les graves est inférieure à 0.6 dB par octave. La position de la configuration H est plus facile à interpréter dans le plan 2-3 (figure 6.11).

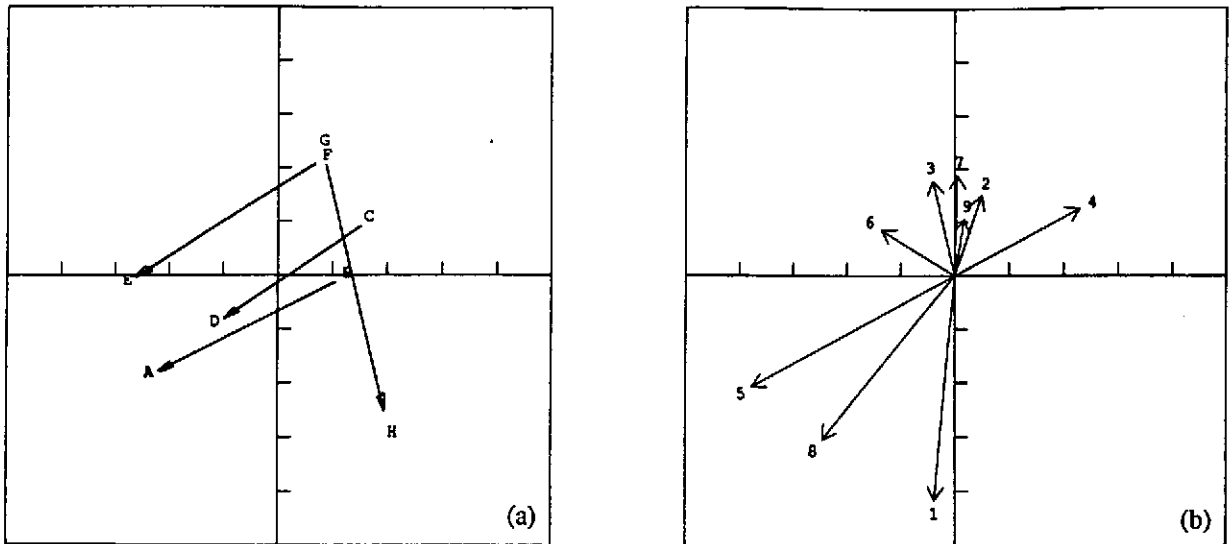


Figure 6.11

Plans 2-3 du test TIMBNV. a: Plan stimuli. b: Plan préférences.

— variation de niveau dans les graves.

Dans ce plan, les segments AB, EF et DC sont encore parallèles mais le couple GH, mal projeté dans le plan précédent, est ici projeté sur le facteur 3. H est une configuration où les graves sont prédominants et où le temps de réverbération est important. C'est donc une configuration extrême qui de plus est à l'opposé des vecteurs préférences. Le facteur perceptif introduit pour cette unique configuration peut être simplement dû au fait que H a été jugée comme étant loin perceptivement de toutes les autres configurations. Ce facteur permet ici de cerner la limite des critères à ne pas dépasser pour rester dans une zone de coloration non excessive.

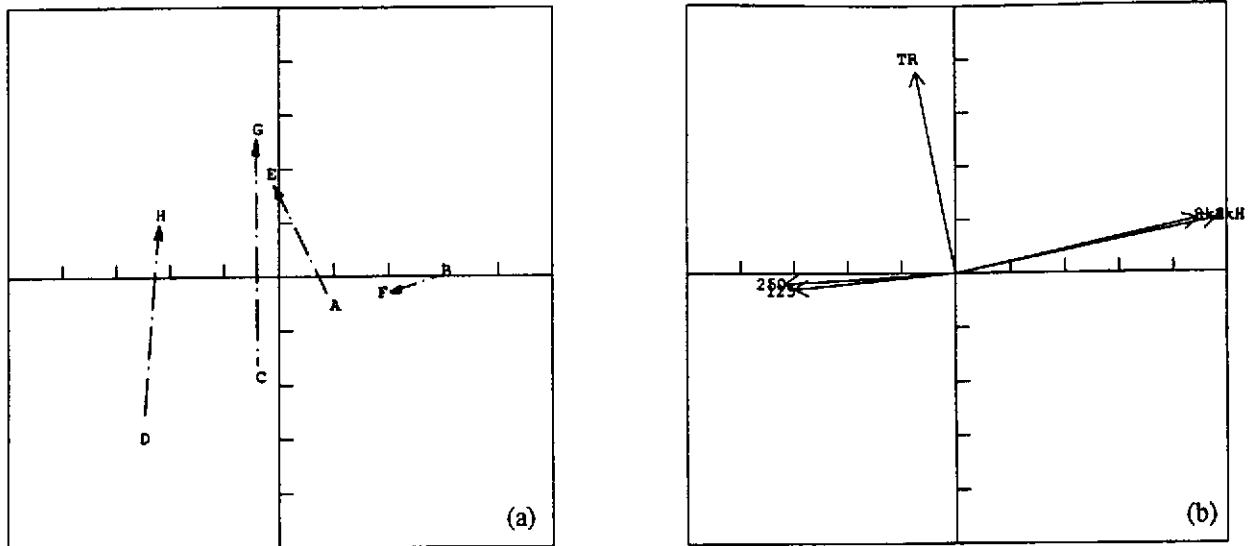


Figure 6.12

Plans 1-4 du test TIMBNV. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

--- variation de temps de réverbération.

Ce dernier plan montre que le facteur 4 traduit perceptivement les variations de temps de réverbération. Les segments CG et DH sont bien parallèles à ce facteur. Bien que les segments AE et surtout BF le soient moins, le critère *TR* est corrélé à 76% avec ce dernier facteur. La substitution étonnante du couple BF sur le facteur 1 peut être due au fait que ces deux configurations sont assez peu "naturelles" et qu'elles ont été mal perçues par les sujets. L'indépendance du quatrième facteur par rapport aux autres facteurs de coloration est estimée par des corrélations avec ces derniers, toutes inférieures à 16%. Cette valeur est significative car le critère *TR* a été construit objectivement comme décorrélé des autres critères.

6.2.2 Coloration due aux valeurs de temps de réverbération par octave

Ce test TIMBTR est construit exactement sur le même modèle que le précédent, mais ce sont les valeurs du critère TR qui varient. La valeur de TR à 1 kHz sert toujours de pivot mais ici, elle peut rester effectivement constante car le niveau global n'y est pas aussi sensible que précédemment. Quatre configurations ont un TR à 1 kHz égal à 1.5 s, quatre autres ont un TR égal à 2.5 s à 1 kHz.

	$TR_{8\text{ kHz}} = TR_{1\text{ kHz}}$	$TR_{8\text{ kHz}} = TR_{1\text{ kHz}} + 1.5$	$TR_{1\text{ kHz}}$	
$TR_{63\text{ Hz}} = 2 \times TR_{1\text{ kHz}}$	AE 1 kHz	DH 1 kHz	AB CD	2.5 s
$TR_{63\text{ Hz}} = TR_{1\text{ kHz}} + 1.5$	BF 1 kHz	CG 1 kHz	EF GH	1.5 s

Figure 6.13

Caractéristiques des configurations du test TIMBTR.

$NIV = 70\text{ dB}$, $C 80 = 0\text{ dB}$ à 1000 Hz.

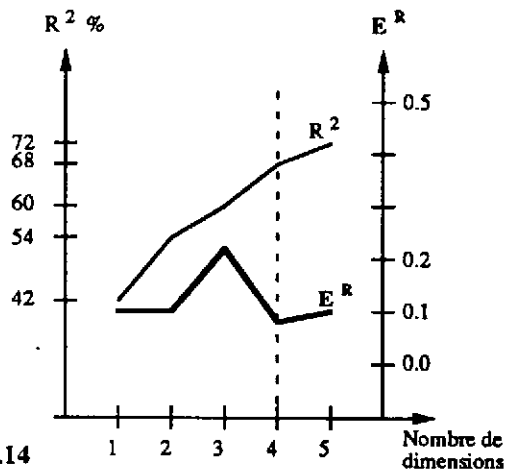


Figure 6.14

Optimisation du nombre de dimensions pour le test TIMBTR.

Les configurations AE, BF, CG et DH sont tout simplement traduites globalement en temps de réverbération. Ce test nécessite toujours quatre dimensions qui expliquent respectivement 26%, 18%, 15%, 10%. Les axes semblent correspondre aux facteurs perceptifs car toutes les corrélations sur les poids des sujets sont inférieures à 0.83, valeur inférieure à 0.90.

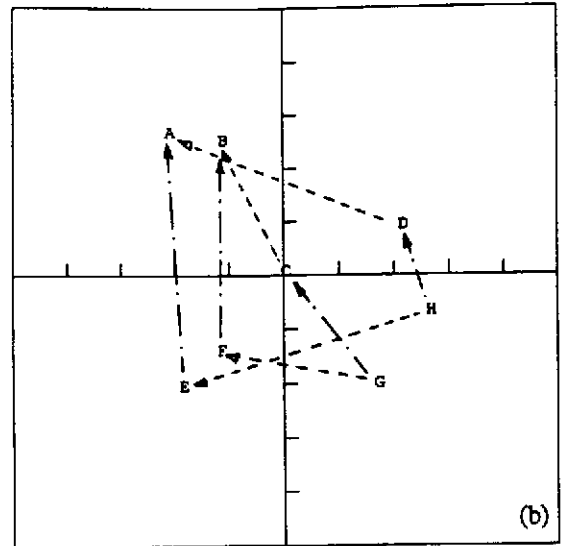
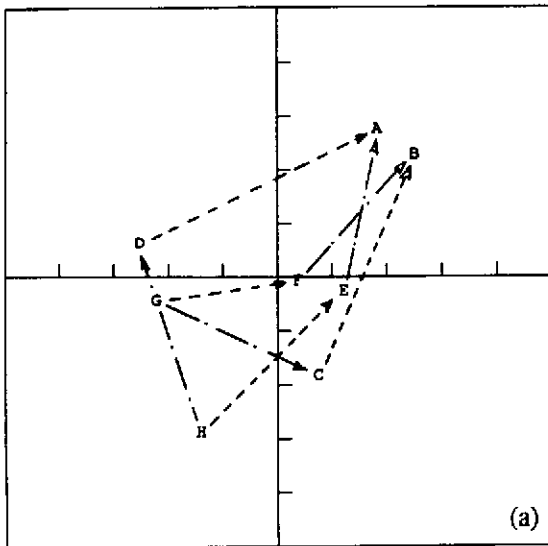


Figure 6.15

Plans 1-2 stimuli du test TIMBTR. a: Analyse avec tous les sujets. b: Analyse avec des sujets sélectionnés.

— · — variation du critère *TR* par translation.

---- variation du critère *TR* dans les aigus.

Le plan solution de l'analyse globale avec tous les sujets (figure 6.15 a) montre la confusion perceptive entre les variations de temps de réverbération *TR* et les variations de ce même critère uniquement dans les fréquences aigües. Une sous-analyse centrée sur des sujets expérimentés a permis de clarifier ce plan où le facteur 1 correspondrait plutôt aux variations du critère *TR* dans les aigus tandis que le facteur 2 correspondrait aux translations des courbes de *TR* (figure 6.15 b). Pour cette sous-analyse, les segments représentant ces variations s'orthogonalisent un peu mieux que dans l'analyse globale. Dans le plan 1-2 de cette analyse globale, les segments représentant les variations de temps de réverbération dans les aigus ---- ont une composante non négligeable sur le facteur 2. Les couples GC et GF puis FB et CB sont même presque colinéaires. Cela voudrait dire que pour la plupart des auditeurs, ces variations de *TR* dans les aigus sont senties à la fois sur le facteur de coloration correspondant et sur le facteur de réverbérance correspondant au critère global *TR*.

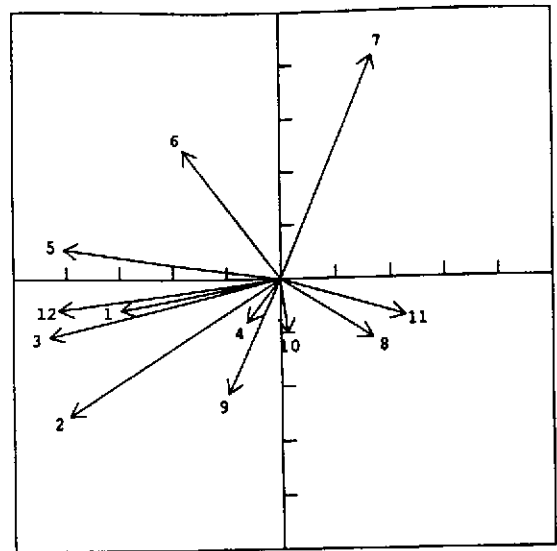
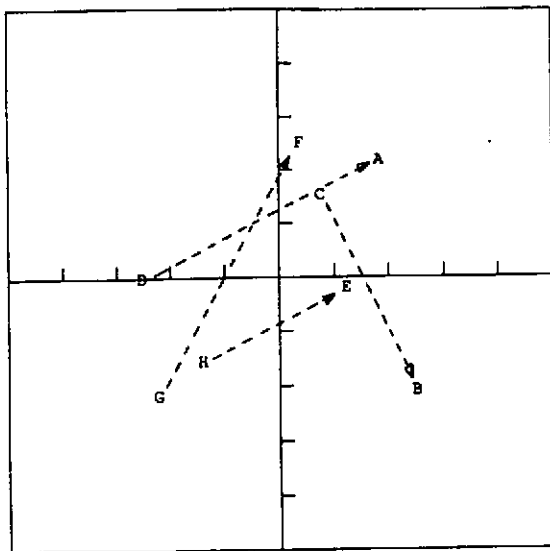


Figure 6.16
Plans 1-3 du test TIMBTR. a: Plan stimuli. b: Plan préférences.
- - - - variation du critère *TR* dans les aigus.

On retrouve ici (figure 6.16 a) la même structure que le plan 2-3 du test précédent (figure 6.11 a). Ici, ce plan traduit perceptivement les variations du critère *TR* dans les aigus et la configuration B, à l'opposé des vecteurs préférences (sauf pour les sujets 8 et 11 qui ont un vecteur préférence mal projeté dans ce plan), correspond à un excès d'aigus. On pourrait penser que ces deux sujets ont des problèmes d'audition dans les aigus, mais ce sont tous deux des acousticiens qui travaillent à l'IRCAM et qui, après les avoir interrogés, ne semblent pas avoir de problèmes connus dans ce domaine.

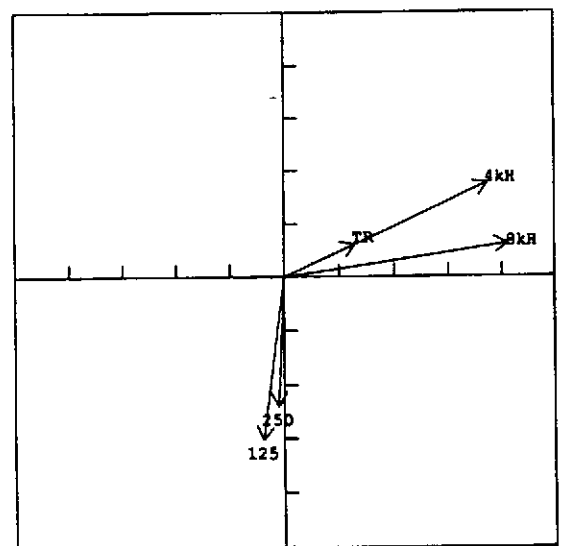
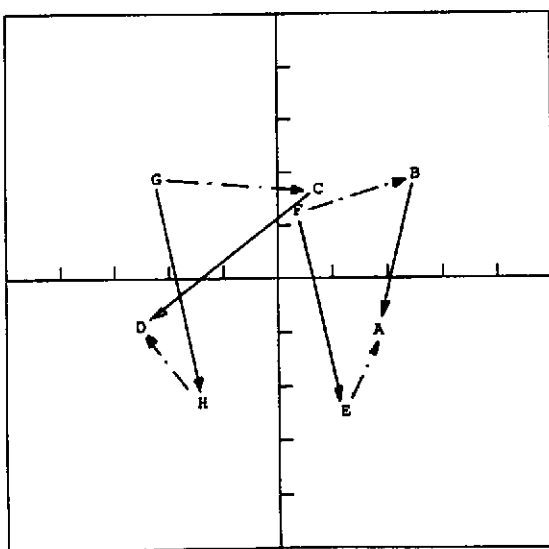


Figure 6.17
Plans 1-4 du test TIMBTR. a: Plan stimuli. b: Plan critères.
- - - - variation du critère *TR* par translation.
— — — variation du critère *TR* dans les graves.

Le dernier facteur semble être corrélé au critère TR dans les graves ($Cor_{TR_{graves}4} = 0.6$). La configuration D est perçue comme une augmentation de TR dans les graves par rapport à la configuration C, mais aussi comme une diminution de temps de réverbération dans les aigus, alors que cet effet n'est pas observé pour les autres couples. Cela est peut être dû au fait que la configuration D a un temps de réverbération excessif dans les graves et que cela masque les aigus.

On voit sur le plan 1-4 (figure 6.17) que les variations de temps de réverbération par translation ne sont pratiquement pas perçues sur le facteur 4 qui correspond aux variations dans les graves, comme cela s'était produit pour les variations dans les aigus. La dépendance perceptive entre les variations de temps de réverbération par translation et les variations dans les aigus semble beaucoup plus importante qu'entre ces mêmes variations par translation et les variations dans les graves. Cela peut se quantifier en comparant les valeurs des corrélations S_{21}^* et S_{24}^* qui valent respectivement 0.50 et 0.18.

6.2.3 Ecoute et nomination des facteurs de coloration

Les termes proposés pour ces effets de coloration sont très sujets aux différences d'appréciation sémantique. Aussi, ils ne correspondent qu'à des propositions de description que seuls les participants à l'expérience peuvent réellement comprendre. Pour que tout le monde s'entende sur le sens de ces mots, il faudrait pouvoir écouter l'effet perçu sur un facteur et l'associer au terme descriptif proposé. Cela correspondrait à une phase d'apprentissage indispensable à la compréhension de ces facteurs perceptifs. Le tableau suivant propose les adjectifs qualificatifs des salles plus ou moins colorées par les influences des fréquences et les influences des premières réflexions.

termes descriptifs	critères objectifs
<i>plat contrasté</i>	Dir/REF
<i>coulant heurté</i>	Tcp
<i>dur doux</i>	ETA
<i>neutre intime - pateux *</i>	LogTR125 Hz 250 Hz
<i>sec vivant - acide **</i>	LogTR 4 kHz 8 kHz
<i>creux chaud - lourd **</i>	NIV 125 Hz 250 Hz
<i>pauvre brillant - acide *</i>	NIV 4 kHz 8 kHz

Tableau 6.4

Nomination des facteurs perceptifs qui structurent la perception des effets de coloration dans les salles. Les termes décrivent une augmentation des critères objectifs correspondants.

* terme simplement proposé à l'écoute pour une valeur excessive du critère.

** terme décrivant une valeur excessive traduite dans les tests par un facteur perceptif spécifique.

7. EFFETS DE SPATIALISATION

Les tests passés dans la chambre sourde ont permis, outre de valider des critères déjà existants, de définir l'influence de la direction d'arrivée de l'énergie sur certains autres critères, comme nous l'avons déjà vu pour les premières réflexions intervenant dans les effets de coloration. Le schéma du montage du système de reproduction des champs sonores, est rappelé ici.

