

INTÉGRATION DU RETARD DE RÉFLEXION À L'ÉTUDE DE L'ACOUSTIQUE DES SALLES

par

K. VAJK

Chaire de Géométrie Descriptive, Université Technique de Budapest

Accepté le 15 octobre 1976

1. Introduction

Au cours du développement de la théorie de l'acoustique des salles on a introduit plusieurs notions pour caractériser l'acoustique des locaux fermés, comme la durée de réverbération, la diffusion, la netteté du son, etc. Des autorités comme *L. L. Beranek* et ses collaborateurs, ont proposé — en se basant sur l'opinion subjective d'un grand nombre d'auditeurs — l'emploi du paramètre nommé par eux *intervalle du retard temporel initial* (initial time delay gap) pour qualifier les salles.

Au lieu de traduire littéralement cette notion, nous la nommerons *retard de réflexion* tout court; ce terme marque la différence de temps, dans une salle fermée, entre la perception du son *direct* venant de la source sonore, et celle de la première *réflexion* venant des surfaces limites. Les expériences faites par Beranek ont montré que — toutes autres conditions égales — les auditeurs qualifient le retard de réflexion de $\Delta r = 18$ milsec le plus favorable. Pour $\Delta r < 5$ milsec le son direct et la réverbération se confondent, pour $\Delta r > 50$ milsec les deux sons se séparent perceptiblement. Dans les deux cas, l'effet subjectif est désagréable.

1.1 En acceptant ces résultats publiés, nous avons étudié en ce qui suit quelques formes d'espace et dimensions de salles uniquement pour déterminer les lieux géométriques des points où le retard de réflexion est le plus favorable, ensuite des points où ce paramètre est encore admissible; enfin nous voulons examiner la possibilité d'avoir un espace causant par sa forme un retard de réflexion optimal dans tous les points de la »surface d'audition« (pour des raisons pratiques nous avons choisi $\Delta r = 20$ milsec pour la construction).

Les études se basaient sur la loi physique qu'en *circonstances idéales* le son se propage longitudinalement et à vitesse constante.

Quoiqu'on sache qu'à vrai dire, il n'existe pas d'espace architectural où ces conditions (milieu homogène) soient absolument remplies, il paraît pourtant utile de choisir pour l'étude de la question un espace simplifié, fictif, si — dans la conclusion — on tiendra compte de cet écart.

Nous utiliserons également la loi connue de l'optique, et l'appliquerons à l'acoustique, que les rayons (lumineux) se propageant longitudinalement se réfléchissent d'une surface plane comme si la source des rayons réfléchés était l'image de la source de rayonnement, par rapport au plan. Quoique cette loi — de manière analogue à 1) — ne soit valable dans l'acoustique que sous certaines conditions, nous en ferons pourtant usage dans nos considérations parce que l'erreur qui en résulte est encore restreinte à la *première* réverbération — la seule qui nous intéresse ici.

2. Les lieux géométriques des points au retard de réflexion égal

Quel est donc le lieu géométrique dans un espace à la forme définie des points dont le retard de réflexion est identique et égal à 20 ms, jugé le plus favorable au cours des essais ?

2.1 Pour simplifier l'examen, on le fera d'abord dans un espace non fermé. Soit une seule surface murale plane réfléchissante. Situons la source sonore 10 m du mur (Fig. 1). La rotation de la figure autour de l'axe t donnera des données spatiales.

Le lieu géométrique des points recherchés sera l'une des nappes d'un hyperboloïde de rotation à deux nappes. L'un des points focaux de l'hyperboloïde est la source sonore H , l'autre l'image H_1 de la source sonore relative à la surface murale. Le rayon de la contre-sphère de l'hyperboloïde a 6,8 m de long (le trajet du son en 20 ms).