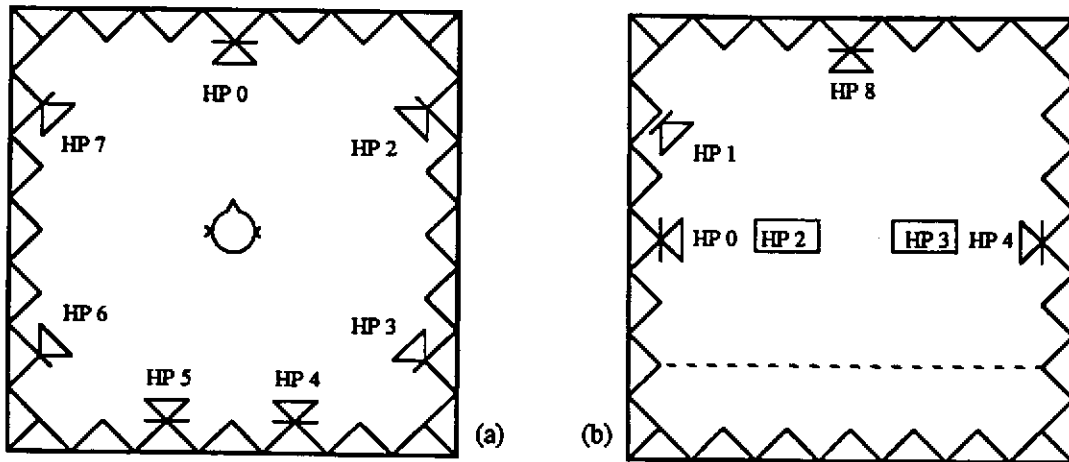


Figure 2.1

Système de haut-parleurs installé dans la chambre sourde. a: Coupe horizontale.
b: Coupe verticale.

Haut-parleur	Azimut $ \alpha $	Élévation β
HP0	0°	0°
HP1	0°	30°
HP2	50°	0°
HP3	130°	0°
HP4	155°	0°
HP5	155°	0°
HP6	130°	0°
HP7	50°	0°
HP8	0°	90°

Tableau 2.1

Azimuts et élévations des haut-parleurs installés dans la chambre sourde.

7.1 SPACE1

Nous avons déjà étudié ce test au paragraphe 5.5.1. Nous avons alors avancé que le troisième facteur était dû à un effet de spatialisation. En effet, ce facteur est corrélé à 77% avec le critère de fraction d'énergie latérale L_f . Nous verrons dans la suite que ce critère est toujours bien corrélé à l'un des facteurs perceptifs.

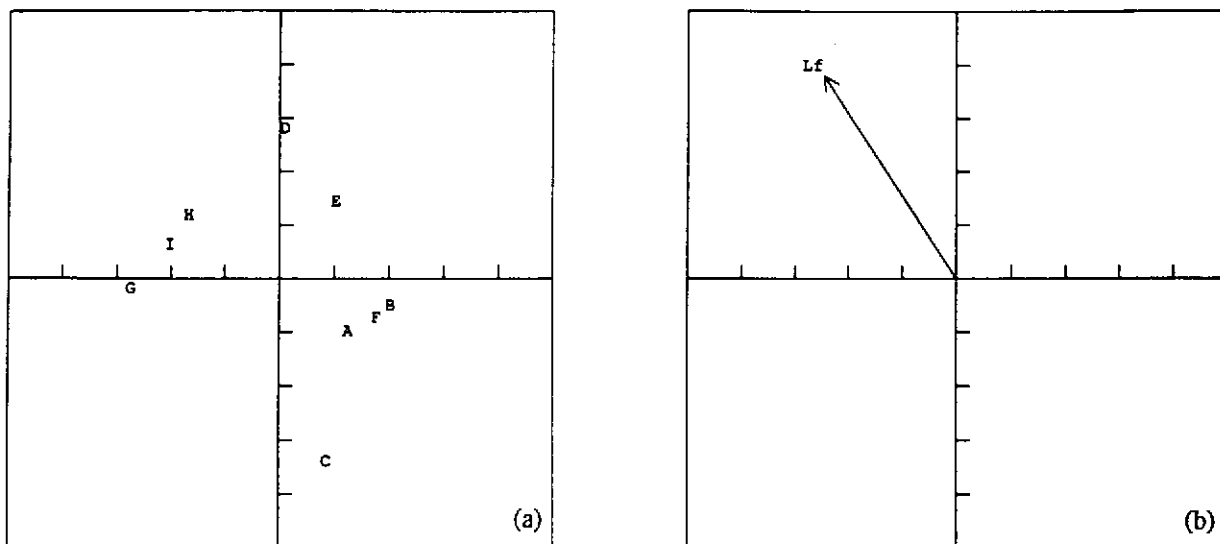


Figure 7.1

Plans 1-3 du test SPACE1. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

7.2 SPACE2

Ce test a été construit afin d'étudier principalement les effets perceptifs dus à la direction d'arrivée de l'énergie dans les 80 premières millisecondes. Ces réflexions sont étalées dans le temps et diffusées pour chaque configuration sur deux ou trois haut-parleurs. Trois valeurs de clarté C_{80} ont été réglées pour des champs acoustiques où les directions des réflexions devant-côté (HP1 et HP2), côté-côté (HP2 et HP3) et côté-derrrière (HP3 et HP4-5) ont été testées. Ces configurations créent donc des champs dissymétriques afin de simuler une place quelconque dans la salle. L'onde directe est gardée constante tout au long du test.

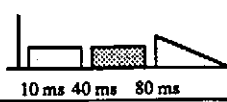






 10 ms 40 ms 80 ms	C80		
	-3 dB	0 dB	+3 dB
 HP 1  HP 2	(A)	(B)	(C)
 HP 2  HP 3	(D)	(E)	(F)
 HP 3  HP 4-5	(G)	(H)	(I)

Figure 7.2
 Caractéristiques objectives des configurations du test SPACE2.
 NIV = 70 dB, TR = 1.6 s.

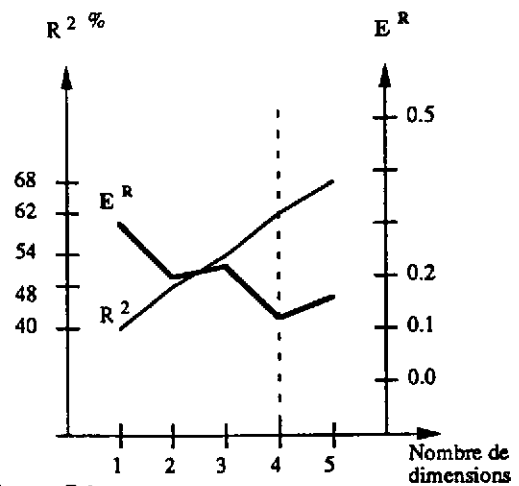


Figure 7.3
 Optimisation du nombre de dimensions pour le test SPACE2.

Cette analyse a donc été faite en quatre dimensions de pourcentages de variance respectifs 35%, 11%, 8% et 8%. Toutes les corrélations entre les poids des différents sujets sur les axes sont inférieures à 0.78 ce qui ne permet pas de rotation des facteurs.

Les facteurs 1 et 4 traduisent les effets purement temporels tandis que les facteurs 2 et 3 traduisent les effets de spatialisation.

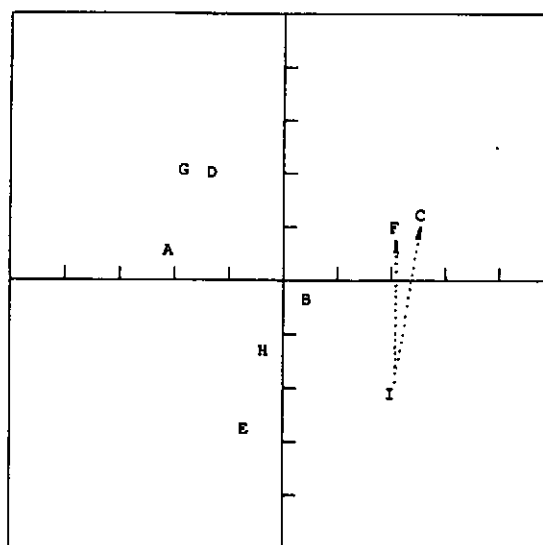


Figure 7.4
 Plan 1-4 stimuli du test SPACE2.
 variation du critère ZDIR pour une clarté de +3 dB.

La clarté C 80 est corrélée à 97% avec le facteur 1 et la direction des réflexions ne semble pas influencer sur ce facteur. Les tests précédents ayant montré qu'à partir d'une clarté C 80 de 0 dB, le niveau de l'onde directe commence à être perçu, on peut supposer que ce facteur 4 est celui que nous avons déjà appelé *lointain - proche*. L'écoute des configurations a confirmé cette supposition et a permis d'expliquer la différence entre les configurations CF et I sur ce facteur. Lorsque des premières réflexions sont très peu retardées par rapport à l'onde directe et proviennent d'une direction proche de celle-ci, l'énergie intervenant dans l'effet de rapprochement est la somme de l'onde directe pure et de ces premières réflexions proches en temps et en espace.

Si l'on appelle zone directe *ZDIR* cette énergie d'onde directe étendue, ce nouveau critère peut être calculé de la façon suivante:

$$ZDIR = 10 \log \int_{0 \text{ ms}}^{40 \text{ ms}} \frac{h_{c_{av}}^2(t) \cdot dt}{P_{ref}^2}$$

$h_{c_{av}}(t)$ est la réponse impulsionnelle mesurée avec un micro cardioïde orienté vers l'avant.

Cette pondération est bien sûr arbitraire et des tests purement psychoacoustiques devraient être passés pour définir quelles sont les réflexions à prendre réellement en compte pour les critères *REF* et *ZDIR*.

La configuration I possède des premières réflexions venant d'une direction opposée à l'onde directe. Celles-ci ne s'additionnent pas avec l'onde directe pure qui reste constante. Par contre, les configurations C et F ont des premières réflexions qui arrivent dans un délai inférieur à 40 ms et qui sont diffusées dans les haut-parleurs HP1 et HP2. Celles-ci s'additionnent donc à l'onde directe pour former le critère *ZDIR* qui semble traduire la perception de l'effet de rapprochement (facteur 4 ici) pour des clartés supérieures à 0 dB. Les tests suivants conforteront la validité de ce calcul.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I
ZDIR	63.5 dB	64.5 dB	65.5 dB	64.0 dB	64.5 dB	65.0 dB	64.0 dB	64.0 dB	63.5 dB
ANG	5°	8°	14°	7°	12°	25°	0°	0°	0°

Tableau 7.1

Valeurs du critère *ZDIR* et *ANG* pour les configurations du test SPACE2.

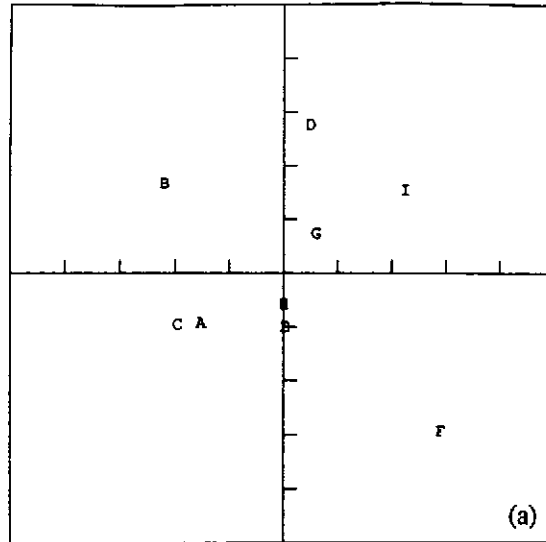


Figure 7.5

Plans 2-3 du test SPACE2. a: Plan stimuli.

Sur une extrémité du facteur 2 sont regroupées les configurations A, B et C dont l'énergie dans les 80 premières millisecondes est assez frontale. Ce facteur traduit donc un effet de répartition dans l'espace. Le critère de fraction d'énergie latérale L_f a donc été projeté dans ce plan et est corrélé à 82% avec le facteur 2. Ce facteur traduit bien l'impression ressentie par les auditeurs d'être entourés par la musique. Lorsque les réflexions viennent uniquement de l'avant, les auditeurs semblent être en dehors de la musique. Il est classique d'appeler ce facteur *impression d'espace*.

Le facteur 3 est difficile à interpréter. L'écoute a posteriori des configurations a montré l'importance de la perception de la largeur de la source surtout avec le couple FI. Or l'énergie associée à cette source est effectivement bien perçue lorsque la clarté C_{80} devient supérieure à 0 dB, c'est à dire lorsque le critère $ZDIR$ prend de l'importance. La configuration F simule une source étendue car les premières réflexions frontales retardées de moins de 40 ms, réflexions qui sont donc associées à la source, proviennent du haut-parleur HP2 séparé de la source d'un angle de 50° . La configuration I, pour les mêmes raisons que précédemment simule une source très ponctuelle. Un nouveau calcul de critère appelé ANG permet de traduire ce troisième facteur perceptif. Il correspond simplement à un barycentre en angle de l'énergie associée à la source, c'est à dire de l'énergie intervenant dans le critère $ZDIR$. On limite tout de même ce calcul à l'énergie arrivant dans un angle maximum de 90° par rapport à la source. Cette limite arbitraire ici, demande bien sûr à être précisée. Le critère ANG est ici corrélé à 65% avec le facteur 3 (tableau 7.1).

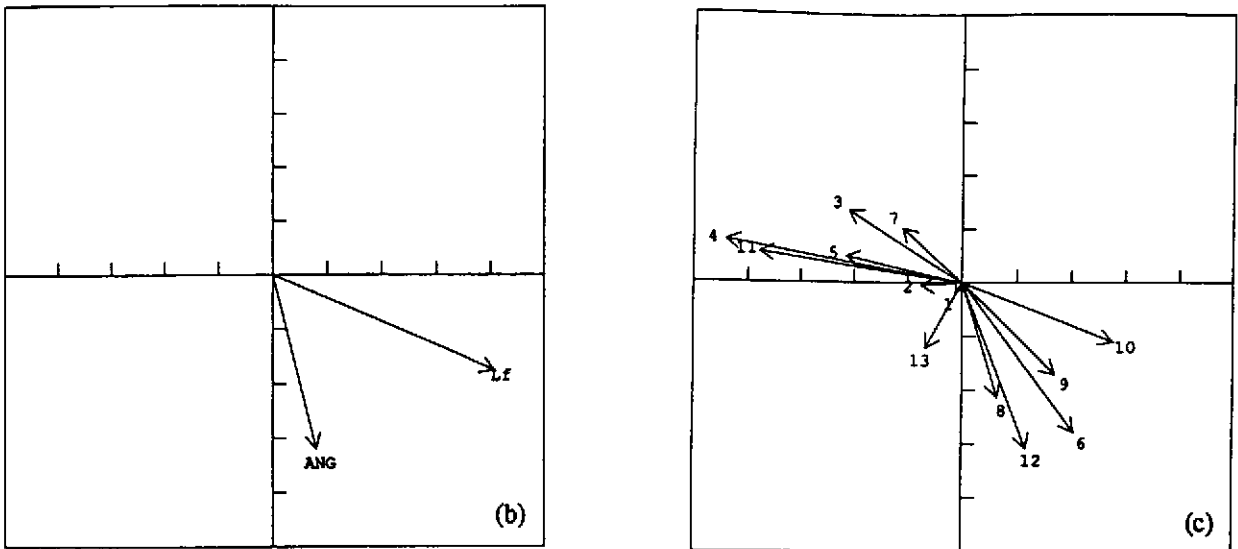


Figure 7.5
Plans 2-3 du test SPACE2. b: Plan critères. c: Plan préférences.

On peut ici ajouter une remarque sur les préférences. Deux groupes de personnes peuvent être "séparés", les uns préférant que la musique provienne de devant, les autres s'intéressant plutôt à l'étendue de la source. Il est un peu étonnant de ne pas trouver de consensus sur ce facteur d'impression d'espace et d'avoir plus de la moitié des sujets qui préfère plutôt une direction frontale des premières réflexions.

7.3 SPACE3

Nous avons déjà présenté ce test lors de l'étude de la coloration due aux premières réflexions au paragraphe 6.1.2. Nous avons alors interprété le plan solution 2-5, reste donc maintenant à analyser les trois autres facteurs. Aucune rotation ne peut être envisagée ici car toutes les corrélations $S_{i'}$ sont inférieures à 0.70.

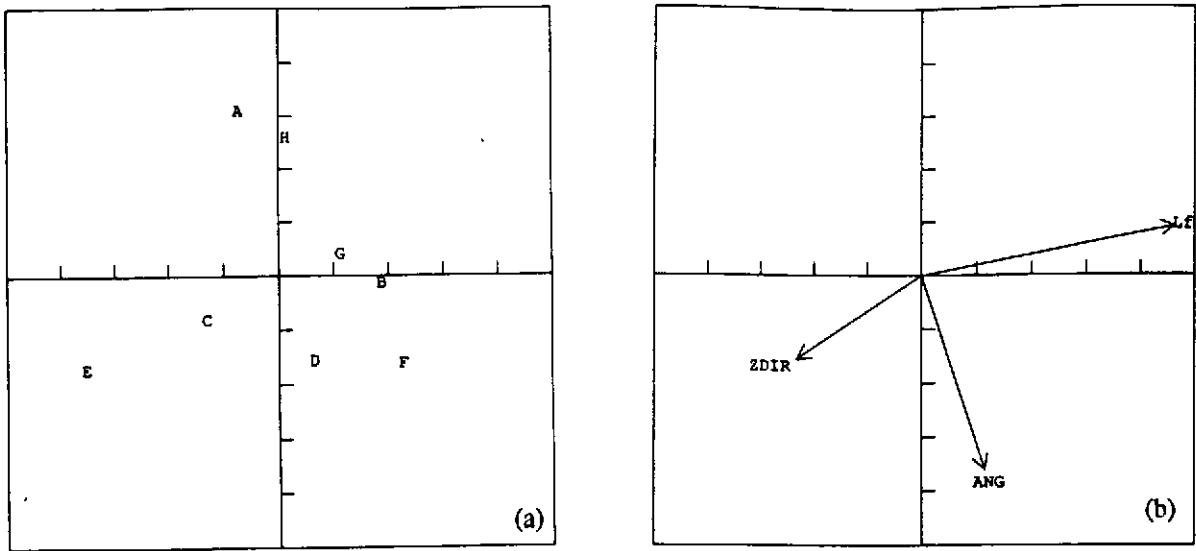


Figure 7.6
Plans 1-3 du test SPACE3. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

Nous voyons sur le plan 1-3 que le facteur 1 est corrélé à 92% avec le critère de fraction d'énergie latérale L_f tandis que la facteur 3 est corrélé à 74% avec le critère de largeur de la source ANG .

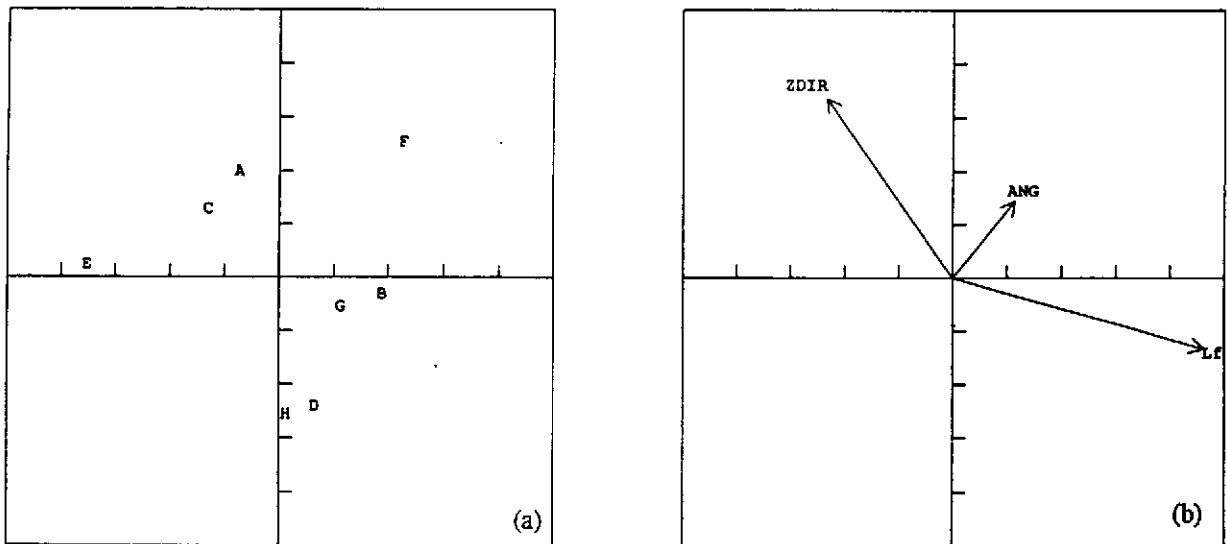


Figure 7.7
Plans 1-4 du test SPACE3. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

La projection des critères objectifs dans ce plan montre que le quatrième facteur est corrélé à 81% avec le critère $ZDIR$. Ce test donc confirme la validité des critères $ZDIR$ et ANG introduits par les tests précédents.

7.4 SPACE4

Un dernier test a voulu préciser l'influence du niveau sonore sur le facteur d'impression d'espace. Neuf configurations jouant sur le niveau et sur les directions des premières réflexions ont donc été construites. Les premières réflexions des configurations A, B, C, D et E sont diffusées sur les haut-parleurs HP1 et HP2, celles des configurations F et H sur les haut-parleurs HP2 et HP3 et celles des configurations G et I viennent de l'arrière sur les haut-parleurs HP3 et HP4-5. Pour vérifier le fait que le critère H distance de réverbération, n'est pas un facteur perceptif, trois configurations où seul H varie ont été introduites dans ce test. Ces variations correspondent à des variations de niveau d'onde directe pour les configurations A, B et C (respectivement 61 dB, 63 dB et 65 dB) alors que toutes les autres configurations ont un niveau d'onde directe de 63 dB.

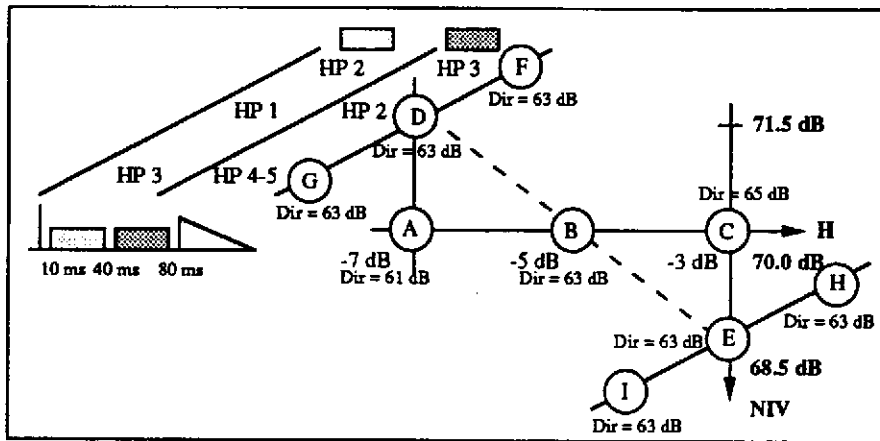


Figure 7.8
Caractéristiques des configurations du test SPACE4.
 $C_{80} = 0$ dB, $TR = 1.6$ s.

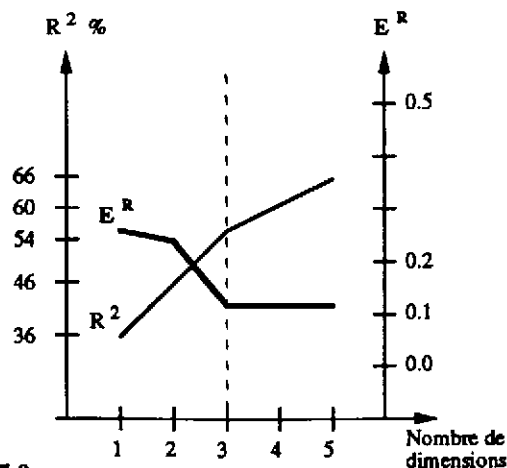


Figure 7.9
Optimisation du nombre de dimensions pour le test SPACE4.

Le nombre de dimensions optimal semble donc égal à trois. Les pourcentages respectifs de variance des axes sont de 26%, 18% et 10%. Tous les S_{if} sont inférieurs à 0.81, ce qui ne permet pas d'envisager une rotation des facteurs.

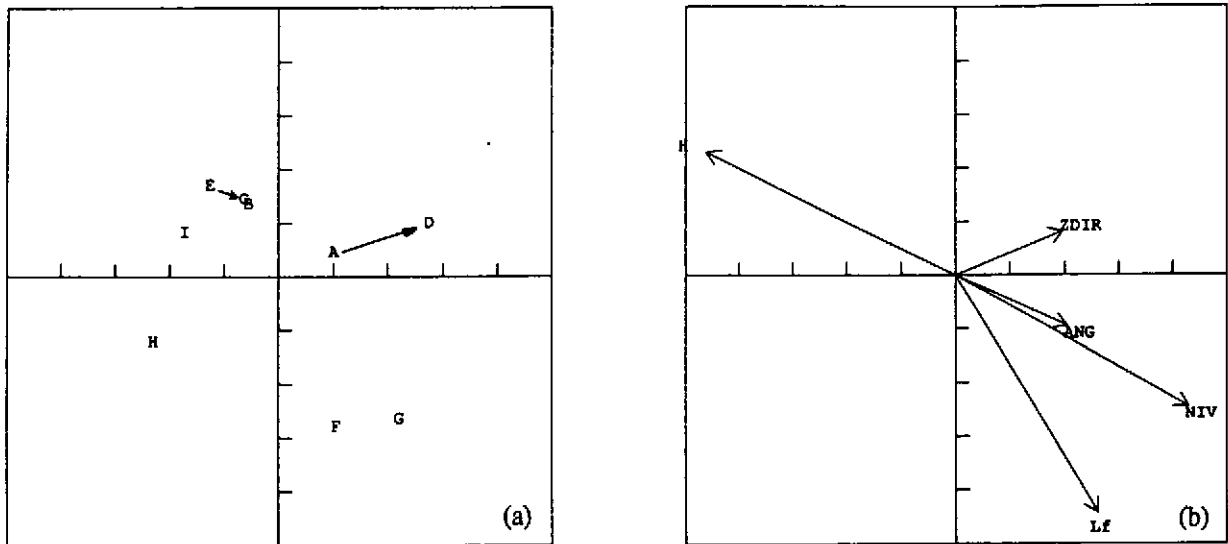


Figure 7.10

Plan 1-2 du test SPACE4. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

— variation de niveau.

Le critère Lf est corrélé à 88% avec le facteur 2 (figure 7.10). Ce facteur est donc celui qui traduit perceptivement l'impression d'espace. Le facteur 1, à l'écoute, est généralement identifié comme un facteur de niveau. De plus les couples EC et AD où seul le niveau varie sont parallèles à ce premier facteur. Nous avons donc décidé de ne pas retenir le critère H dans l'ensemble des critères corrélés aux facteurs perceptifs. Quelques effets de substitution s'observent. Les variations du critère H sont senties sur le niveau lorsque les valeurs sont faibles et les couples EH et DF où seuls les critères de spatialisation Lf et ANG varient, ont une composante sur le facteur 1. Il est possible qu'une modification dans la direction d'arrivée des premières réflexions joue sur le niveau sonore, comme elle joue sur le critère $ZDIR$.

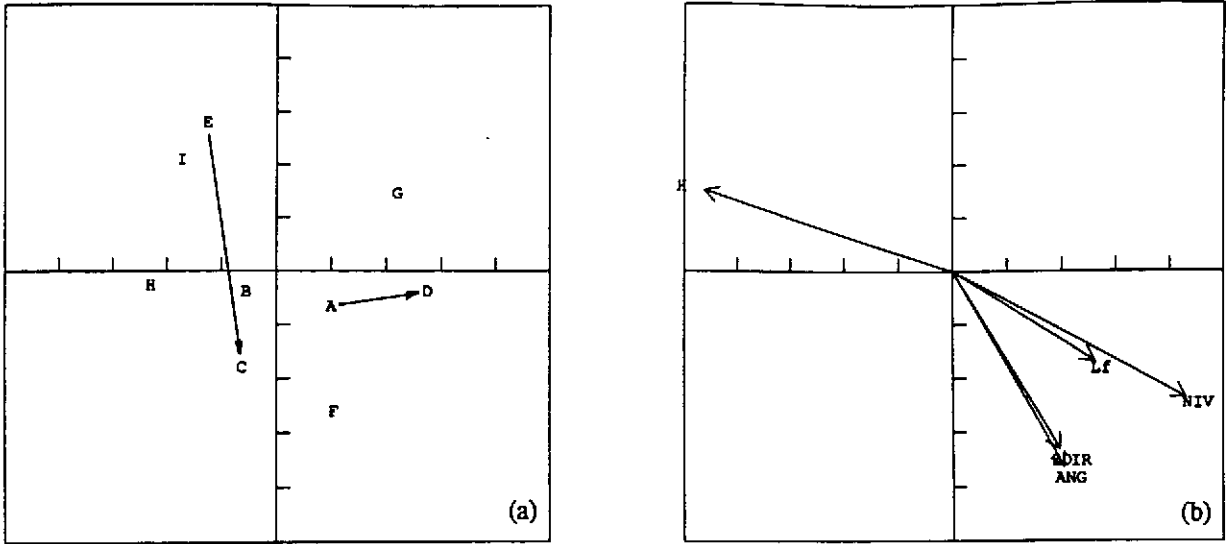


Figure 7.11
 Plan 1-3 du test SPACE4. a: Plan stimuli. b: Plan critères.
 ——— variation de niveau.

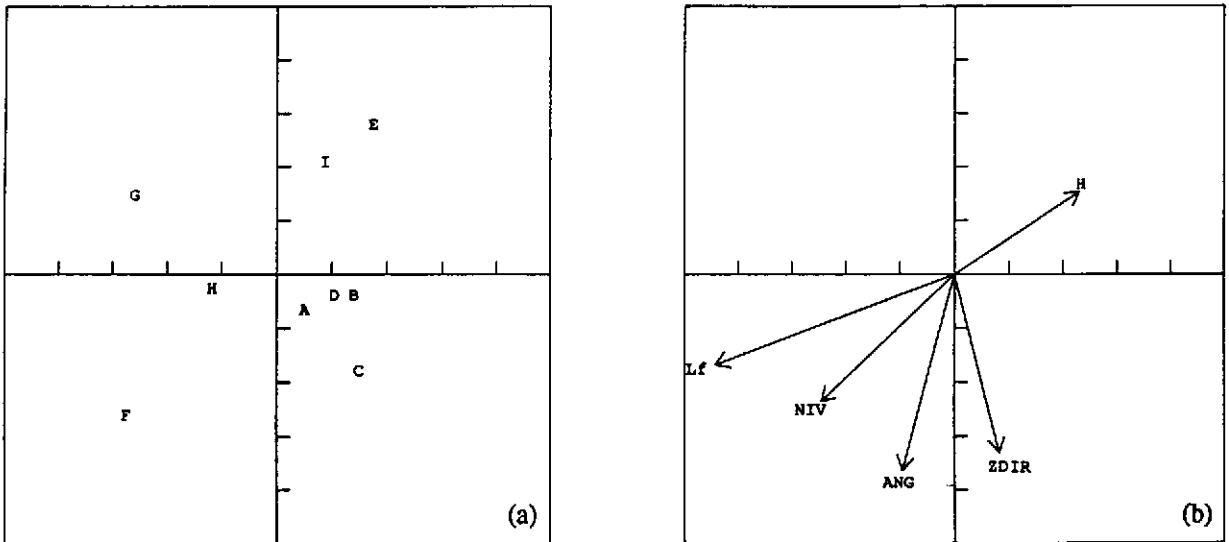


Figure 7.12
 Plan 2-3 du test SPACE4. a: Plan stimuli. b: Plan critères.

Le troisième facteur correspond à la perception de l'émergence de la source, les deux critères *ZDIR* et *ANG* lui sont corrélés à 75% en moyenne. On remarque sur le plan 1-3 que les variations de niveau représentées par les segments *EC* et *AD* sont perçues sur deux facteurs. Le couple *EC* est à la fois perçu comme une augmentation de niveau mais aussi comme une augmentation du niveau de l'onde directe.

En conclusion de tous ces tests de spatialisation, nous pouvons retenir que deux critères purement spatiaux *Lf* et *ANG* traduisent objectivement l'impression d'espace et la perception de la largeur de la source. Le critère *ZDIR* et le calcul des premières réflexions *REF* sont pondérés en espace pour traduire l'effet de rapprochement dû à l'émergence de la source et l'effet de coloration dû aux premières réflexions. La méthode d'analyse est encore riche d'informations. Elle permet de quantifier perceptivement les variations de critères objectifs sur leurs facteurs associés et parfois de résoudre quelques problèmes soulevés dans les analyses. La suite de ce rapport va s'attacher donc à cet autre aspect de l'analyse.

8. ETUDE QUANTITATIVE

Cette méthode d'analyse permet d'associer à chaque couple une distance perceptive. Lorsqu'un seul critère varie pour un couple, on peut facilement établir une correspondance entre variation objective et variation subjective. Mais pour pouvoir effectuer une moyenne sur l'ensemble des tests, il faut s'assurer de pouvoir les comparer.

8.1 Comparaison entre tests

Deux types de comparaison doivent être étudiés. La première consiste à vérifier que les valeurs des critères mesurées dans la chambre sourde sont équivalentes à celles mesurées sur les configurations écoutées au casque. Nous avons déjà soulevé ce problème lors de la comparaison des valeurs de niveau à la fin du paragraphe 4.3. La seconde consiste à vérifier que deux couples équivalents quant à leurs valeurs de critères objectifs sont estimés par des distances perceptives équivalentes, quelque soit le test auquel ils appartiennent.

8.1.1 Comparaison entre chambre sourde et casque

Le principe de cette comparaison a été de régler deux configurations perceptivement identiques, l'une écoutée dans la chambre sourde et l'autre écoutée au casque et de vérifier si les critères mesurés étaient équivalents dans les deux cas.

Un sujet assis dans la chambre sourde réglait le système électroacoustique ou le réverbérateur YAMAHA afin d'obtenir les mêmes effets perceptifs que la configuration soit écoutée au casque ou par le système de reproduction.

1^{ère} phase:

Ce réglage a d'abord consisté à régler à l'oreille le même niveau de réverbération tardive sur le réverbérateur et dans la chambre sourde. Il faut rappeler ici que la réverbération tardive dans la chambre sourde est créée par le même réverbérateur que celui utilisé pour l'écoute au casque. Ce réglage a donc uniquement consisté à régler les niveaux des haut-parleurs dans la chambre sourde.

2^{ème} phase:

La deuxième phase a consisté à régler uniquement dans le chambre sourde, toujours à l'oreille, l'onde directe au même niveau que la réverbération tardive, puis les premières réflexions diffusées sur trois haut-parleurs frontaux HP1, HP2 et HP7, au même niveau que la réverbération tardive. Les niveaux de ces différentes énergies étaient donc, à l'oreille, équivalents à la fin de ce réglage dans la chambre sourde.

3^{ème} phase:

Cette phase était similaire à celle décrite précédemment, mais les réglages ont été effectués au casque, uniquement sur le réverbérateur.

Les configurations ainsi réglées ont été mesurées sur le réverbérateur et dans la chambre sourde. La mesure dans la chambre sourde correspond parfaitement à la prévision du réglage, c'est à dire que tous les niveaux sont objectivement équivalents. La clarté est ici égale à +3.2 dB. Par contre, la clarté C 80 mesurée pour une configuration écoutée au casque est ici égale à 2.4 dB. L'étude détaillée des niveaux a montré que les premières réflexions réglées sur le réverbérateur étaient inférieures de 1.5 dB à l'onde directe. La différence peut être explicable par l'impression de localisation des premières réflexions. Dans la chambre sourde, les premières réflexions ont été diffusées sur les haut-parleurs HP1, HP2 et HP7, c'est à dire assez frontaux, tandis que la décorrélation des signaux de sortie du réverbérateur pour les premières réflexions crée au casque l'impression que les premières réflexions arrivent séparément, à gauche et à droite, dans l'axe des oreilles.

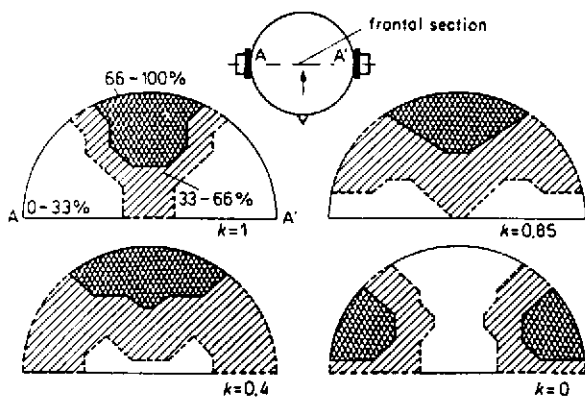


Figure 8.1

Localisation d'un message sonore écouté au casque suivant le degré de cohérence des écouteurs (Chernyak et Dubrovsky d'après Blauert).

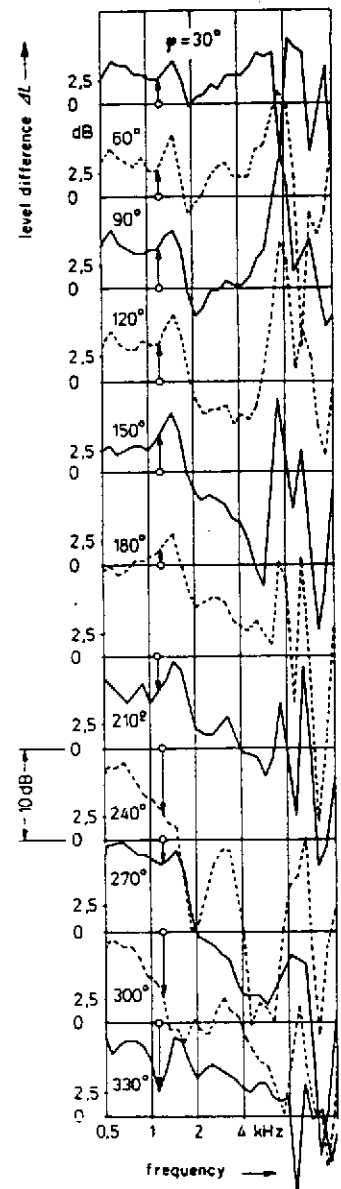


Figure 8.2

Fonctions de transfert relatives à une direction frontale, d'une écoute monorale suivant différentes directions de la source dans un plan horizontal (d'après Blauert).