Ceci correspond à la définition que l'hyperboloïde de révolution est le lieu géométrique de points, la différence des distances (des rayons vecteurs) desquels de deux points donnés (des points focaux) est constante (égale au rayon de la contre-sphère):

$$|v_2 - v_1| = R .$$

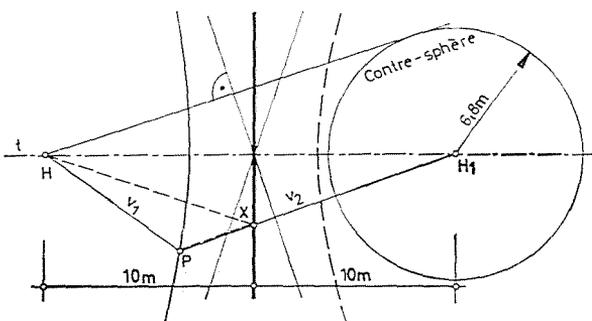


Fig. 1

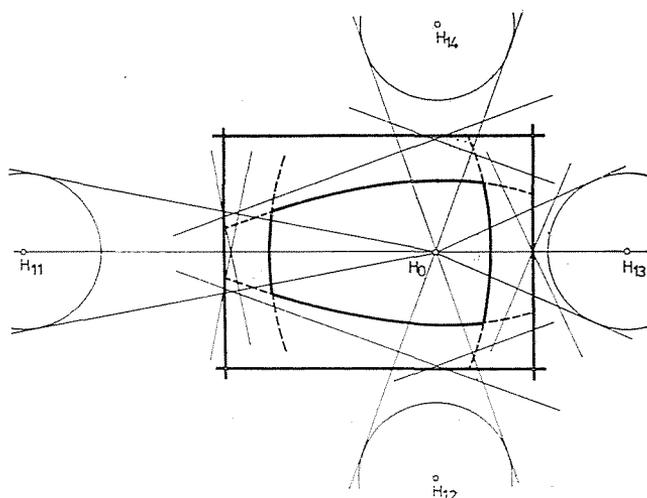


Fig. 2

Par exemple, à un point quelconque de l'hyperboloïde le son direct arrive en franchissant un chemin $HP = v_1$, tandis que le son réfléchi, en franchissant le chemin $HX + XP$, marqué sur la figure en trait discontinu. Mais en conséquence de la loi du réfléchissement le chemin en trait discontinu est égal au tronçon $H_1P = v_2$ ($HX = H_1X$). La différence des trajets du son direct et du son réfléchi est donc de $v_2 - b_1 = 6,8$ m, excès nécessitant pour être parcouru exactement 20 milsec.

Étant donné que P était un point quelconque de l'hyperboloïde, notre affirmation est justifiée. Dans ce qui suit nous appellerons ces lieux géométriques, produits par des surfaces murales, des *hyperboloïdes de retard de réflexion*. Des lieux géométriques appartenant à d'autres retards de réflexion, p.e. de 30 ms ou 40 ms, donnent des hyperboloïdes confocaux au précédent, aux rayons de contre-sphère de 10,2 m et 13,6 m (trajets parcourus par le son en 30 ms ou 40 ms).

2.2 Voyons maintenant, comment le lieu géométrique précisé s'organisera-t-il dans un espace fermé? La Fig. 2 montre la vue en plan d'un espace oblong, la source sonore H , disposée au niveau de la tête des auditeurs (*surface d'audition*), et la coupure par un plan horizontal dans la hauteur de la source sonore des quatre hyperboloïdes, construits sur les murs verticaux. En faisant abstraction pour le moment du plafond (supposons-le revêtu d'un matériau parfaitement absorbant), on trouve que le retard de réflexion n'approchera la valeur optimale de 20 ms que dans la région des quatre hyperboles.

On recevra un résultat quelque peu plus favorable en mettant à profit également le pouvoir réflecteur du plafond. On voit bien sur la Fig. 3 —

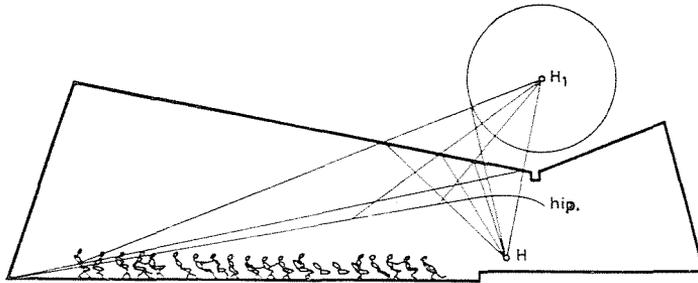


Fig. 3

représentant la coupe longitudinale d'une salle au plafond en plan incliné — les points où le plan formé par les têtes des auditeurs, d'une part, et la bande de surface correspondant au retard de réflexion optimal, d'autre part, s'approchent.

3. Étude d'un plafond spécial au retard de réflexion optimal

3.1 L'enseignement tiré de la Fig. 3 a suggéré l'idée de chercher à construire une surface de plafond assurant à tous les auditeurs le retard de réflexion le plus favorable.

La condition que la surface recherchée ne peut pas être une *surface géométrique composée*, imposerait de suivre les lois exactes de la géométrie, et il serait impossible de satisfaire à d'autres exigences, surtout architecturales (esthétiques, fonctionnelles, visuelles). Pour l'instruction du lecteur nous présentons donc une construction tenant compte uniquement des exigences géométriques. La Fig. 4 montre la projection orthogonale d'une des nappes d'un hyperboloïde de rotation à deux nappes dont les points focaux sont H et F , et dont t est l'axe réel et k l'axe imaginaire.

Soient sur le plan du dessin H le lieu de la source sonore, t situé également sur le plan du dessin, l'axe d'un plafond en forme d'hyperboloïde et k la projection verticale de la surface d'audition (plan K). Le rayon du contre-cercle avec le centre H a $HU = 6,80$ m de long (à l'échelle du dessin 1 : 200); c'est le parcours correspondant au retard de réflexion le plus favorable. Comme on l'a déjà vu, la différence des trajets de la première réflexion et du son direct doit avoir justement cette valeur pour que le retard de réflexion soit égal à 29 ms.

Le son réfléchi arrive au point K_1 (un point quelconque de la surface d'audition) par le chemin $HV + VK_1$. Le trajet du son direct est le tronçon HK_1 . La différence des parcours est $\Delta L = HV + VK_1 - HK_1$.

Il est à démontrer que $\Delta L = HU$.

$$\Delta L = HK_1 + 6,8 - HK_1$$

on aura $\Delta L = 6,8$ m, égal à la différence de parcours désirée.

Par la suite nous avons construit encore sept ellipses en coupe, de manière que leur point focal de gauche commun soit H et leurs points focaux de droite soient consécutivement: $K_2, K_3 \dots K_8$. Naturellement, les rayons des cercles directeurs des ellipses sont différents les uns des autres: $6,8 \times HK_2$; $6,8 + HK_3$, etc.

Pour tirer les conclusions de ces expériences, en construisant la coupe du plafond, l'architecte doit apporter une grande attention à faire entrer toutes les ellipses — autant que possible — dans la coupe. La figure en présente un exemple. Il est d'ailleurs mieux de remplacer les arcs d'ellipse par leurs cordes dans la coupe parce que, de cette façon, les réflexions — au lieu de se concentrer dans les points K_1, K_2, K_3 , etc. — seront réparties plus uniformément le long de la droite K . Il sera pratique de construire la « radiation » d'une ellipse à l'ellipse voisine de manière que le tronçon de jonction ne soit atteint par aucun son direct.

Voyons maintenant, — partant du plan de symétrie mentionné ci-dessus — par quel ensemble de surfaces l'espace doit-il être couvert, pour que les conditions remplies en coupe soient remplies également dans l'espace. Théoriquement, la solution juste sera de tourner les cordes d'ellipse de la coupe autour de l'axe vertical t , passant par H ; la conception du plafond partira des surfaces coniques obtenues.

Dans une solution (théoriquement moins exacte), permettant une construction, un calcul statique et des travaux d'exécution plus simples, on fait glisser les cordes d'ellipse en direction perpendiculaire au plan de symétrie vertical du bâtiment, et les surfaces planes obtenues formeront le plafond. En ce cas, la différence des parcours direct et réfléchi des rayons sonores en dehors du plan de symétrie ne sera pas égale à 6,8 m. Sur la Fig. 6 on a montré pour un cas concret que l'écart ne dépasse pas 2 ou 3 m, c.-à-d., le retard de réflexion ne diffère que de 10 à 15 ms de la valeur optimale.

La Fig. 7 représente la coupe longitudinale d'une salle de théâtre dont le plancher du parterre a été construit suivant des principes bien connus, (tore de rotation à la section parabolique): assurant une visibilité et une audibilité adéquates. En ce cas la construction des ellipses présentées ci-dessus est un peu plus compliquée, étant donnée que leurs grands axes ne coïncident pas. D'autres principes, comme p.e. de tracer des lignes d'intersection des surfaces (ou cônes) de plafond, restent invariables. Dans ce cas, la rotation autour de l'axe t (la méthode plus exacte) paraît être plus convenable, surtout parce que la surface de plancher a été obtenue également en tournant une courbe autour de l'axe t . De cette façon les surfaces de plafond et de plancher sont semblables.