Les courbes de Blauert [26] montrent que les oreilles ont un maximum de sensibilité lorsque l'angle entre une direction frontale et la direction du son est de 90°. Ces différences de localisation et de sensibilité suffisent peut être à expliquer la différence de niveaux observée pour les premières réflexions dans les deux types d'écoute.

L'énergie totale mesurée dans la chambre sourde ne pose aucune difficulté, elle est tout simplement mesurée au sonomètre, sans pondération. Le critère *NIV* mesuré sur le casque est un niveau équivalent mesuré à l'aide d'une tête artificielle. Lors des réglages des configurations écoutées au casque, une équivalence avait été faite entre le niveau électrique de sortie casque et le niveau sonore perçu par l'auditeur (§ 4.1). L'égalité des mesures des énergies pour les deux configurations réglées au casque et dans la chambre sourde semble ici montrer que l'on peut comparer simplement les niveaux quelques soient les conditions expérimentales. Mais il faut encore rester prudent sur cette conclusion.

Les différences entre les valeurs des critères mesurés dans la chambre sourde et sur le réverbérateur sont de l'ordre du seuil de discrimination de ces critères (§ 8.3), cela permet de comparer les valeurs de ces derniers d'un test à l'autre sans correction.

8.1.2 Comparaison entre tests

L'échelle imposée entre 0 et 10 au cours d'un test va avoir tendance à dilater les dissimilarités lorsque le test est jugé difficile. En effet, si un test présente de configurations assez semblables dans l'ensemble, la moindre différence perceptible se traduira par une grande dissimilarité tandis que cette même différence semblera minime si elle se trouve parmi des configurations extrêmement différentes. Le contexte conditionne donc les données de dissimilarités des tests.

On peut alors se demander si nous n'avons pas tendance à répartir également les faibles et les grandes dissimilarités si bien que la variance totale reste approximativement constante pour des tests ayant le même nombre de configurations. Ces variances moyennes ont été calculées et cette hypothèse n'a pas été vérifiée, les variances allant du simple au double.

Une solution pour comparer les dissimilarités entre différents tests consiste donc à les multiplier par des coefficients afin que des couples identiques ou fortement semblables soient associés aux mêmes dissimilarités. Même si cette solution ne s'appuie pas sur la théorie, elle permet d'obtenir des résultats intéressants. Elle permet surtout d'estimer des distances perceptives moyennes qui quantifient dans le domaine subjectif les variations des critères objectifs choisis.

8.2 Calculs des coefficients et quantification des facteurs

Tous ces calculs sont effectués à partir des distances moyennes proposées par la méthode INDSCAL \bar{d}_{jk} afin de respecter le modèle analysé (§ 3.2.1).

8.2.1 Le niveau sonore NIV

Les coefficients ont d'abord été calculés de façon à homogénéiser les distances perceptives dues aux variations de niveau, ce critère étant indépendant des autres. Les coefficients calculés à partir du critère *NIV* ont permis fortuitement d'homogénéiser aussi les dissimilarités pour les variations d'autres critères comme le temps de réverbération *TR* et la clarté *C 80*. L'étude complète des variations de niveau est présentée ici.

DISTANCES		PERCEPTIVES		ERREURS RELATIVES	
		TEST _{ΔNIV}	TEST _{ΔNIV}	TEST _{ΔNIV}	
TR	C80	NIV1 66 → 70 dB	NIV1 70 → 74 dB	NIV1 66 → 74 dB	
1.0 s	0 dB	180 0.10	188 0.12	362 0.06	
1.6 s	0 dB	251 0.07	232 0.09	460 0.08	
2.3 s	0 dB	325 0.06	179 0.13	503 0.03	
TR	C40	NIV2 66 → 69 dB	NIV2 69 → 72 dB	NIV2 66 → 72 dB	
0.3 s	8 dB	81 0.54	186 0.20	260 0.30	
0.5 s	3 dB	213 0.10	73 0.76	265 0.18	
1.0 s	0 dB	204 0.30	165 0.30	354 0.08	
TR	C80	NIV3 MATUZ 66 → 70 dB	NIV3 BRYN 66 → 70 dB	-	
1.0 s	-1 dB	326 0.20	215 0.30	-	
1.0 s	-5 dB	351 0.20	244 0.20	-	
2.5 s	-1 dB	345 0.16	269 0.40	-	
2.5 s	-5 dB	404 0.10	244 0.10	-	
TR	C80	NIV4 MATUZ 60 → 64 dB	NIV4 MATUZ 64 → 68 dB	NIV4 MATUZ 60 → 68 dB	
1.8 s	-5 dB	248 0.09	344 0.08	516 0.04	
TR	C80	NIV4 BRYN 60 → 64 dB	NIV4 BRYN 64 → 68 dB	NIV4 BRYN 60 → 68 dB	
1.8 s	-5 dB	221 0.30	276 0.20	495 0.10	
TR	C80	CLAR1 62 → 66 dB	-	-	
1.5 s	0 dB	359 0.08	-	-	
1.5 s	3 dB	366 0.16	-	-	

Tableau 8.1

Distances perceptives et erreurs correspondantes pour l'ensemble des couples où seul le critère *NIV* varie.

Pour avoir une estimation de la validité des dissimilarités données par les analyses, nous pouvons utiliser les calculs de stabilité effectués au cours du jackknife (§ 3.2.2). Si l'erreur σ_{jk}^R pour un couple est supérieure à 40%, la distance perceptive n'est pas alors prise en compte.

Pour les tests NIV3 MATUZ et NIV4 MATUZ, une variation de 4 dB est perçue par une distance perceptive de 350 unités en moyenne. Ils sont donc comparables tels quels. Les tests passés sur le message sonore chanté par Phillis Bryn Julson ont des dissimilarités systématiquement plus faibles que les mêmes tests passés sur l'extrait de flûte. Nous avons déjà vu au paragraphe 4.4.1 que le niveau sonore était bien moins stable dans le premier cas. Cela explique ces différences de dissimilarités d'autant plus que les variations du critère TR sont perçues par les mêmes distances perceptives.

DISTANCES PERCEPTIVES		ERREURS RELATIVES		
		TEST ΔTR	TEST ΔTR	TEST ΔTR
NIV	C80	NIV1 1.1 → 1.7 s	NIV1 1.7 → 2.5 s	NIV1 1.1 → 2.5 s
66 dB	0 dB	205 0.13	267 0.09	468 0.05
70 dB	0 dB	287 0.09	156 0.25	428 0.07
74 dB	0 dB	290 0.09	200 0.07	490 0.03
		NIV3 MATUZ 1 → 2.5 s	NIV3 BRYN 1 → 2.5 s	-
66 dB	-1 dB	531 0.13	523 0.09	-
70 dB	-1 dB	490 0.02	587 0.03	-
66 dB	-5 dB	540 0.14	643 0.10	-
70 dB	-5 dB	629 0.06	608 0.08	-
		NIV4 MATUZ 1.3 → 1.8 s	NIV4 MATUZ 1.8 → 2.4 s	NIV4 MATUZ 1.3 → 2.4 s
64 dB	-5 dB	271 0.26	270 0.13	323 0.02
		NIV4 BRYN 1.3 → 1.8 s	NIV4 BRYN 1.8 → 2.4 s	NIV4 BRYN 1.3 → 2.4 s
64 dB	-5 dB	295 0.12	238 0.04	437 0.02

Tableau 8.2

Distances perceptives et erreurs correspondantes pour les couples où seul le critère TR varie dans les test NIV1, NIV3 et NIV4.

Les distances perceptives données pour les variations de temps de réverbération entre les tests NIV3 MATUZ et NIV3 BRYN sont équivalentes (de même pour les tests NIV4). Aucun coefficient correctif n'est alors nécessaire pour les comparer.

Pour le test NIV2, les distances paradoxalement très faibles ne sont pas prises en compte, les erreurs relatives étant égales à 54% et 76%. Prenons alors une moyenne de 190 unités perceptives pour une variation de 3 dB, cela correspond à une distance de 250 unités pour 4 dB de variation de niveau. Il faut alors multiplier ce test par un coefficient λ égal à 1.4 pour que cette variation objective de 4 dB soit perçue par une distance perceptive de 350 unités comparable aux tests NIV3 MATUZ et NIV4 MATUZ. Le test NIV1 est gardé tel quel, ses distances perceptives étant comparables à celles des tests NIV3 BRYN et NIV4 BRYN passés sur le même message instable en niveau. Les distances données pour le test CLAR1 sont multipliées par un coefficient λ de 0.95 de façon à ce que la variation de 4 dB soit évaluée par une distance perceptive de 350 unités environ.

Nous pouvons maintenant multiplier tous les tests concernant le niveau par leur coefficient respectif et calculer pour chaque couple la distance perceptive correspondant à une variation objective de niveau de 1 dB. Ce tableau est déduit du tableau 8.1 dans lequel les valeurs du critère *NIV* sont notées pour chaque couple.

DISTANCES PERCEPTIVES RAMENEES A $\Delta NIV=1$ dB				
		TEST	TEST	TEST
TR	C80	NIV1 $\lambda=1.0$	NIV1 $\lambda=1.0$	NIV1 $\lambda=1.0$
1.0 s	0 dB	45	47	45
1.6 s	0 dB	63	58	58
2.3 s	0 dB	82	45	63
TR	C40	NIV2 $\lambda=1.4$	NIV2 $\lambda=1.4$	NIV2 $\lambda=1.4$
0.3 s	8 dB	-	87	61
0.5 s	3 dB	99	-	62
1.0 s	0 dB	95	77	83
TR	C80	NIV3 MATUZ $\lambda=1.0$	NIV3 BRYN $\lambda=1.0$	-
1.0 s	-1 dB	82	54	-
1.0 s	-5 dB	88	61	-
2.5 s	-1 dB	86	67	-
2.5 s	-5 dB	101	61	-
TR	C80	NIV4 MATUZ $\lambda=1.0$	NIV4 MATUZ $\lambda=1.0$	NIV4 MATUZ $\lambda=1.0$
1.8 s	-5 dB	62	86	65
TR	C80	NIV4 BRYN $\lambda=1.0$	NIV4 BRYN $\lambda=1.0$	NIV4 BRYN $\lambda=1.0$
1.8 s	-5 dB	55	69	62
TR	C80	CLAR1 $\lambda=0.95$	-	-
1.5 s	0 dB	85	-	-
1.5 s	3 dB	87	-	-

Tableau 8.3

Distances perceptives unitaires pour l'ensemble des couples où seul le critère *NIV* varie.

Nous remarquons dans les tableaux que les distances perceptives unitaires sont d'autant plus faibles que les variations objectives des critères sont importantes. Ceci est surtout visible ici pour le test NIV2 où la troisième colonne dans le tableau 8.3 correspond à une variation objective de 6 dB et où les deux premières colonnes correspondent à une variation objective de 3 dB. Cela traduit le phénomène de courbure observé dans les tests. Pour évaluer une moyenne perceptive, nous ne prendrons donc en compte que les distances unitaires calculées sur des couples où les variations objectives sont de l'ordre de 3 dB. Nous ne prendrons également en compte que les tests où le niveau sonore est stable (NIV2, NIV3 MATUZ, NIV4 MATUZ et CLAR1). Ces restrictions étant faites, nous pouvons calculer une moyenne perceptive de 85 unités pour une variation de 1 dB. Si le calcul était fait à partir des tests où le message sonore écouté était chanté par Phyllis Bryn Julson (NIV1, NIV3 BRYN et NIV4 BRYN), la moyenne serait alors de 60 unités.

Toujours sur ce tableau 8.3, nous voyons qu'en général les distances perceptives augmentent lorsque la valeur du temps de réverbération augmente lui aussi. Nous prendrons donc une valeur moyenne de 85 unités pour une variation de niveau de 1 dB lorsque la valeur du temps de réverbération sera elle aussi moyenne, c'est à dire autour de 1.6 secondes (configurations du test CLAR1). Il faudra donc moduler cette évaluation de 85 unités en fonction des valeurs du temps de réverbération.

8.2.2 Le temps de réverbération TR

Pour quantifier perceptivement les variations de temps de réverbération, il est classique de calculer les variations en pourcentage ce qui revient à calculer une différence de logarithme népérien. Ainsi pour deux configurations où seul le temps de réverbération varie de TR_1 à TR_2 , la variation objective sera estimée par le calcul suivant:

$$\Delta TR_{obj.} = 10 \text{ Log} \frac{TR_1}{TR_2}$$

On peut de nouveau établir un tableau regroupant toutes les variations de temps de réverbération. Il permet de calculer les coefficients λ pour les tests supplémentaires CLAR3, CLAR4, TIMBTR et TIMBNV et de vérifier si les coefficients λ calculés précédemment pour les tests NIV1, NIV3 et NIV4 ne sont pas aberrants vis-à-vis des temps de réverbération.

DISTANCES PERCEPTIVES RAMENEES A $\Delta TR=1.0$				
		TEST	TEST	TEST
NIV	C80	NIV1 $\lambda=1.0$	NIV1 $\lambda=1.0$	NIV1 $\lambda=1.0$
66 dB	0 dB	47	68	57
70 dB	0 dB	65	40	52
74 dB	0 dB	66	51	60
		NIV3 MATUZ $\lambda=1.0$	NIV3 BRYN $\lambda=1.0$	-
66 dB	-1 dB	58	57	-
70 dB	-1 dB	54	64	-
66 dB	-5 dB	59	70	-
70 dB	-5 dB	68	66	-
		NIV4 MATUZ $\lambda=1.0$	NIV4 MATUZ $\lambda=1.0$	NIV4 MATUZ $\lambda=1.0$
64 dB	-5 dB	85	93	53
		NIV4 BRYN $\lambda=1.0$	NIV4 BRYN $\lambda=1.0$	NIV4 BRYN $\lambda=1.0$
64 dB	-5 dB	92	82	72
		CLAR4 $\lambda=1.3$	CLAR4 $\lambda=1.3$	CLAR4 $\lambda=1.3$
70 dB	+4 dB	-	-	40
70 dB	0 dB	64	51	57
70 dB	-4 dB	-	-	69
NIV	C80	TIMBTR $\lambda=0.8$	TIMBNV $\lambda=0.8$	
70 dB	0 dB	53	58	-
70 dB	0 dB	72	50	-
70 dB	0 dB	68	75	-
70 dB	0 dB	55	90	-
		CLAR3 $\lambda=0.7$		
62 dB	0 dB	57	-	-
62 dB	-3 dB	72	-	-

Tableau 8.4
Distances perceptives unitaires pour l'ensemble des couples où seul le critère TR varie.

Toujours pour éviter les effets dus à la courbure lorsque les variations objectives sont trop grandes, nous nous limiterons dans le calcul de la moyenne perceptive aux couples dont les variations objectives sont de l'ordre de 5. De plus, les distances perçues pour les variations de temps de réverbération sont généralement supérieures à celles perçues pour les variations de niveau (tableaux 8.1 et 8.2). La moyenne perceptive calculée pour les variations de temps de réverbération sera donc peut être sous-estimée par rapport à la moyenne perceptive calculée pour les variations de niveau.

Une variation de 10%, c'est à dire une variation de 1.0 en logarithme est alors estimée par une distance perceptive moyenne de 65 unités. On remarque sur les tests NIV3 et CLAR4 que les distances ont tendance à augmenter lorsque la clarté C80 devient faible. Aussi, cette valeur moyenne de 65 unités sera estimée pour une valeur moyenne de clarté C80 de 0 dB, et devra être modulée en fonction de la valeur de la clarté.

8.2.3 La clarté C80

Nous avons détaillé la perception des variations de ce critère suivant ses zones de valeurs. Sans rentrer de nouveau dans le détail, nous allons présenter les résultats de cette analyse quantitative.

Les coefficients λ déjà calculés permettent d'établir une moyenne perceptive pour les variations de clarté C80 dans une zone centrale que nous élargirons dans ce calcul de -5 dB à +4 dB de façon à avoir un nombre de couples satisfaisant.

TEST	Distances perceptives ramenées à $\Delta C80 = 1$ dB	Limites de la zone centrale
CLAR1	95	-3 dB +3 dB
CLAR3	90	-3 dB +3 dB
CLAR4	95	-4 dB +4 dB
NIV3 BRYN	60	-5 dB -1 dB
NIV3 MATUZ	70	-5 dB -1 dB
NIV4 BRYN	100	-5 dB -2 dB
NIV4 MATUZ	82	-5 dB -2 dB

Tableau 8.5

Distances perceptives moyennes calculées pour une variation unitaire du critère C80 pour les tests CLAR1, CLAR3, CLAR4, NIV3 et NIV4.

On remarque que pour des variations calculées dans une plage limitée autour en 0 dB, la moyenne se situe autour de 90 unités perceptives, alors que cette moyenne est de l'ordre de 80 unités lorsque la zone est décalée vers les valeurs négatives de clarté. Nous pouvons alors raccrocher les tests CLAR2, TIMBDS et SPACE1 à ces valeurs.

TEST	Couples	$\Delta C80 = 1$ dB
CLAR2 $\lambda = 0.8$	BC	83
	CD	93
TIMBDS $\lambda = 0.5$	BC	60
	EF	82
	HI	73
SPACE1 $\lambda = 0.8$	AE	100
	EI	92
	DH	87
	BF	90

Tableau 8.6

Distances perceptives moyennes calculées pour une variation unitaire du critère $C80$ pour les tests CLAR2, TIMBDS et SPACE1.

Lorsque la clarté est inférieure à -4 dB, les variations de clarté sont perçues plutôt par substitution sur le temps de réverbération. Les couples AB du test CLAR2, HG et DC du test NIV4 permettent d'estimer cette substitution à 35 unités sur le facteur de temps de réverbération pour une variation objective de 1 dB de clarté (le couple BC du test CLAR4 n'a pas été retenu car l'erreur relative commise sur cette distance est de 0.5).

Lorsque la clarté est supérieure à 0 dB, deux facteurs perceptifs interviennent, celui de la clarté lui-même et celui du niveau perçu de l'onde directe. Si cette dernière ne varie pas et que la clarté varie de +4 dB à +8 dB (couple DE pour le test CLAR4), la perception se fait par substitution sur le facteur lié à l'onde directe et est évaluée à 30 dB. Par contre, si l'onde directe varie, les deux perceptions se succèdent en se cumulant sur une plage de transition de clarté $C80$ que l'on peut estimer s'étaler de 0 dB à +4 dB.

Lorsque la clarté $C80$ ne varie pas et que seule l'onde directe varie (couples GH et HI) lorsque la clarté est supérieure à 0 dB, la distance perceptive unitaire calculée alors sur le critère $\Delta ZDIR = 1$ dB, vaut 82 dB. On retrouve une distance perceptive unitaire comparable à celle du critère NIV.

8.2.4 Coefficients d'ajustement

Tous les tests ont été ainsi ajustés sauf les tests SPACE2, SPACE3 et SPACE4. Ces trois tests possèdent avec SPACE1 des couples identiques qu'il est possible de comparer directement.

SPACE1		SPACE2		SPACE3		SPACE4	
BE	269	AB	345				
EH	306	BC	308				
BH	536	AC	552				
		BE	288	AB	404		
DE	194					AB	230
EF	263					BC	242
DF	375					AC	431

Tableau 8.7

Comparaisons des distances perceptives pour les couples communs des tests SPACE1, SPACE2, SPACE3, et SPACE4.