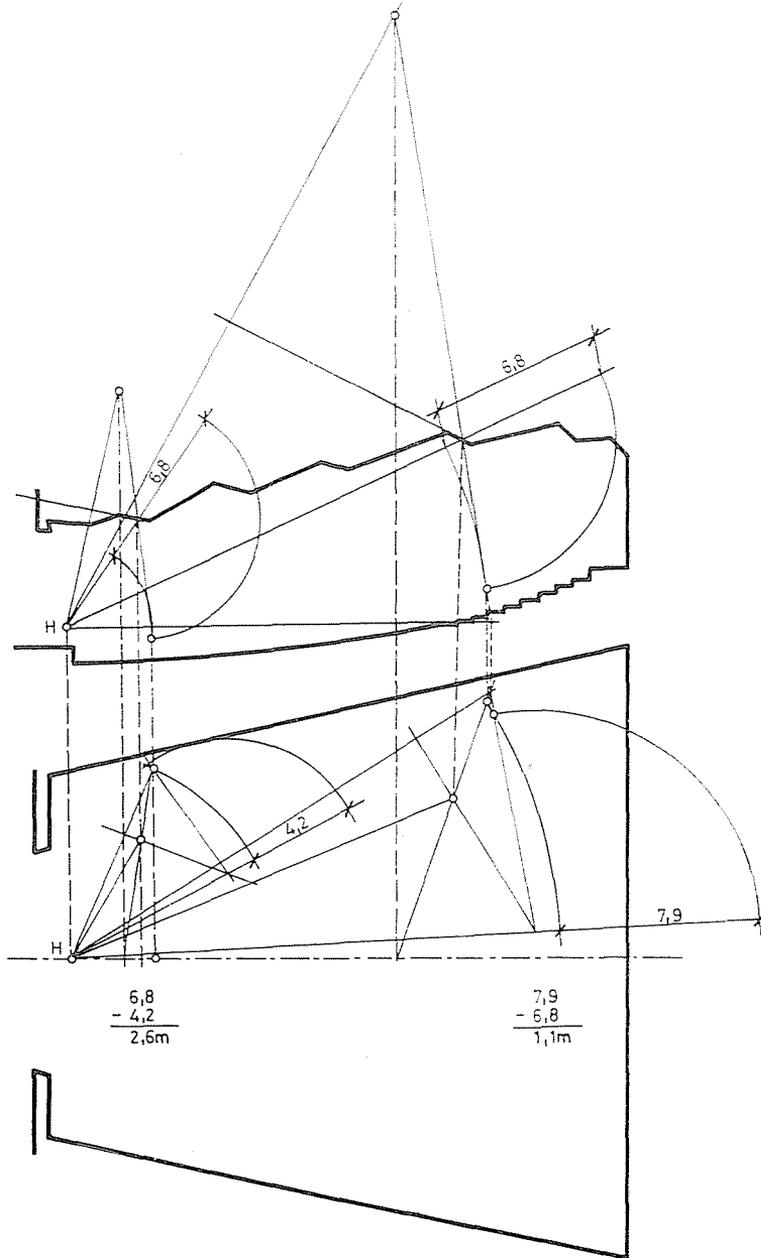


Fig. 6

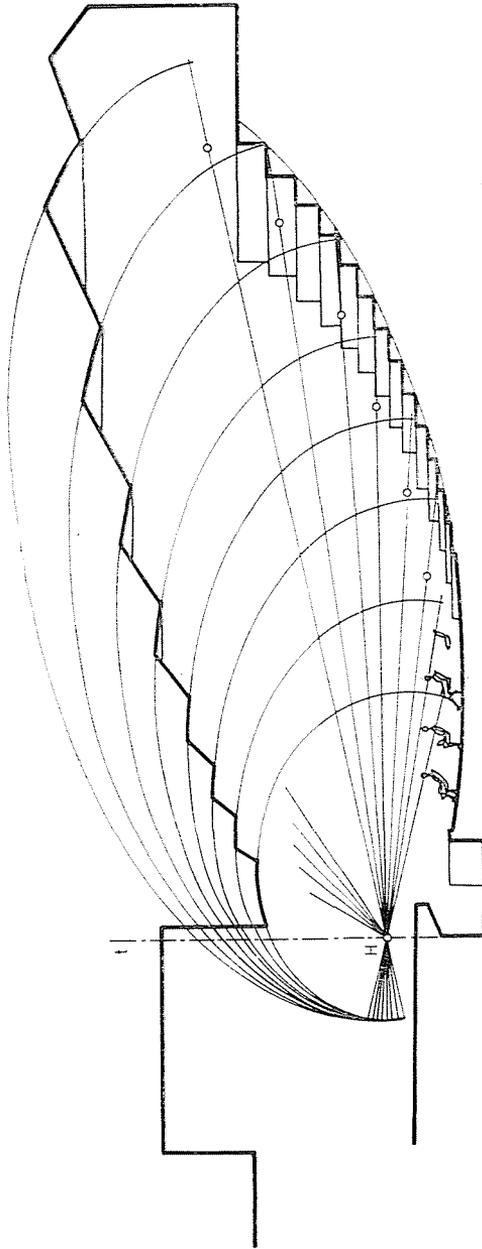


Fig. 7

4. Optimisation du retard de réflexion dans de grandes salles

On aperçoit que, sur les coupes de bâtiment présentées, la salle de spectacle est assez basse — au moins dans le voisinage de la scène —, et qu'à cause de la situation des ellipses, à la proximité du point H , elle ne peut pas être sensiblement rehaussée. La question se pose donc, que peut-on faire, si — en conséquence d'une situation donnée (reconstruction d'un bâtiment existant, conception de l'architecte, etc.) — il faut assurer un retard de réflexion favorable dans une salle d'une hauteur exagérée.

On essayera d'abord d'utiliser le pouvoir réflecteur des murs latéraux et de fond.

La Fig. 8 représente une salle de conférences en plan. En utilisant les points focaux, obtenus par le réfléchissement déjà connu de la source sonore, et les contre-cercles au rayon de 6,8 m de long, donnant le retard de réflexion optimum de 20 ms, nous avons construit sur le plan horizontal passant par H_0 les hyperboles qui se trouvent sur la «surface d'audition» (marquées sur la figure par lignes discontinues). Mais cette fois nous avons tracé également les hyperboles appartenant aux deux limites de retard de réflexion encore