Nous pouvons finalement présenter le tableau des coefficients qui permettent de comparer quantitativement les tests entre eux.

TEST	Coefficient λ	TEST	Coefficient λ	TEST	Coefficient λ	TEST	Coefficient λ
NIV1	1.00	CLAR1	0.95	SPACE1	0.80	TIMBTR	0.80
NIV2	1.40	CLAR2	0.80	SPACE2	0.80	TIMBNV	0.80
NIV3	1.00	CLAR3	0.70	SPACE3	0.60	TIMBDS	0.50
NIV4	1.00	CLAR4	1.30	SPACE4	0.70	-	-

Tableau 8.8

Coefficients d'ajustements λ permettant de comparer les différents tests entre eux.

Nous remarquons que les coefficients les plus faibles servent à ajuster les tests les plus difficiles alors que les tests jugés faciles sont multipliés par de forts coefficients.

8.2.5 Critères de coloration

Pour les critères concernant les premières réflexions, les distances perceptives évaluées à partir des tests TIMBDS, SPACE1 et SPACE3 sont secondaires vis à vis des distances correspondant aux variations des critères tels que *NIV*, *TR* ou *C 80*.

termes descriptifs	critères objectifs	variation objective	dist. perceptive
<i>plat contrasté</i>	Dir/REF	1 dB	50 unités
<i>coulant heurté</i>	Tcp	10 ms	50 unités
<i>dur doux</i>	ETA	10 ms	40 unités

Tableau 8.9

Distances perceptives unitaires pour les variations des critères de coloration relatifs aux premières réflexions. Les termes décrivent une augmentation des critères objectifs correspondants.

Les variations objectives des critères *TR* et *NIV* en fonction des fréquences sont calculées à partir des variations du critère étudié, uniquement dans les bandes d'octaves où à la fois l'énergie du message sonore et la variation du critère sont importantes. Une préétude [27] a permis de mettre en évidence que les bandes d'octave qui ont le plus d'importance dans les effets de coloration sont celles qui correspondent à la présence d'énergie dans le spectre du message sonore écouté. Nous avons déjà vu que le morceau de Darius Milhaud était à la fois riche en graves et en aigus, aussi les variations objectives des critères dans les graves seront estimées par la moyenne des variations dans les bandes 125 Hz et 250 Hz, les variations dans les aigus seront calculées par la moyenne des variations dans les bandes 4 kHz et 8 kHz. Pour les deux test TIMBTR et TIMBNV, les distances perceptives sont présentées dans le tableau suivant:

termes descriptifs	critères objectifs	variation objective	dist. perceptive
<i>neutre intime - pateux *</i>	LogTR125 Hz 250 Hz	1.0	40 unités
<i>sec vivant - acide **</i>	LogTR 4 kHz 8 kHz	1.0	70 unités
<i>creux chaud - lourd**</i>	NIV 125 Hz 250 Hz	1 dB	60 unités
<i>pauvre brillant - acide*</i>	NIV 4 kHz 8 kHz	1 dB	70 unités

Tableau 8.10

Distances perceptives unitaires pour les variations des critères de coloration *TR* et *NIV* en fonction des fréquences. Les termes décrivent une augmentation des critères objectifs correspondants.

* terme simplement proposé à l'écoute pour une valeur excessive du critère.

** terme décrivant une valeur excessive traduite dans les tests par un facteur perceptif spécifique.

Dès que l'on revient aux variations objectives unitaires, on trouve des sensibilités dans les graves et les aigus à peu près équivalentes pour les niveaux tandis que l'on trouve une sensibilité presque deux fois plus importante dans les aigus que dans les graves pour les temps de réverbération. La confusion entre les effets perceptifs dus aux variations dans les aigus du temps de réverbération et aux variations par translation globale du temps de réverbération est encore traduite ici par une similitude quantitative entre les facteurs correspondants.

8.2.6 Critères de spatialisation

Ces distances perceptives sont plus des estimations que des moyennes car aucun couple ne présentait une variation objective sur un critère unique.

termes descriptifs	critères objectifs	variation objective	dist.perceptive
<i>impression d'espace</i>	LE	1 dB	80 unités
<i>largeur de la source</i>	ANG	8°	80 unités

Tableau 8.11

Distances perceptives unitaires pour les variations des critères de spatialisation. Les termes décrivent une augmentation des critères objectifs correspondants.

8.3 Seuil de discrimination

Il est intéressant de remarquer que le seuil de discrimination estimé à 1 dB pour le niveau sonore correspond approximativement à une distance perceptive de 80 unités, distance du même ordre que celle correspondant au seuil de perception estimé à 10% de variation pour le temps de réverbération. Cette même distance caractérise une variation de clarté C_{80} d'environ 1 dB qui correspond aussi à son seuil de perception. On peut considérer alors plus généralement que cette distance perceptive de 80 unités correspond approximativement au seuil de perception de tous les critères.

8.3.1 Critère ETA

Il faut une variation objective de 20 ms au critère *ETA* afin que sa variation soit quantifiée par une distance de 80 unités. Nous avons été déçus de ne pas retrouver ce facteur dans le test *SPACE3* au paragraphe 6.1.2, mais nous pouvons maintenant le comprendre car dans ce test, les variations de ce critère étaient de l'ordre de 10 ms, inférieures au seuil de perception. Il était même logique que le facteur lié à ce critère n'apparaisse pas dans l'analyse.

8.3.2 Critère ANG

Il est intéressant de comparer ce seuil de discrimination à ceux présentés par Blauert [26]. Le seuil de 8° est de l'ordre de grandeur de ceux décrits par la figure 8.3 a. Sur la figure 8.3 b, il ne faut considérer que les seuils correspondant à une élévation proche de $\delta = 0^\circ$, de façon à respecter la pondération spatiale qui intervient dans le calcul de ce critère *ANG*.

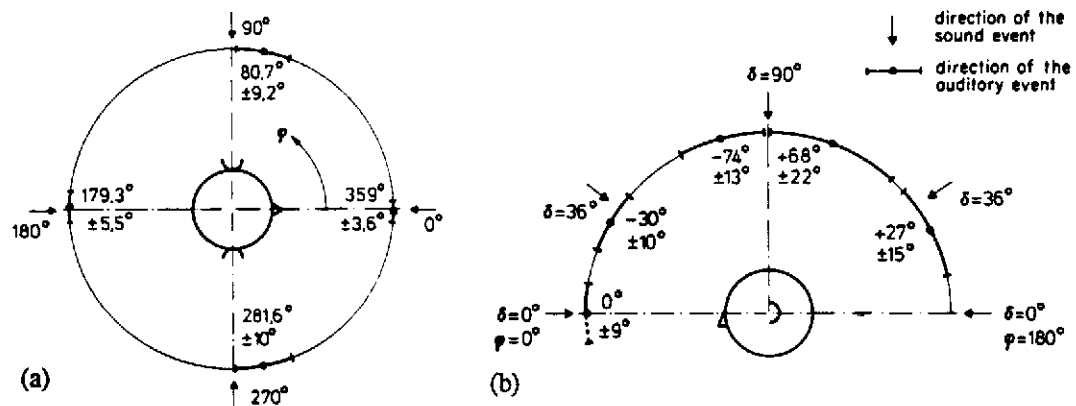


Figure 8.3

Localisation d'un évènement sonore et seuil de discrimination correspondant. a: Localisation dans un plan horizontal d'un bruit blanc intermittent (Preibisch-Effenberger, Haustein et Schirmer d'après Blauert). b: Localisation dans un plan vertical d'un message parlé continu (Damaske et Wagener d'après Blauert).

9. CONCLUSION

9.1 Résumé

Les tests perceptifs effectués à l'IRCAM afin de valider perceptivement certains critères objectifs utilisés pour caractériser la qualité acoustique des salles, ont porté sur l'écoute de configurations artificielles, recréées en chambre sourde, pour lesquelles les valeurs de critères étaient maîtrisées. Lorsque les effets spatiaux n'étaient pas étudiés, les écoutes ont été effectuées au casque. Ces tests ont été menés suivant une procédure non verbale, ne faisant appel qu'aux jugements de dissimilarité entre configurations, et analysés par la méthode INDSCAL.

Le niveau sonore *NIV* traduit objectivement la perception de *force sonore* dans une salle à condition que le niveau de l'onde directe ait dépassé un certain seuil (estimé à 53 dB pour une écoute au casque). Si ce seuil n'est pas atteint, l'auditeur a l'impression d'être en dehors de la salle. Ce facteur de *force sonore* semble indépendant des autres facteurs.

La clarté *C 80* est un critère qui paraît lié à plusieurs facteurs perceptifs. Dans une zone de valeur moyenne (de -3 dB à +3 dB), ce critère est lié au facteur de *netteté*. L'observation d'une substitution importante entre temps de réverbération *TR* et clarté *C 80* a justifié la recherche d'une courbure de notre espace perceptif. Celle-ci a permis de quantifier cette substitution qui est totale dans une zone de clarté faible (inférieure à -4 dB) et vaut encore environ 50% dans une zone de clarté moyenne. Ce pourcentage est à moduler en fonction de la valeur du temps de réverbération: une petite valeur de temps de réverbération aura tendance à limiter cette substitution, tandis qu'une forte valeur l'augmentera. Dans une zone de clarté forte, on constate que l'importance du niveau perçu de l'onde directe *ZDIR* succède progressivement à celle de la clarté *C 80*.

Les effets de coloration ont été étudiés soit en jouant sur la répartition temporelle et énergétique des premières réflexions, soit en jouant sur les valeurs de certains critères comme le temps de réverbération ou le niveau sonore en fonction des fréquences. Il en résulte que les réflexions arrivant de l'arrière des auditeurs n'interviennent pas dans ces effets de coloration. Trois critères ont été proposés pour décrire les effets de coloration dus aux premières réflexions: le rapport d'énergie entre onde directe et premières réflexions *Dir/REF*, le barycentre en temps de ces réflexions appelé temps central précoce *Tcp* et l'étalement *ETA* de celles-ci calculé par un écart type en temps.

La perception des temps de réverbération est surtout sensible dans les aigus, celle-ci semblant même être confondue parfois avec la perception du critère TR global. Un deuxième facteur perceptif apparaît en cas d'excès du temps de réverbération dans les aigus par rapport à celui dans les graves. La perception du niveau est mieux équilibrée entre les aigus et les graves mais c'est un excès de niveau dans les graves qui introduit un facteur spécifique.

Enfin, les effets de spatialisation ont été étudiés en faisant varier dans l'espace la direction des premières réflexions. Le critère de fraction d'énergie latérale L_f est bien corrélé au facteur perceptif classiquement appelé *impression d'espace*. Un autre facteur sous-jacent dans notre perception spatiale correspond à la notion de *largeur de la source* qui est estimée par le critère ANG , barycentre en espace, pondéré par l'énergie associée à la source.

Les calculs de tous les critères ainsi que la quantification des facteurs correspondants sont résumés en annexes 2 et 3. L'annexe 4 présente les caractéristiques objectives et certains résultats numériques intéressants des tests perceptifs.

9.2 Etudes complémentaires

9.2.1 Comparaison des résultats avec ceux de la littérature

Pour vérifier que les résultats avancés ne sont pas en contradiction avec ceux déjà proposés dans la littérature, ou même pour appuyer ces résultats, il serait intéressant de faire une étude comparative. Ce point soulève le problème de la comparaison des valeurs de critères mesurés en champs sonores artificiels ou en salles réelles lorsque les sources utilisées pour les mesures ne sont pas identiques.

9.2.2 Etudes psychoacoustiques

D'autres problèmes soulevés ponctuellement dans ce rapport doivent aussi être approfondis. Une étude purement psychoacoustique devrait nous permettre de mieux définir quelles sont les énergies qui sont effectivement associées à la source sonore pour le critère $ZDIR$. Lochner et Burger [28] ont déjà étudié ce phénomène sur la parole mais ils n'ont pris en compte qu'une pondération en temps alors que nous avons vu qu'une pondération spatiale est aussi nécessaire.

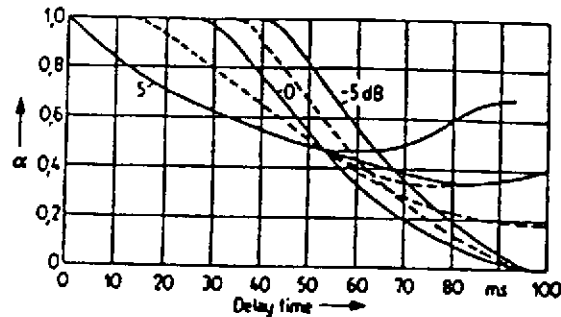


Figure 9.1

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

Une même étude devrait être faite pour le calcul des réflexions *REF*.

L'interaction entre la perception sonore et la perception visuelle devrait, elle aussi, intervenir dans ces assimilations d'énergie.

9.2.3 Préférences

Il faudrait en effet étudier plus à fond les préférences des auditeurs. Tout le travail présenté dans ce rapport est difficilement utilisable par des acousticiens s'il ne leur permet pas de décider en fonction des préférences, des valeurs de critères qui semblent optimales pour leurs besoins.

Deux modèles strictement liés à l'analyse multidimensionnelle sont à notre disposition [29]. Le premier est celui que nous avons déjà utilisé, il correspond à une projection du vecteur préférence dans l'espace perceptif. Ce modèle traduit le concept suivant: Les salles préférées sont celles qui se situent le plus loin dans la direction du vecteur préférence. Cela sous-entend qu'il n'y a pas de limite dans la direction de ce vecteur pour la préférence d'un auditeur.

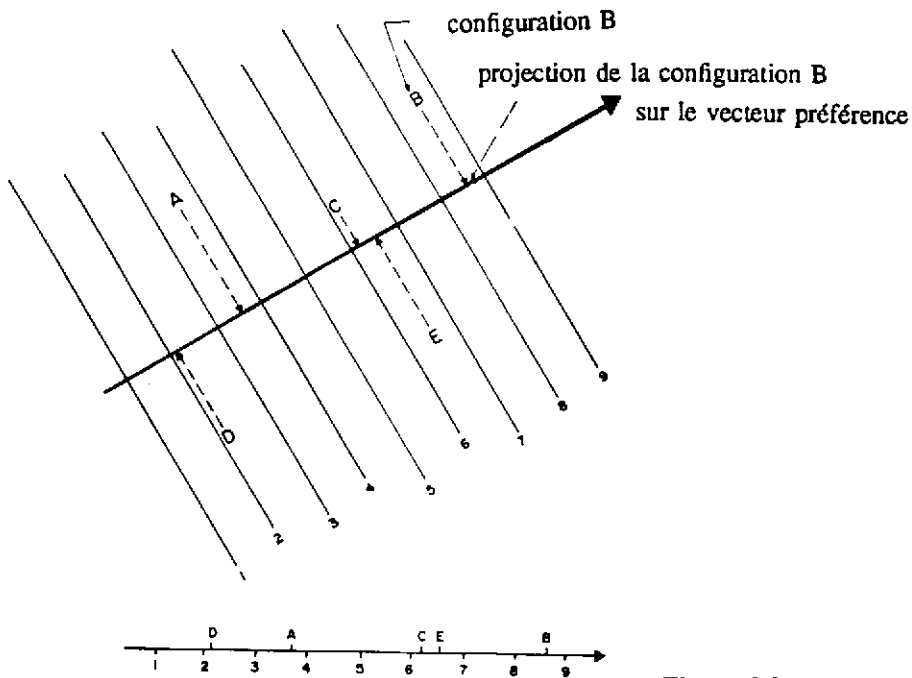


Figure 9.2
Modèle du vecteur préférence.

Ce modèle est approprié lorsque l'ensemble des configurations ont des valeurs de critères soit trop fortes soit trop faibles pour le goût des auditeurs. Lorsqu'une salle parmi les configurations semble satisfaire le goût des auditeurs, il vaut mieux alors utiliser le modèle du point idéal. Le concept de ce dernier modèle s'appuie sur l'idée que plus une salle se situe, dans l'espace perceptif, proche de ce point idéal, plus elle a de chance d'être préférée aux autres.

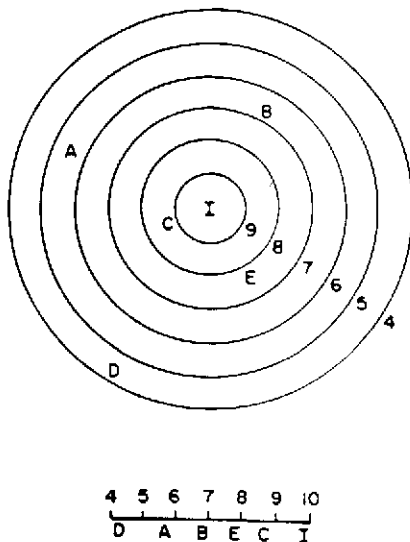


Figure 9.3
Modèle du point idéal.

Une autre manière d'étudier les préférences est de construire un flux de préférence qui indique dans quel sens vont les choix des auditeurs en différents endroits de l'espace perceptif. Un début d'étude a été mené sur le test NIV4 BRYN. Les flèches orientent les scores obtenus pour chaque paire de comparaison sur l'ensemble des sujets.

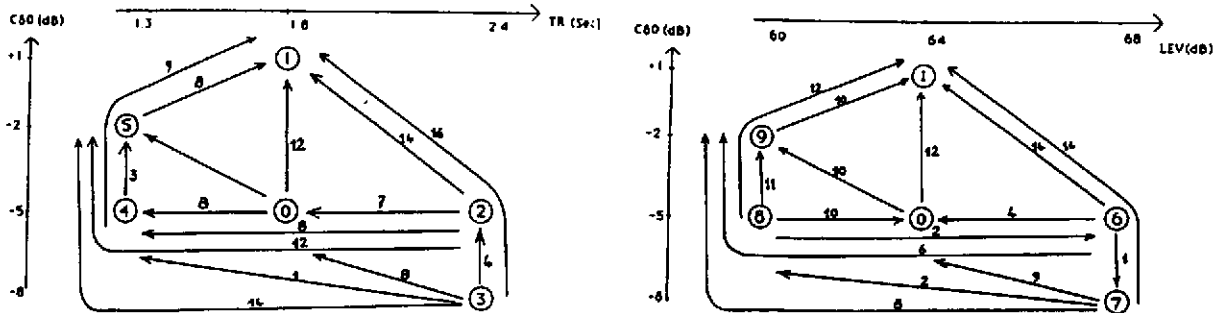


Figure 9.4

Flux des préférences sur l'ensemble des 16 sujets du test NIV4 BRYN.

Ces différentes approches doivent maintenant nous permettre d'analyser toutes les données de préférence dont nous disposons.

9.3 Projets d'application

L'Espace de Projection de l'IRCAM est une salle à acoustique variable dont les possibilités de variabilité sont assez larges. Le problème pour le compositeur dont l'oeuvre y est exécutée, est de choisir la configuration qu'il estime adéquate pour sa pièce. Les résultats de cette recherche, intégrés dans un logiciel, devraient aider les compositeurs à choisir les qualités acoustiques qu'ils désirent. L'interface utilisateur aurait autant de paramètres de commande que de facteurs perceptifs. Les termes descriptifs correspondant aux facteurs perceptifs proposés dans ce rapport expliqueraient alors les effets des commandes. La position de chaque paramètre serait traduite par le logiciel en une valeur du critère objectif correspondant et celui-ci se chargerait de trouver la configuration la plus proche de l'ensemble des caractéristiques désirées. Cette application devrait être réalisée dans le courant de l'année 1989.