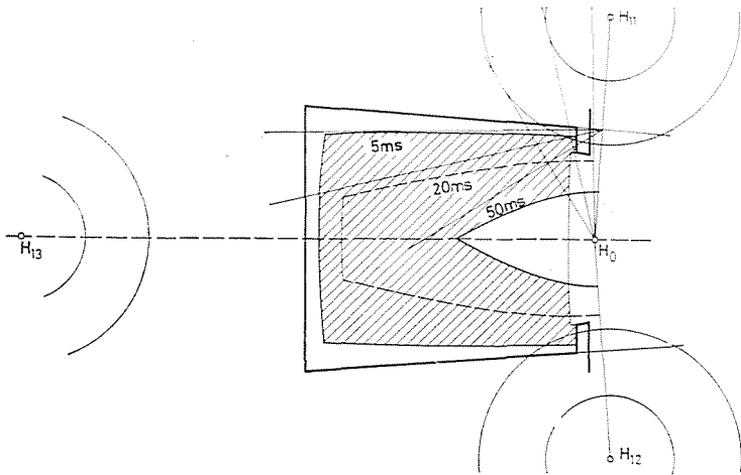


Fig. 8

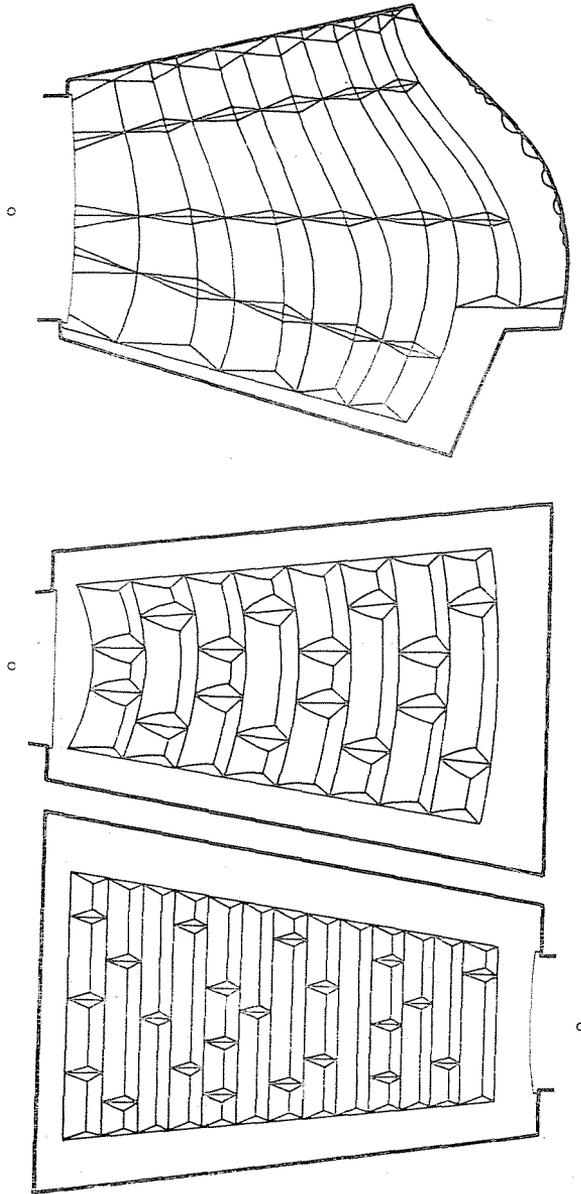


Fig. 9

acceptables (5 ms et 50 ms). La partie de la vue en plan entre les hyperboles (surface hachurée) est une zone où le retard de réflexion est encore acceptable, *même sans réfléchissement par le plafond*.

On voit sur la figure que c'est devant la scène, à la proximité de l'axe de symétrie, que se trouve l'aire où il faut faire parvenir de quelque façon

de la réflexion. Les parties à côté des murs latéraux, également défavorables, peuvent être négligées parce qu'elles sont réservées généralement à la circulation.

On adopte le plus souvent la solution d'élargir un peu le cadre de la scène ou le proscénium, ou de donner une autre forme assurant une bonne réflexion jusque dans les places du milieu de la salle. C'était même l'objectif de la reconstruction du théâtre Erkel (projet acoustique du Dr. Tamás Tarnóczy).

On rencontre de solutions particulières entre autres dans l'auditoire Northrop de Minneapolis et dans la Aula Magna de Caracas (le projet acoustique est dû dans les deux cas à la maison Bolt — Beranek — Newmann). Dans ces salles, des plaques orientables, suspendues au plafond, assurent le retard de réflexion désiré. Dans le premier cas on utilisait comme matériau du verre Plexi, dans le but évident que la conception architecturale, visant à faire valoir la hauteur intérieure de la salle, ne soit pas compromise. Dans la deuxième salle un choix heureux de la forme et des couleurs des plaques a permis d'obtenir un effet esthétique agréable.

5. Le rôle commun des murs latéraux et du plafond