Le même principe peut s'appliquer à tous les systèmes électroacoustiques avec encore plus de souplesse, car dans ce cas, les critères objectifs sont beaucoup plus indépendants que dans le cas d'une acoustique variable mécanique. On peut même imaginer que des compositeurs ou des metteurs en scène utilisant une acoustique variable, puissent intégrer les qualités acoustiques désirées dans leur partition ou dans leur découpage, à l'aide de termes perceptifs choisis dans la liste des termes descriptifs proposés. Mais ceci implique une phase d'apprentissage afin que tout le monde s'entende sur les effets perceptifs associés aux termes descriptifs choisis.

ANNEXE 1

L'ACOUSTIQUE DES SALLES

Amélioration produites par l'emploi des fils de coton [30] (Juin 1877).

Les applications de la physique à l'industrie, aux arts sont nombreuses, et considérables sont les progrès qui ont été faits par suite de la généralisation de la connaissance des principes de cette science. Il est une partie cependant où les progrès de l'industrie, de l'art, ne sont que pour bien peu redevables au développement des connaissances scientifiques: l'acoustique physique a, jusqu'à présent, fourni peu de données utiles, et c'est encore en suivant les indications des générations antérieures, disons le mot en suivant la routine, que l'on se guide dans presque toutes les circonstances. C'est ainsi que, bien que l'on ne connaisse pas les raisons scientifiques qui permettraient d'expliquer la forme complexe des instruments à archet, l'on ne saurait rien changer utilement au violon, à l'alto, au violoncelle; on sait que Savart a voulu construire un violon d'après les indications qu'il croyait pouvoir déduire de la théorie et des expériences qu'il avait exécutées, et que cet instrument était réellement mauvais: nous ne prétendons pas que, guidés par des considérations générales sur la production et la propagation des ondes sonores, on n'ait pas amélioré certains instruments; certes, des progrès ont été faits en ce sens, principalement pour les instruments à vent, mais ce n'est pas aux physiciens qu'on en est redevable, et des modifications introduites par des artistes ou des fabricants d'instruments de musique reposent, nous le répétons, non pas sur l'application de lois déterminées, mais sur les seules notions premières de la cause de la production des sons et de leur mode de propagation.

A d'autres points de vue, l'acoustique a fourni également peu d'indications; nous citerons spécialement la construction des salles destinées à l'audition d'un orateur, et surtout d'un orchestre. Combien peu de ces salles sont satisfaisantes, c'est-à-dire, combien peu y en a-t-il où, de tous les points, on entende nettement, distinctement les paroles de l'orateur, les accords de l'orchestre. La question présente incontestablement de grandes difficultés, et nous allons tâcher de le faire comprendre dans ce qu'elles ont de plus important.

Considérons le cas simple d'une personne parlant dans une salle dont nous supposons les murs nus et résistants, des murs en maçonnerie par exemple. Le son produit se répand dans toutes les directions: il va en ligne droite, d'une part, jusqu'aux oreilles d'un auditeur; mais d'autre part, des ondes sonores vont rencontrer les murs de la

salle, le plafond: là, elles se réfléchissent, et continuent leur chemin suivant une nouvelle direction; après cette réflexion, quelques-unes parviennent à l'oreille de l'auditeur que nous avons déjà considéré; mais elles sont en retard sur les ondes directes, puisqu'elles ont suivi un plus long trajet. Si la différence de chemin n'est pas très considérable, le son réfléchi parviendra à l'oreille avant que l'impression du son direct soit éteinte, et celle-ci paraîtra seulement se prolonger, se renforcer. La prolongation sera presque insensible, et le renforcement se fera seul sentir si la pièce est petite et qu'il y ait, dans tous les cas, peu de différence entre les chemins parcourus par les ondes directes et par les ondes réfléchies; c'est ce qui arrive en général dans les appartements, dans les salons, et dans ce cas, surtout pour le chant, ce renforcement est loin d'être un inconvénient.

Si la salle est grande, l'effet est tout autre; un son, même bref, proféré à haute voix, se prolonge très notablement, et l'effet devient très sensible. Il en résulte que si l'on prononce successivement plusieurs sons, comme cela se produit lorsqu'on parle, les sons directs successifs arrivent à l'oreille avant que soient éteintes les impressions des ondes réfléchies correspondant aux sons précédents; toute netteté disparaît, on ne peut rien distinguer, il y a confusion; on n'entend plus des sons, des paroles, on entend seulement un bruit, un vague brouhaha.

Si même la salle est plus grande, des ondes réfléchies correspondant à un son déterminé, arrivent à l'oreille alors que l'impression produite par les ondes directes est complètement éteinte; on a une seconde impression distincte, comme si un second son était produit du côté d'où viennent les ondes réfléchies: il y a écho.

Ces divers effets disparaissent si les parois résistantes de la salle sont recouvertes de matières non élastiques, de tapisseries, de tentures, de tableaux. On éteint ainsi non seulement les échos, les prolongements exagérés des sons, mais même, et cela est un inconvénient, les simples résonnances, renforcements des sons qui leur donnent plus d'ampleur. Les chanteurs savent combien il est désagréable de chanter dans un salon où le plancher est recouvert d'un tapis, où de nombreux tableaux sont accrochés aux murailles, où de lourds rideaux masquent les fenêtres, tandis que d'épaisses portières sont appliquées contre les portes: il ne peut y avoir là nulle part réflexion des ondes sonores, l'auditeur entend seulement le son produit par les ondes directes. C'est également la raison pour laquelle il est difficile de parler ou de chanter en plein air; les ondes directes impressionnent alors seules les oreilles des auditeurs.

Nous avons considéré un cas fort simple; mais il est facile de concevoir combien la question se complique si les parois de la salle sont minces, élastiques, susceptibles par suite d'entrer en vibration sous l'action des ondes sonores, puis devenues corps sonores à leur tour, envoyant des ondes qui affecteront l'oreille de l'auditeur concurremment avec les ondes directes. A plus forte raison, les phénomènes sont complexes, si derrière cette paroi mince se trouve une masse d'air limitée, également susceptible de vibrer; si, dans la salle, débouchent des pièces latérales dont la masse d'air peut de même entrer en vibration.

D'autre part, il se présente fréquemment des obstacles à la propagation des ondes

sonores, et, sans parler des obstacles matériels que l'on peut éviter, nous signalerons les fâcheux effets produits par des masses d'air élevées à des températures différentes, inégalement chargées d'humidité, par les courants qui s'établissent entre les diverses parties de la salle. Les effets de ce genre ont été signalés à plusieurs reprises, et récemment encore par Tyndall.

On peut concevoir d'après les indications sommaires que nous avons énumérées précédemment, à quelles conditions multiples devrait satisfaire une salle pour que l'on pût, de tous les points, y entendre nettement un orateur. On prévoit dès lors, combien plus difficile il doit être de trouver une salle dans laquelle les sons d'un orchestre parviennent partout avec netteté, sans résonances trop prolongées, sans échos.

Il faut le reconnaître, jusqu'à présent, les salles de cours, de séances oratoires, les salles de concert ou de théâtre sont construites empiriquement, à peu près au hasard. On connaît bien un certain nombre d'inconvénients qu'il faut éviter, mais c'est là tout; on se borne en général à se rapprocher de la disposition donnée à une autre salle déjà construite et qui soit bonne au point de vue de l'acoustique. Nous ne croyons pas qu'à part une étude faite par M. Sax, il ait jamais été produit un projet de salle de concert, ou même de cours, rationnellement disposé sous le rapport de l'acoustique.

Il est d'autres cas, dans lesquels la forme de la salle est imposée par des circonstances diverses, et où la sonorité soit la moindre qualité dont l'architecte se soit préoccupé. C'est ce qui arrive, par exemple, pour les églises; on rencontre là un vaisseau de grandes dimensions, d'une hauteur considérable; les parois sont nues, unies; il y a donc réunies toutes les conditions favorables à la production de résonances exagérées, et quelquefois même d'échos. On sait en effet, combien dans les grandes cathédrales les sons se prolongent, se multiplient; on sait que le bruit des pas, même discrets, devient insupportable pour les fidèles, que le choc d'une porte fermée brusquement donne lieu à un fracas considérable. Cette sonorité, qui, lorsqu'elle est faible, donne de l'ampleur à la voix des prédicateurs, devient un grand inconvénient si elle est exagérée. Les paroles dites en chaire cessent d'être distinctes, même pour les personnes voisines, et à quelque distance on entend seulement un bourdonnement incompréhensible. Les effets sont d'ailleurs les mêmes pour les sons de l'orgue qui se mélangent tous, et donnent alors lieu à des effets tout autres que ceux que recherche l'artiste.

Les défauts que nous venons de signaler existaient il y a quelques années dans la cathédrale de Saint-Fin-Barre à Cork (Irlande); on eut la pensée qu'il serait possible de les corriger en gênant la propagation des ondes sonores autres que les ondes directes, et l'expérience prouva qu'il suffisait pour cela d'un certain nombre de fils fins, placés horizontalement à 6 ou 8 mètres au-dessus du sol entre les murs de la nef. Ces fils, peu visibles, et de l'existence desquels on ne s'aperçoit que lorsqu'on en est prévenu, ont amené un changement considérable dans la sonorité de la cathédrale, tant au point de vue du prédicateur qu'à celui des sons de l'orgue. On réussit d'une manière analogue à l'église Saint-André de Dublin.

Ces faits et quelques autres analogues qu'il nous paraît inutile de rapporter, ont conduit M. Cavallié-Coll, l'habile facteur d'orgues de Paris, à essayer le même moyen pour diminuer les résonnances qui existaient dans la nouvelle église de Notre-Dame-des-Champs, construite à Paris, sur le boulevard Montparnasse. Les prédicateurs se plaignaient de la fatigue qu'ils éprouvaient sans parvenir à se faire entendre; d'autre part, les sons de l'orgue arrivaient confus aux fidèles. Des fils de coton d'un diamètre de 3 millimètres environ furent tendus transversalement et diagonalement dans la nef, à la hauteur de la naissance des voûtes qui la réunissent aux bas côtés: ces fils presque invisibles et que l'on ne distingue qu'avec peine, même lorsqu'on les cherche, ont suffi pour améliorer la sonorité tant au pont de vue de l'orgue qu'à celui du prédicateur.

Il y a quelques semaines, les membres de la Société française de Physique étaient réunis pour étudier cet effet; ils n'ont guère pu constater par eux-mêmes que la netteté avec laquelle les sons de l'orgue parviennent dans la nef; quelques personnes cependant eurent l'idée d'aller jusque derrière le chœur, en un point où ne se trouvent pas de fils tendus, et il leur parut certain que les sons de l'orgue arrivaient plus confusément. Les témoignages des personnes qui ont assisté à des offices dans cette église avant la pose des fils, ne semblent pas laisser de doute sur l'amélioration acquise.

M. Cavallié-Coll avait d'ailleurs voulu donner aux membres de la Société de Physique une preuve directe de l'effet produit; on se réunit donc dans un établissement de l'avenue du Maine, et là, dans son vestibule, on posa et enleva alternativement une série de fils de coton: il parut tout d'abord manifeste que la pose des fils de coton diminuait les résonnances fâcheuses. L'effet fut perçu plus distinctement par une expérience comparative: un des membres présents répéta deux fois de la même manière des vers français et latins de divers auteurs, en s'efforçant de parler avec la même intensité et la même vitesse; toutes les personnes qui assistèrent à cette expérience jugèrent que les sons étaient plus nets lorsque les fils étaient posés.

Il paraît utile de faire connaître ces résultats, qui pourront conduire à des applications analogues. Les essais sont faciles à faire, peu coûteux; ils ne produisent aucune détérioration, et nous croyons qu'il serait bon de les faire dans toutes les salles où la résonnance exagérée apporte le trouble à l'audition des orateurs qui y parlent, ou des musiciens qui s'y font entendre.

C.M. GARIEL.

LE MYSTERE DE L'ACOUSTIQUE

[31] (1912)

On m'a demandé s'il fallait conserver la salle Bösendorfer. Celui qui m'a questionné semblait partir de l'idée que ce serait manquer de respect envers le passé que de démolir une salle qui a joué un si grand rôle dans l'histoire musicale de Vienne.

Il ne s'agit pas d'une question de respect; il s'agit d'une question d'acoustique. Je vais m'efforcer d'y répondre. Il est heureux que j'aie été interrogé là-dessus, sinon j'aurais emporté la réponse avec moi dans la tombe.

Le problème de l'acoustique préoccupe depuis des siècles les architectes. Ils s'efforcèrent de le résoudre par la construction. Ils dessinèrent des lignes droites, de la source du son jusqu'au plafond, en pensant que comme une boule de billard il serait renvoyé par la bande pour prendre de là un nouveau chemin. Mais tous ces raisonnements sont absurdes.

Car l'acoustique d'une salle n'est pas une question d'espace, mais une question de matériau. Une salle dont l'acoustique est mauvaise peut être améliorée par des étoffes moelleuses, des rideaux et des tentures. Davantage: un simple fil tendu à travers une salle peut transformer complètement et améliorer l'acoustique.

Mais ce sont là des expédients. Ces étoffes moelleuses absorbent le son et lui ôtent sa plénitude. Les Grecs se montraient plus avisés. Sous les sièges de leurs théâtres ils avaient aménagé, à intervalles égaux, une série de chambres dont chacune était pourvue d'un immense bassin de métal tendu d'une peau de tambour. Ils tentaient ainsi de renforcer le son et non pas de l'affaiblir. Et la salle Bösendorfer possède une merveilleuse acoustique, sans qu'il soit besoin de rideaux, avec ses seuls murs droits et nus.

Il s'agirait donc de construire une nouvelle salle ayant exactement les dimensions de l'ancienne - ceci pour donner raison aux tenants de l'actuelle théorie de l'acoustique - et de l'édifier avec le même matériau - ceci pour me donner raison? Mais quel serait le résultat? Une salle complètement dépourvue d'acoustique.

Ces tentatives ont déjà été faites. Manchester a copié exactement la célèbre salle de concert de Brême, qui est connue dans le monde entier pour avoir une acoustique incomparable. Le résultat n'a pas été heureux. Jusqu'ici toute salle *nouvelle* a eu une mauvaise acoustique. Beaucoup se souviennent de l'ouverture de l'Opéra de Vienne. On redouta que le manque de qualité acoustique de cette maison ne mît fin à l'art vocal viennois. Et aujourd'hui, l'Opéra passe pour un théâtre modèle, du point de vue qui nous occupe.

Nos oreilles ont-elles donc changé? Non; c'est le matériau de la salle qui a changé. Ce matériau n'a absorbé que de la bonne musique pendant quarante ans, il s'est imprégné des sons de nos philharmonistes et des voix de nos chanteurs. Une telle imprégnation produit de mystérieuses mutations moléculaires, que nous n'avons pu

observer jusqu'ici que sur le bois des violons.

Pour conférer à une salle une bonne acoustique faut-il donc y jouer de la musique? Non, cela ne suffit pas. Il faut y jouer de la *bonne* musique. Car on peut tromper les âmes des hommes, mais non pas l'âme du matériau. Les salles où on n'a joué que de la musique de cuivre garderont toujours une mauvaise acoustique. L'âme du matériau est si sensible qu'il suffirait de faire éclater des fanfares pendant huit jours dans la salle Bösendorfer pour que sa célèbre acoustique s'en allât immédiatement au diable. De même que le violon d'un Paganini verrait sa sonorité immédiatement ruinée s'il était manié par un rustre. D'une façon générale, le matériau de construction supporte mal les cuivres. C'est la raison pour laquelle, dans un Opéra, un des coté a toujours une acoustique moins bonne. Les salles où on n'entend jamais de cuivres présentent à la longue la meilleure acoustique. Dans le mortier de la salle Bösendorfer habitent les sonorités de Liszt et de Meschaert, qui vibrent et frémissent aux sons de chaque nouveau pianiste, de chaque nouveau chanteur.

Tel est le mystère de l'acoustique de cette salle.

A. LOOS.

ANNEXE 2

CALCULS DES CRITERES

Niveau sonore: NIV

$$NIV = 10 \log \int_{0 \text{ ms}}^{\infty} \frac{h_o^2(t) \cdot dt}{h_{ref}^2}$$

$h_o(t)$ est la réponse impulsionnelle du canal acoustique étudié, mesurée avec un micro omnidirectionnel.

Temps de réverbération: TR

TR est le temps que met le son pour décroître de 60 dB, évalué après 80 millisecondes.

Clarté: C80

$$C80 = 10 \log \frac{\int_{0 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} h_o^2(t) \cdot dt}{\int_{80 \text{ ms}}^{\infty} h_o^2(t) \cdot dt}$$

Zone directe: ZDIR

$$ZDIR = 10 \log \int_{0 \text{ ms}}^{40 \text{ ms}} \frac{h_{cav}^2(t) \cdot dt}{h_{ref}^2}$$

$h_{cav}(t)$ est la réponse impulsionnelle mesurée avec un micro cardioïde orienté vers l'avant.

Critères de coloration: effets des premières réflexions

Trois critères objectifs concernant les premières réflexions sont calculés à partir de l'énergie définie par REF.

$$REF = 10 \log \left(\int_{5 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} \frac{h_o^2(t) \cdot dt}{h_{ref}^2} - \int_{60 \text{ ms}}^{80 \text{ ms}} \frac{h_{c_w}^2(t) \cdot dt}{h_{ref}^2} \right)$$

$h_{c_w}(t)$ est la réponse impulsionnelle mesurée avec un micro cardioïde orienté vers l'arrière.

Les trois critères sont donc:

$$Dir / REF = 10 \log \int_{0 \text{ ms}}^{5 \text{ ms}} h_o^2(t) \cdot dt - REF$$

Tcp est le barycentre en temps des réflexions définies par REF.

ETA est l'écart type des réflexions définies encore par REF.

Fraction d'énergie latérale: Lf

$$Lf = 10 \log \frac{\sum_{t=5 \text{ ms}}^{t=80 \text{ ms}} r \cdot |\sin \alpha| \cdot \cos \beta}{\sum_{t=0 \text{ ms}}^{t=80 \text{ ms}} r}$$

r est l'énergie arrivant d'une direction faisant un angle d'azimut α par rapport à une direction frontale et d'élévation β par rapport à un plan horizontal au niveau de la tête du sujet.

Largeur de la source: ANG

ANG est le barycentre en angle de l'énergie associée à la source, définie par $ZDIR$.

ANNEXE 3

ETUDE QUANTITATIVE

termes descriptifs	critères objectifs	variation objective	dist. perceptive
<i>absent présent</i>	ZDIR _{Dir < 53 dB}	1 dB	85 unités à TR = 1.6 s
<i>faible énergétique</i>	NIV _{Dir > 53 dB}	1 dB	
<i>brouillé net</i>	-3 dB < C80 < +3 dB	1 dB	90 unités
<i>lointain proche</i>	ZDIR _{C80 > +3 dB}	1 dB	82 unités
<i>sec réverbérant</i>	Log TR	1.0	65 unités à C80 = 0 dB

tab.1 Description et quantification des facteurs perceptifs concernant les variations de critères temporeux.

termes descriptifs	critères objectifs	variation objective	dist. perceptive
<i>plat contrasté</i>	Dir/REF	1 dB	50 unités
<i>coulant heurté</i>	Tcp	10 ms	50 unités
<i>dur doux</i>	ETA	10 ms	40 unités

tab. 2 Description et quantification des facteurs perceptifs concernant les effets de coloration dus aux premières réflexions.

termes descriptifs	critères objectifs	variation objective	dist. perceptive
<i>neutre intime - pâteux *</i>	LogTR 125 Hz 250 Hz	1.0	40 unités
<i>sec vivant - acide **</i>	LogTR 4 kHz 8 kHz	1.0	70 unités
<i>creux chaud - lourd**</i>	NIV 125 Hz 250 Hz	1 dB	60 unités
<i>pauvre brillant - acide*</i>	NIV 4 kHz 8 kHz	1 dB	70 unités

* terme simplement proposé à l'écoute pour une valeur excessive du critère.

** terme décrivant une valeur excessive traduite dans les tests par un facteur perceptif spécifique.

tab. 3 Description et quantification des facteurs perceptifs concernant les effets de coloration dus aux valeurs de TR et NIV en fonction des fréquences.

termes descriptifs	critères objectifs	variation objective	dist.perceptive
<i>impression d'espace</i>	LE	1 dB	80 unités
<i>largeur de la source</i>	ANG	8°	80 unités

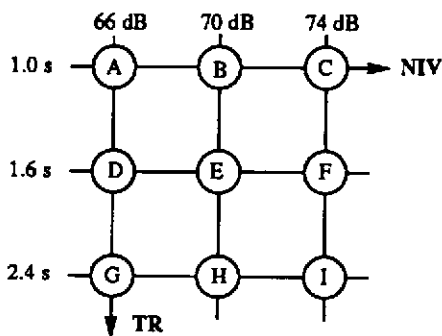
tab. 4 Description et quantification des facteurs perceptifs concernant les effets de spatialisation.

ANNEXE 4

INFORMATIONS SUR LES TESTS PERCEPTIFS

NIV1

- § 4.2
- Caractéristiques objectives des configurations:



Caractéristiques objectives des configurations du test NIV1. La clarté C_{80} est fixée à 0 dB et les premières réflexions sont réparties sur les haut-parleurs HP1, HP2 et HP7.

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 2

Variance expliquée R**2: 0.621307e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2
0.3221e+00	0.2992e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01	
2	0.859e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des configurations sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01	
2	0.474e-02	0.100e+01

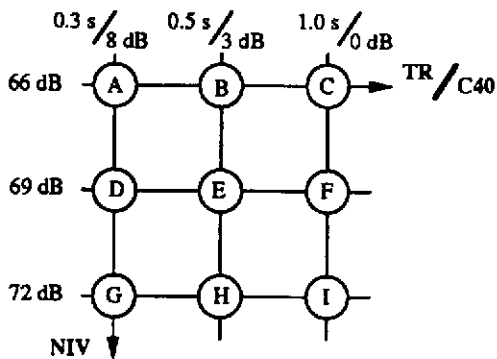
- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *réverbérant - sec - TR*

Facteur 2: *faible - énergique - NIV*

NIV2

- § 4.3
- Caractéristiques objectives des configurations:



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 3

Variance expliquée R**2: 0.781470e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3
0.4967e+00	0.1792e+00	0.1056e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: $S_{II'}$

1	0.100e+01		
2	0.934e+00	0.100e+01	
3	0.903e+00	0.861e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: $S_{II'}^*$

1	0.100e+01		
2	-0.409e+00	0.100e+01	
3	-0.178e+00	0.922e-02	0.100e+01

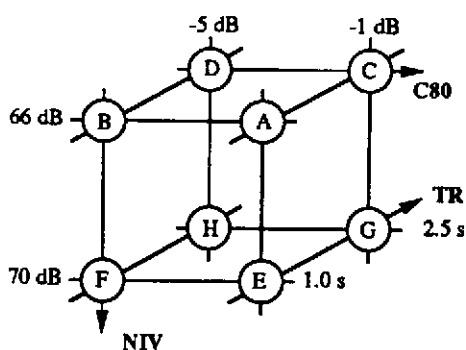
- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteurs 1 et 2: complexe C 80 - TR

Facteur 3: faible - énergétique - NIV

NIV3 BRYN

- § 4.4.1 et 4.5.1
- Caractéristiques objectives des configurations:



• NOMBRE DE DIMENSIONS: 4

 Variance expliquée R**2: 0.845020e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3	4
0.6536e+00	0.7224e-01	0.7020e-01	0.4898e-01

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: $S_{II'}$

1	0.100e+01			
2	0.881e+00	0.100e+01		
3	0.753e+00	0.723e+00	0.100e+01	
4	0.866e+00	0.859e+00	0.522e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: $S_{II'}^*$

1	0.100e+01			
2	0.170e+00	0.100e+01		
3	-0.382e+00	0.124e+00	0.100e+01	
4	0.274e+00	-0.795e-01	-0.791e-01	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *réverbérant - sec - TR*

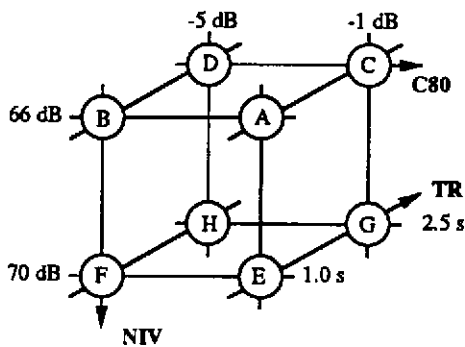
Facteur 2: *absent - présent - ZDIR*

Facteur 3: *faible - énergique - NIV*

Facteur 4: *net - brouillé - C 80*

NIV3 MATUZ

- § 4.4.1 et 4.5.1
- Caractéristiques objectives des configurations:



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 4

Variance expliquée R**2: 0.828639e+00
 - Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension
- | | | | |
|------------|------------|------------|------------|
| 1 | 2 | 3 | 4 |
| 0.4205e+00 | 0.1706e+00 | 0.1540e+00 | 0.8354e-01 |

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: $S_{i'}$

1	0.100e+01			
2	0.838e+00	0.100e+01		
3	0.914e+00	0.689e+00	0.100e+01	
4	0.737e+00	0.470e+00	0.714e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: $S_{i'}$ *

1	0.100e+01			
2	0.597e+00	0.100e+01		
3	0.800e-01	-0.155e+00	0.100e+01	
4	0.323e+00	0.492e+00	0.997e-01	0.100e+01

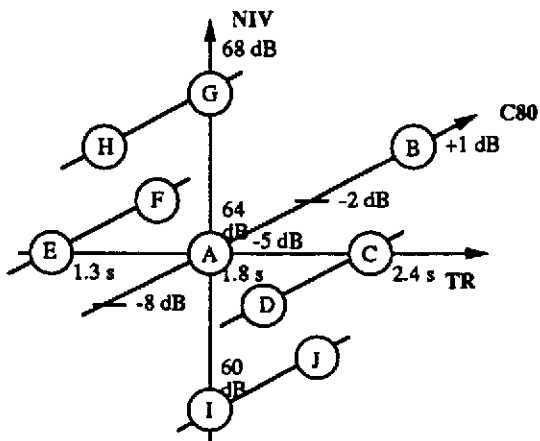
- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *réverbérant - sec - TR*
 Facteur 2: *brouillé - net - C80*
 Facteur 3: *faible - énergique - NIV*
 Facteur 4: *absent - présent - ZDIR*

NIV4 BRYN

- § 4.4.2.2 et 4.5.2

- Caractéristiques objectives des configurations:



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 4

Variance expliquée R**2: 0.636725e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3	4
0.2535e+00	0.1582e+00	0.1152e+00	0.1099e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ir}

1	0.100e+01			
2	0.796e+00	0.100e+01		
3	0.877e+00	0.799e+00	0.100e+01	
4	0.784e+00	0.757e+00	0.813e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ir}^*

1	0.100e+01			
2	0.261e+00	0.100e+01		
3	-0.390e-01	0.362e+00	0.100e+01	
4	-0.302e+00	-0.258e+00	-0.946e-01	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *énergique - faible - NIV*

Facteur 2: *réverbérant - sec - TR*

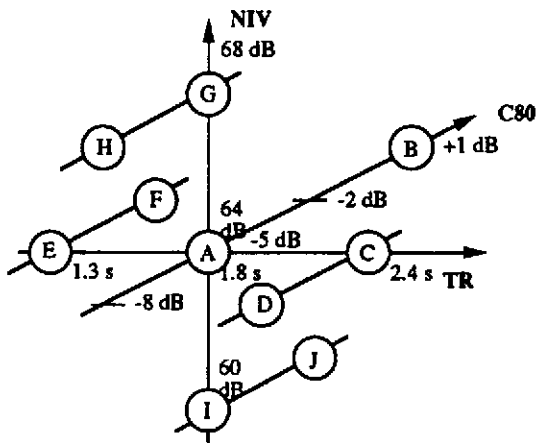
Facteur 3: *absent - présent - ZDIR*

Facteur 4: *net - brouillé - C 80*

NIV4 MATUZ

- § 4.4.2.1

- Caractéristiques objectives des configurations:



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 2

Variance expliquée R**2: 0.523975e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2
0.3354e+00	0.1885e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: $S_{i'}$

1	0.100e+01	
2	0.890e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: $S_{i'}$ *

1	0.100e+01	
2	-0.809e-01	0.100e+01

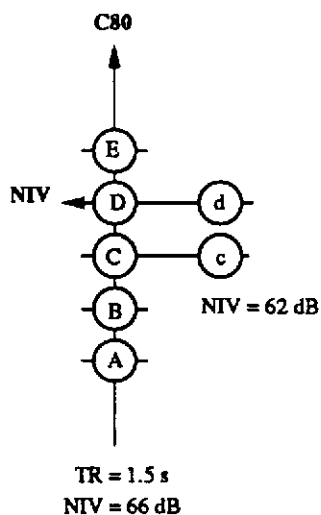
- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteurs 1 et 2: combinaisons linéaires des facteurs liés aux critères
NIV et complexe *TR - C 80*.

CLAR1

- § 5.1.1

- Caractéristiques objectives des configurations:



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 3

Variance expliquée R**2: 0.767453e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3
0.5348e+00	0.1197e+00	0.1130e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01		
2	0.698e+00	0.100e+01	
3	0.728e+00	0.708e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01		
2	0.347e+00	0.100e+01	
3	-0.130e+00	-0.254e+00	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *net - brouillé - C 80*

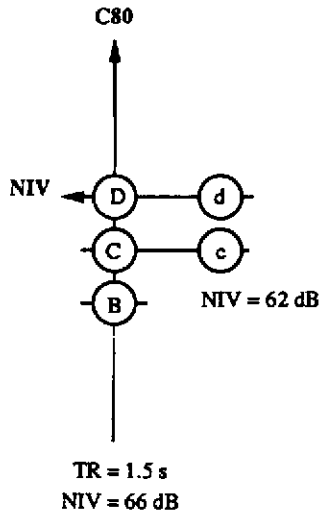
Facteur 2: *présent - absent - ZDIR*

Facteur 3: *lointain - proche - ZDIR*

CLAR1

- § 5.2.1

- Caractéristiques objectives des configurations:



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 3

 Variance expliquée R**2: 0.807020e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3
0.3821e+00	0.2468e+00	0.1781e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01		
2	0.457e+00	0.100e+01	
3	0.456e+00	0.643e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01		
2	0.486e+00	0.100e+01	
3	0.299e+00	0.471e-01	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *brouillé - net - C 80*

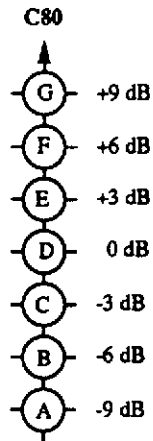
Facteur 2: *faible - énergique - NIV*

Facteur 3: *cassure dans la perception de la clarté*
substitution sur le facteur réverbérant - sec

CLAR2

- § 5.5.2

- Caractéristiques objectives des configurations:



TR = 1.5 s
NIV = 62 dB

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 3

Variance expliquée R**2: 0.835485e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3
0.5992e+00	0.1246e+00	0.1117e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{it}

1	0.100e+01		
2	0.729e+00	0.100e+01	
3	0.719e+00	0.826e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{it}^*

1	0.100e+01		
2	0.458e+00	0.100e+01	
3	0.429e+00	0.346e-01	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *net - brouillé - C 80*

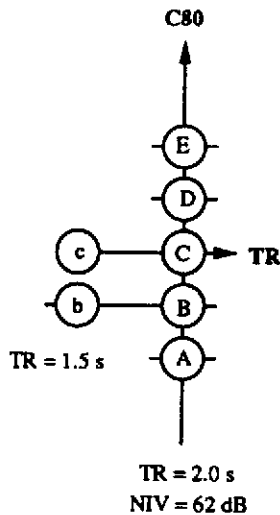
Facteur 2: *proche - lointain - ZDIR*

Facteur 3: *présent, sec - absent, réverbérant - ZDIR, TR*

CLAR3

- § 5.1.2

- Caractéristiques objectives des configurations:



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 3

Variance expliquée R**2: 0.843489e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3
0.4950e+00	0.2005e+00	0.1480e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01		
2	0.909e+00	0.100e+01	
3	0.914e+00	0.873e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01		
2	0.549e+00	0.100e+01	
3	-0.191e+00	-0.120e+00	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *absent, réverbérant - présent, sec - ZDIR, TR*

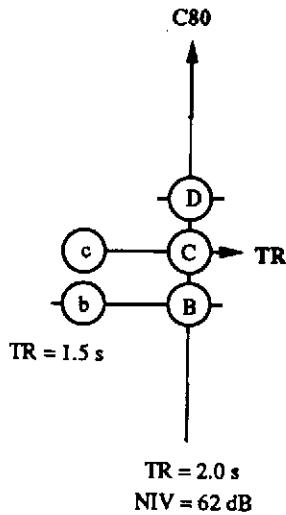
Facteur 2: *brouillé - net - C 80*

Facteur 3: *lointain - proche - ZDIR*

CLAR3

- § 5.2.2

- Caractéristiques objectives des configurations:



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 3

Variance expliquée R**2: 0.870062e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3
0.5228e+00	0.2230e+00	0.1242e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: $S_{i,r}$

1	0.100e+01		
2	0.841e+00	0.100e+01	
3	0.551e+00	0.634e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: $S_{i,r}^*$

1	0.100e+01		
2	0.514e+00	0.100e+01	
3	0.709e-01	0.126e+00	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *absent, réverbérant - présent, sec - ZDIR, TR*

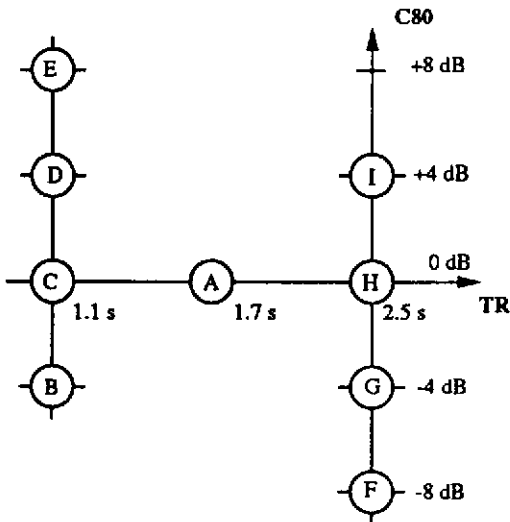
Facteur 2: *brouillé - net - C 80*

Facteur 3: *sec - réverbérant - TR*

CLAR4

- § 5.2.3 et 5.5.3

- Caractéristiques objectives des configurations: $NIV = 70$ dB.



- NOMBRE DE DIMENSIONS: 3

Variance expliquée R**2: 0.740358e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3
0.3280e+00	0.2607e+00	0.1516e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01		
2	0.854e+00	0.100e+01	
3	0.883e+00	0.855e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01		
2	0.553e+00	0.100e+01	
3	-0.222e+00	-0.214e+00	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

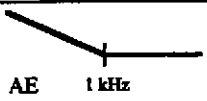
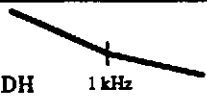
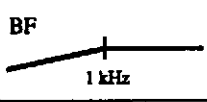
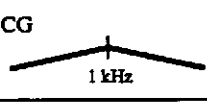
Facteur 1: *réverbérant - sec - TR*

Facteur 2: *brouillé - net - C 80*

Facteur 3: *proche - lointain - ZDIR*

TIMBTR

- § 6.2.2
- Caractéristiques objectives des configurations:

	TR = TR 8 kHz 1 kHz	TR = TR + 1.5 8 kHz 1 kHz	TR 1 kHz		
TR _{63 Hz} = 2 × TR _{1 kHz}			AE 1 kHz	DH 1 kHz	AB CD 2.5 s
TR _{63 Hz} = TR + 1.5 1 kHz			BF 1 kHz	CG 1 kHz	EF GH 1.5 s

Caractéristiques des configurations du test TIMBTR.

NIV = 70 dB, *C80* = 0 dB à 1000 Hz.

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 4

Variance expliquée R**2: 0.680307e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1 2 3 4
0.2584e+00 0.1787e+00 0.1477e+00 0.9550e-01

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

```

1  0.100e+01
2  0.836e+00  0.100e+01
3  0.659e+00  0.594e+00  0.100e+01
4  0.637e+00  0.465e+00  0.450e+00  0.100e+01
    
```

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

```

1  0.100e+01
2  0.497e+00  0.100e+01
3  0.308e+00  0.149e+00  0.100e+01
4  0.128e+00  0.180e+00 -0.176e-01  0.100e+01
    
```

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *vivant - sec* - TR aigus

Facteur 2: *sec - réverbérant* - TR


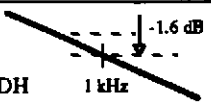
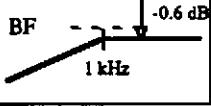

Facteur 3: *acide* - TR excès d'aigus

Facteur 4: *intime - neutre* - TR graves

TIMBNV

- § 6.2.1

- Caractéristiques objectives des configurations:

	NIV = NIV 8 kHz 1 kHz	NIV = NIV - 5 dB 8 kHz 1 kHz	TR 1 kHz
NIV _{63 Hz} = NIV + 5 dB 1 kHz			A B C D 1.6 s
NIV _{63 Hz} = NIV - 5 dB 1 kHz			E F G H 2.4 s

Caractéristiques des configurations du test TIMBNV.

C 80 = 0 dB, NIV = 70 dB.

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 4

Variance expliquée R**2: 0.694611e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3	4
0.3198e+00	0.1504e+00	0.1233e+00	0.1011e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01			
2	0.861e+00	0.100e+01		
3	0.705e+00	0.656e+00	0.100e+01	
4	0.452e+00	0.501e+00	0.474e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01			
2	0.338e-01	0.100e+01		
3	0.389e+00	0.215e+00	0.100e+01	
4	0.127e+00	0.313e-01	0.165e+00	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *pauvre - brillant - NIV aigus*

Facteur 2: *chaud - creux - NIV graves*

Facteur 3: *lourd - NIV excès de graves*

Facteur 4: *sec - réverbérant - TR*

TIMBDS

- § 6.1.1

- Caractéristiques objectives des configurations:

			Dir REF 10 ms 80 ms	Dir REF 35 ms	Dir REF 60 ms
Dir	REF	C80			
61 dB	64 dB	0 dB	A	D	G
62 dB	62 dB	-2 dB	B	E	H
63 dB	63 dB	0 dB	C	F	I

Caractéristiques objectives des configurations du test TIMBDS.