En se basant sur ce qui vient d'être dit, on peut concevoir une construction où une partie seulement du plafond sera réalisée de la manière précédemment exposée, le reste du plafond peut même être plan, puisque les murs latéraux contribuent à la réalisation d'un retard de réflexion favorable. Pour établir une comparaison, la Fig. 9 montre quelques plafonds de ce genre (en vue de dessous), d'où il ressort que cette condition (c.-à-d. un retard de réflexion prescrit) ne fait pas obstacle à la réalisation des idées de l'architecte.

6. L'importance du retard de réflexion

Il est intéressant de voir que les circonstances dues à une conception erronée ou au manque de l'étude du retard de réflexion prennent une allure influençant défavorablement encore d'autres paramètres importants de l'acoustique des salles. On observe souvent, par exemple, que dans de grandes salles où l'architecte éprouve des difficultés en voulant respecter la limite supérieure du retard de réflexion, il y a inconvénient aussi à assurer une *diffusion* convenable, tandis que dans des salles exigües où il est impossible, même en principe, d'assurer le retard de réflexion désiré, la solution du problème de la pureté du timbre se heurte également à des difficultés insurmontables.

C'est pourquoi il est d'importance que l'auteur du projet — dès la première étape de l'étude — tienne compte des conditions requises du retard de réflexion voulu.

Résumé

Le retard de la réflexion est une notion importante de l'acoustique des salles, une des caractéristiques des locaux architecturaux à destination acoustique. L'article constitue un résultat partiel des recherches en cours à la Chaire sur les possibilités d'intégrer le retard de réflexion dans l'étude du projet en vue de concevoir des salles dont la forme assure que ce paramètre ait la valeur optimale, déterminée par voie théorique et expérimentale, pour l'ensemble des auditeurs.

Dr. Károly VAJK, chargé de cours, H-1521 Budapest