$TR = 1.6$ s, $NIV = 69$ dB.

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 4

Variance expliquée R**2: 0.479733e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3	4
0.1290e+00	0.1283e+00	0.1184e+00	0.1040e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01			
2	0.661e+00	0.100e+01		
3	0.573e+00	0.817e+00	0.100e+01	
4	0.667e+00	0.869e+00	0.754e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01			
2	-0.458e-01	0.100e+01		
3	0.283e+00	0.350e-02	0.100e+01	
4	0.106e+00	0.683e-01	0.693e-01	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *coulant - heurté - Tcp*

Facteur 2: *doux - dur - ETA*

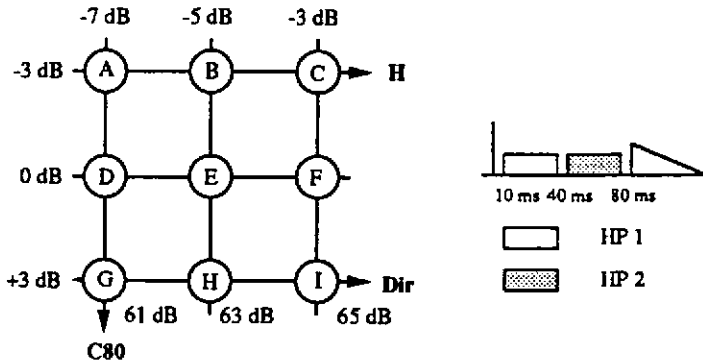
Facteur 3: *net - brouillé - C 80*

Facteur 4: *contrasté - plat - Dir / REF*

SPACE1

- § 5.5.1 et 7.1

- Caractéristiques objectives des configurations:



Caractéristiques objectives des configurations
du test SPACE1.

$NIV = 70 \text{ dB}$, $TR = 1.6 \text{ s}$.

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 4

Variance expliquée R**2: 0.652664e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3	4
0.2213e+00	0.2040e+00	0.1315e+00	0.9581e-01

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: $S_{II'}$

1	0.100e+01			
2	0.842e+00	0.100e+01		
3	0.934e+00	0.864e+00	0.100e+01	
4	0.676e+00	0.519e+00	0.579e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: $S_{II'}^*$

1	0.100e+01			
2	-0.449e+00	0.100e+01		
3	-0.301e+00	0.234e+00	0.100e+01	
4	-0.621e-01	0.201e-01	-0.654e-01	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *plat - contrasté - Dir/REF*

Facteur 2: *brouillé - net - C 80*








Facteur 3: *impression d'espace - Lf*

Facteur 4: *lointain - proche - ZDIR*

SPACE2

- § 7.2

- Caractéristiques objectives des configurations:

		C80		
		-3 dB	0 dB	+3 dB
 HP 1  HP 2	(A)	(B)	(C)	
 HP 2  HP 3	(D)	(E)	(F)	
 HP 3  HP 4-5	(G)	(H)	(I)	

Caractéristiques objectives des configurations
du test SPACE2.

$NIV = 70$ dB, $TR = 1.6$ s.

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 4

Variance expliquée R**2: 0.625806e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3	4
0.3509e+00	0.1096e+00	0.8450e-01	0.8073e-01

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01			
2	0.800e+00	0.100e+01		
3	0.613e+00	0.581e+00	0.100e+01	
4	0.717e+00	0.782e+00	0.521e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01			
2	0.238e+00	0.100e+01		
3	-0.270e+00	-0.142e+00	0.100e+01	
4	-0.179e+00	-0.896e-01	0.834e-01	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *brouillé - net - C 80*

Facteur 2: *impression d'espace - Lf*

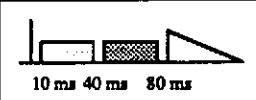

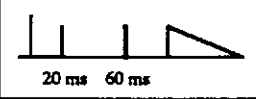

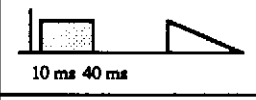

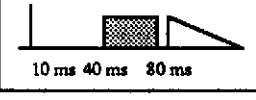

Facteur 3: *largeur de la source - ANG*

Facteur 4: *lointain - proche - ZDIR*

SPACE3

- § 6.1.2 et 7.3

- Caractéristiques objectives des configurations:

		HP 1 (A)	HP 2 (B)
		HP 1 (C)	HP 2 (D)
		HP 1 (E)	HP 2 (F)
		HP 2 (G)	HP 3 (H)

Caractéristiques objectives des configurations du test SPACE3.

$C_{80} = 0$ dB, $NIV = 70$ dB, $TR = 1.6$ s.

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 5

Variance expliquée R**2: 0.631018e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3	4	5
0.2273e+00	0.1078e+00	0.1021e+00	0.1015e+00	0.9231e-01

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{ij}

1	0.100e+01				
2	0.572e+00	0.100e+01			
3	0.641e+00	0.527e+00	0.100e+01		
4	0.629e+00	0.527e+00	0.445e+00	0.100e+01	
5	0.685e+00	0.481e+00	0.702e+00	0.638e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{ij}^*

1	0.100e+01				
2	0.206e+00	0.100e+01			
3	0.260e-01	0.540e-02	0.100e+01		
4	-0.528e-01	-0.738e-01	-0.968e-01	0.100e+01	
5	-0.745e-01	-0.155e+00	0.101e+00	-0.100e+00	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *impression d'espace - Lf*

Facteur 2: *heurté - coulant - Tcp*

Facteur 3: *largeur de la source - ANG*

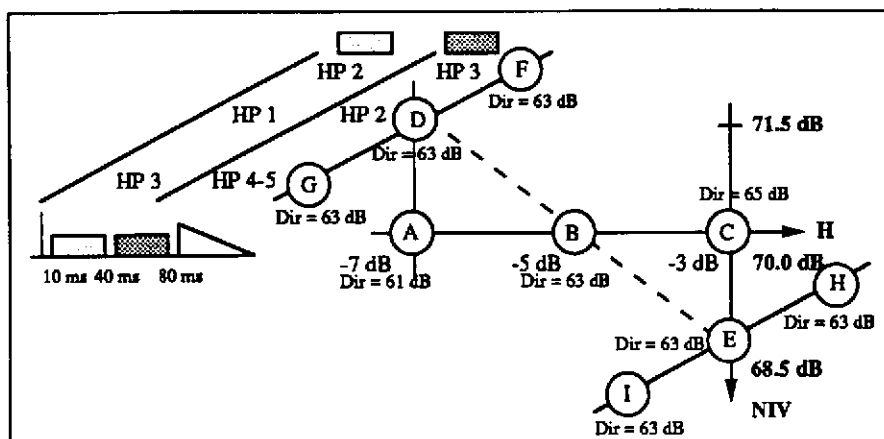
Facteur 4: *lointain - proche - ZDIR*

Facteur 5: *plat - contrasté - Dir/REF*

SPACE4

- § 7.4

- Caractéristiques objectives des configurations:



Caractéristiques des configurations du test SPACE4.

$C_{80} = 0$ dB, $TR = 1.6$ s.

- NOMBRE DE DIMENSIONS: 3

Variance expliquée R^{*2} : 0.537435e+00

Estimation du % de la variance expliquée par chaque dimension

1	2	3
0.2578e+00	0.1762e+00	0.1035e+00

- Corrélations entre poids des sujets sur les axes: S_{if}

1	0.100e+01		
2	0.833e+00	0.100e+01	
3	0.775e+00	0.755e+00	0.100e+01

- Corrélations entre coordonnées des stimuli sur les axes: S_{if}^*

1	0.100e+01		
2	-0.318e+00	0.100e+01	
3	-0.257e+00	0.256e+00	0.100e+01

- Interprétation proposée des facteurs perceptifs:

Facteur 1: *faible - énergétique - NIV*

Facteur 2: *impression d'espace - Lf*

Facteur 3: *proche - lointain - ZDIR*

- [12] D.A. BERKLEY; paru dans le livre "Acoustical factors affecting hearing aid performance" de G.A. Studebaker & I. Hochberg; University park press, Baltimore, 1980, p.3-24.
- [13] W. REICHARDT & W. SCHMIDT; "Die Hoerbaren Stufen des Raumeindruckes bei Musik"; *Acustica*, vol. 17, 1966, p. 175-179.
- [14] W. REICHARDT & U. LEHMANN; "Raumeindruck als Oberbegriff von Raumlichkeit und Halligkeit, Erlauterung des Raumeindrucksmasses"; *Acustica*, vol. 40, 1978, p. 277-290.
- [15] M. BARRON & A.H. MARSHALL; "Spatial impression due to early lateral reflections in concert halls: the derivation of a physical measure"; *J.S.V.*, vol. 77-2, 1981, p. 211-232.
- [16] V.L. JORDAN; "Acoustical design of concert halls and theatres"; Applied science publishers, London, 1980.
- [17] P. DAMASKE; "Subjective Untersushung von Schallfeldern"; *Acustica*, vol. 19, 1967-68, p. 199-213.
- [18] J.P. JULLIEN; "Correlation among objective criteria of room acoustic quality"; ICA 1986.
- [19] M. BARRON; "Subjective study of british symphony concert halls"; *Acustica*, vol. 66, Juin 1988, p. 1-14.
- [20] J.P. JULLIEN, A. GILLOIRE & A. SALIOU; "Mesure des réponses impulsionnelles en acoustique des salles"; Note technique du CNET n° NT/LAA/TSS/181, Novembre 1984.
- [21] D. PASCAL; "Analyse de données perceptives par les méthodes d'évaluation multidimensionnelles ou analyse des proximités: La méthode individuelle INDSCAL"; Rapport CNET n° NT/LAA/TSS/231, 1984.
- [22] J.D. CARROLL & J.J. CHANG; "Analysis of individual differences in multidimensional scaling via an N-Way Generalisation of "Ekart-Young" decomposition"; *Psychometrika*, vol. 35, 1970, p. 283-319.

10. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] J.P. JULLIEN; "Qualité acoustique d'une salle"; Document de cours disponible à l'IRCAM, Octobre 1985.
- [2] L.L. BERANEK; "Music, acoustics and architecture"; Robert E. Krieger publishing co., inc., New York, 1962.
- [3] L. CREMER & H.A. MULLER; "Pinciples and applications of room acoustics"; traduit par T.J. Schultz, Applied science publishers, London and New York, 1978, p. 547-591.
- [4] P. DAMASKE; "Head-related two-channel stereophony with loudspeaker reproduction"; J.A.S.A., vol. 50, 1971, p. 1109.
- [5] M.R. SCHROEDER, D. GOTTLÖB & K.F. SIEBRASSE; "Comparative study of european concert halls: correlation of subjective preference with geometric and acoustic parameters"; J.A.S.A., vol. 56, 1974, p. 1195-1201.
- [6] H. WILKENS; *Acustica*, vol. 38, 1977, p. 10.
- [7] P. LEHMANN & H. WILKENS; "Zusammemhang Subjektiever Beurteilungen von Konzertsaelen mit raumakustischen Kriterien"; *Acustica*, vol. 45, 1980, p. 256-268.
- [8] J.P.A. LOCHNER & J.F. BURGER; "The intelligibility of speech under reverberant conditions"; *Acustica*. vol. 11, 1961, p. 195-200.
- [9] H.J.M. STEENEKEN & T. HOUTGAST; "A physical method for measuring speech-transmission quality"; rapport du TNO n° IZF 1979-1.
- [10] R. PLOMP; "Aspects of tone sensation"; Academic press, inc., London, 1976.
- [11] D.L. WESSEL; "Timbre space as a musical control structure"; *Computer music journal*, vol. 3(2), p. 45-52.

- [23] J. DE LEEUW & J. MEULMAN;; "A special jackknife for multidimensional scaling"; *Journal of classification*, vol. 3, 1986, p. 97-112.
- [24] S. WINSBERG & J.D. CARROLL; "Parametric mapping with tensor product splines"; Invited paper in proceedings of the SMABS-88 conference FPPSW, University of G onningen, 1988.
- [25] K. CHEMLA (sous la direction de); "D emarches math ematiques"; *Encyclop edie philosophique*, Presses universitaires de France,   para tre.
- [26] J. BLAUERT; "Spatial hearing"; traduit par J.S. Allen, The MIT Press, London, 1974.
- [27] CNET; "Octave band measurements for group audio terminal"; Contribution CCITT com. XII/2, Gen ve, Janvier 1988.
- [28] J.P.A. LOCHNER & J.F. BURGER; "The subjective masking of short time delayed echoes by their primary sounds and their contribution to the intelligibility of speech"; *Acustica*, vol. 8, 1958, p. 1-10.
- [29] S.S. SCHIFFMAN, M. LANCE REYNOLDS & F.W. YOUNG; "Introduction to multidimensional scaling: theory, methods and applications"; Academic press, inc., 1981.
- [30] C.M. GARIEL; "L'acoustique des salles. Am eliorations produites par l'emploi de fils de coton"; *La Nature, revue des sciences*, Ed. Masson, Paris, vol. 213, Juin 1877
- [31] A. LOOS; "Paroles dans le vide - Malgr  tout"; Ed. champ libre, Paris, r edition 1979.

TABLE DES MATIERES

1. ETAT DES CONNAISSANCES.....	5
1.1 Préférences	6
1.2 Facteurs perceptifs	8
1.3 Critères objectifs.....	10
1.3.1 Force sonore.....	11
1.3.2 Clarté	11
1.3.2.1 Rapport signal sur bruit.....	11
1.3.2.2 Indice de transfert de modulation.....	12
1.3.3 Timbre	12
1.3.4 Impression d'espace.....	13
1.3.4.1 Distance de réverbération.....	13
1.3.4.2 Indice de spatialisation.....	13
1.3.4.3 Fraction d'énergie latérale précoce.....	14
1.3.4.4 Efficacité latérale	14
1.3.4.5 Coefficient de cohérence.....	14
1.4 Corrélations entre critères.....	15
1.5 Objectifs de la recherche.....	18
2. METHODE EXPERIMENTALE	21
2.1 Système de construction des champs sonores	21
2.2 Réglage des configurations.....	22
2.2.1 Réglage des périphériques	23
2.2.2 Mesures des différents critères objectifs.....	24
2.3 Sujets soumis aux tests.....	24
2.4 Procédure des tests	24
2.5 Nomination des facteurs perceptifs.....	26
3. METHODE D'ANALYSE.....	27
3.1 Analyse INDSCAL.....	27
3.2 Nombre de dimensions.....	32
3.2.1 Variance expliquée.....	32
3.2.2 Jackknife.....	33
3.3 Conclusions sur l'analyse et l'interprétation des tests	34
3.3.1 Nombre de dimensions	34
3.3.2 Pourcentage de variance par axe.....	34
3.3.3 Distances interconfigurations.....	35

3.3.4	Dispersion de sujets	35
3.3.5	Projections de critères.....	35
3.3.6	Corrélations entre coordonnées des configurations sur les axes	35
3.3.7	Nomination des facteurs	36
4.	ETUDE QUALITATIVE DU NIVEAU SONORE.....	37
4.1	Réglage du niveau sonore	37
4.2	Niveau - temps de réverbération: NIV1	38
4.3	Niveau - Temps de réverbération couplé à la clarté: NIV2	42
4.4	Niveau - Clarté - Temps de réverbération découplés	45
4.4.1	Test NIV3.....	45
4.4.2	Test NIV4.....	49
4.4.2.1	Analyses en deux dimensions	50
4.4.2.2	Analyse de NIV4 BRYN en quatre dimensions	51
4.5	Nomination des axes de niveau	54
4.5.1	Test NIV3.....	55
4.5.2	Test NIV4.....	56
4.6	Conclusion concernant le niveau	57
5.	ETUDE QUALITATIVE DES CRITERES C80 ET TR	58
5.1	Enoncé du problème dû au critère C80.....	58
5.1.1	Clarté - niveau: CLAR1.....	59
5.1.2	Clarté - temps de réverbération: CLAR3.....	62
5.2	Suppression des grandes dissimilarités	64
5.2.1	Clarté et niveau: CLAR1	64
5.2.2	Clarté et temps de réverbération: CLAR3	65
5.2.3	Clarté et temps de réverbération: CLAR4	66
5.2.4	Etude locale des distances et angulations entre configurations.....	68
5.3	Ecoute descriptive des qualités acoustiques des configurations	70
5.4	Substitutions entre les variations de critères C80 et TR.....	70
5.4.1	Réduction du nombre de dimensions sous-jacentes	71
5.4.2	Quantification de la substitution entre les critères TR et C80.....	74
5.5	Relation entre les variations des critères C80 et Dir	80
5.5.1	SPACE1.....	80
5.5.2	CLAR2	84
5.5.3	CLAR4	85
5.6	Conclusion concernant la clarté	86
6.	EFFETS DE COLORATION	87

6.1	Coloration due à la répartition des premières réflexions	87
6.1.1	TIMBDS	87
6.1.2	SPACE3.....	90
6.2	Coloration due aux valeurs de critères en fonction des fréquences	94
6.2.1	Coloration due à la réponse en fréquence: TIMBNV	94
6.2.2	Coloration due aux valeurs de temps de réverbération par octave.....	99
6.2.3	Ecoute et nomination des facteurs de coloration.....	102
7.	EFFETS DE SPATIALISATION.....	103
7.1	SPACE1	104
7.2	SPACE2	104
7.3	SPACE3	108
7.4	SPACE4	110
8.	ETUDE QUANTITATIVE	114
8.1	Comparaison entre tests.....	114
8.1.1	Comparaison entre chambre sourde et casque.....	114
8.1.2	Comparaison entre tests.....	116
8.2	Calculs des coefficients et quantification des facteurs.....	117
8.2.1	Le niveau sonore NIV	117
8.2.2	Le temps de réverbération TR.....	120
8.2.3	La clarté C80.....	122
8.2.4	Coefficients d'ajustement.....	124
8.2.5	Critères de coloration.....	125
8.2.6	Critères de spatialisation.....	126
8.3	Seuil de discrimination	126
8.3.1	Critère ETA.....	127
8.3.2	Critère ANG	127
9.	CONCLUSION.....	128
9.1	Résumé.....	128
9.2	Etudes complémentaires	129
9.2.1	Comparaison des résultats avec ceux de la littérature.....	129
9.2.2	Etudes psychoacoustiques.....	129
9.2.3	Préférences	130
9.3	Projets d'application	132
10.	REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	162

ANNEXE 1.....	134
ANNEXE 2.....	140
ANNEXE 3.....	142
ANNEXE 4.....	143



RESUME

Afin de valider perceptivement certains critères objectifs utilisés pour caractériser la qualité acoustique des salles, des tests psychoacoustiques, portant sur l'écoute de configurations artificielles pour lesquelles les valeurs des critères étaient maîtrisées, ont été analysées par la méthode multidimensionnelle INDSCAL.

Les relations qui lient les facteurs perceptifs et les critères objectifs sont détaillées, permettant ainsi de sélectionner les critères objectifs pertinents. Les facteurs sur lesquels sont perçues les variations de ces différents critères, sont nommés a posteriori. Leurs importances respectives sont comparées en proposant une estimation quantitative des distances perçues pour des variations unitaires des critères objectifs correspondants.

Mots clés

Acoustique des salles, Analyse multidimensionnelle INDSCAL, Critères objectifs, Facteurs perceptifs, Seuils de discrimination.