

1 ex

1/73

UNIVERSITÉ D'ALGER

ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE

DEPARTEMENT ELECTRONIQUE

THESE DE FIN D'ETUDES

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
- المكتبة -
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

ETUDE ACOUSTIQUE D'UNE SALLE

المدرسة الوطنية للعلوم الهندسية
المكتبة
ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
BIBLIOTHEQUE

Proposée et dirigée par :

Mr R. ALLETRU

Etudiée et Réalisée par :

A. ASSOUS

Promotion 1973



A MES PARENTS

JE REMERCIE MM.ALLETRU ET MM.DUPIN POUR LEUR
AIDE AINSI QUE TOUTES LES PERSONNES QUI ONT
CONTRIBUE A LA REALISATION DE CE PROJET.

I N T R O D U C T I O N

Si la lutte contre le bruit n'a pris que depuis quelques années une ampleur considérable ; C'est-à-dire investissement de gros capitaux pour le bien-être de l'homme de ville, l'acoustique architecturale qui traite des problèmes que pose à l'architecte la construction des immeubles pour tenir compte des exigences humaines sous le rapport de la sensibilité auditive, semble avoir été connue depuis longtemps même depuis la haute antiquité, ainsi qu'en témoigne l'excellente qualité des théâtres que nous ont laissés les anciens (le principal avantage de ces théâtres anciens est l'intelligibilité due à une excellente diffusion des fréquences élevées du spectre audible, les fréquences basses sont défavorisées par le fait que ces théâtres sont à ciel ouvert). Cependant si ces monuments anciens, généralement construits avec des matériaux épais et massifs donnaient aux diverses salles qui les composaient une protection efficace contre les bruits extérieurs, l'expérience a parfois révélé une insuffisance de confort intérieur vis à vis de l'oreille du à des excès de réverbération, on avait constaté aussi qu'il existait des locaux excellents mais aucune théorie d'ensemble n'avait été établie. Peu à peu, on a cherché le pourquoi des choses, on a essayé d'établir des règles, d'en déterminer les limites, on a voulu aussi vérifier, éprouver, mesurer..... Et c'est ainsi qu'est née avec Sabine, Fletcher, Eyring et Munson Une des parties les plus importantes dans la construction d'immeubles modernes : L'acoustique Architecturale. Dans un projet d'acoustique architecturale, le problème d'ensemble se scinde en deux points particuliers qui sont respectivement : isolement contre les bruits extérieurs et les vibrations et acoustique intérieure des salles qui est le point le plus important.

Notre étude a pour but la sonorisation de l'Amphi N°5 de l'E.N.P.A de 350 places, notre réalisation portera sur la seconde partie "Acoustique Intérieure".

T A B L E D E S M A T I E R E S

CHAPITRE -I- : ACOUSTIQUE THEORIQUE

- Nature et classifications des sons
- Détermination des paramètres
- Equation de propagation

CHAPITRE- II -: L'AUDITION

- Seuil minimum audible
- Limites d'audition , courbes d'égales sensation sonore
- Valeurs des seuils d'audibilité et de douleur
- Mesure des bruits
- Effet de masque

CHAPITRE- III -: PRINCIPES DE L'ACOUSTIQUE DES SALLES

- Acoustique intérieure des salles :réverbération
- Lois de Sabine
- Temps de réverbération optimum
- Résonnance des salles , modes normaux
- Diffusion du son
- Croissance et décroissance du son dans une salle
- Réflexion du son dans les salles :matériaux absorbants
- 6Phénomènes Acoustiques particuliers liés à la forme des salles.

CHAPITRE -IV -: ISOLEMENT CONTRE LES BRUITS EXTERIEURS ET LES VIBRATIONS

- Influence de la masse des matériaux
- Isolement des fenêtres et des portes
- Etude de l'isolement phonique

REALISATION PRATIQUE ET CONCLUSION:

- Tableaux numériques

CHAPITRE-I-

ACOUSTIQUE THEORIQUE

Dans ce chapitre nous allons définir le son et déterminer quelques paramètres caractéristiques du champ acoustique.

I-1/NATURE DU SON:

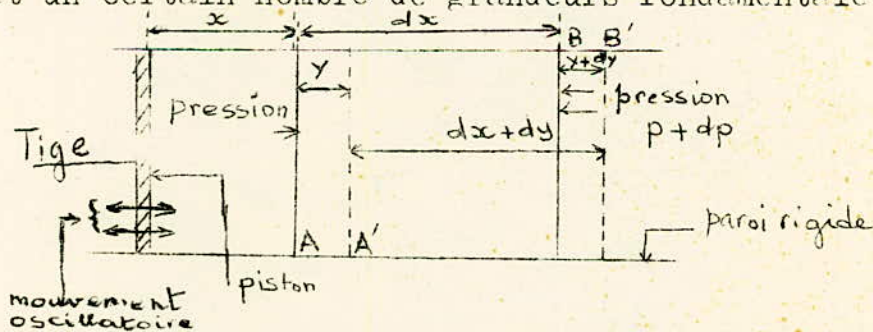
Le son est provoqué par l'ébranlement d'un milieu matériel gazeux, liquide ou solide. Cet ébranlement se traduit par une vibration des particules du milieu autour de leurs positions moyennes de repos. Il a en général le caractère d'un mouvement alternatif, périodique, complexe décomposable en mouvements élémentaires sinusoïdaux. La fréquence est le nombre d'oscillations par seconde du mouvement considéré.

I-2/ CLASSIFICATION DES SONS:

Les sons purs audibles ont une fréquence comprise entre vingt (20) ou vingt cinq (25) et 20000 hertz. Au-delà de la limite supérieure se place le domaine des ultrasons ; en deçà de la limite inférieure se trouve le domaine des infrasons et des vibrations mécaniques.

I-3/ CALCUL DES PARAMETRES:

Le problème du piston vibrant dans un tuyau nous permettra de définir un circuit acoustique de base et un certain nombre de grandeurs fondamentales.



Tout d'abord nous allons définir certaines constantes qui nous seront utiles par la suite :

V=Volume moléculaire

T=Température absolue

R=Constante universelle des gaz=8,31 joules

m=Masse de la molécule

K=Constante de Boltzman=R/M=1,37.10⁻²³ joules

$N = \text{Nombre D'avogadro} = 6,023 \cdot 10^{23}$

$M = \text{Masse moleculaire}$

La vitesse quadratique U_x suivant l'axe Ox est definie par:

$$mU_x^2 = KT$$

$$\text{donc } U_x^2 = KT/m = RT/M = P_0V/M = P_0/\rho$$

Rappelons aussi la relation $PV = RT$ permettant d'expliciter la pression P au repos, considérons alors un piston effectuant un mouvement vibratoire à l'entrée d'un tuyau rempli d'un fluide. L'amplitude sera supposée suffisamment faible pour pouvoir travailler dans le domaine de linéarité des forces élastiques. Nous nous proposons d'étudier le mouvement du fluide dans le tuyau en fonction de l'abscisse x et du temps t .

1°/ La pression vibratoire p des branches (surpression par rapport à celle définie par l'agitation seule P_0)

2°/ Le déplacement y des tranches de fluide.

3°/ La vitesse vibratoire U des tranches (vitesse des particules)

4°/ La vitesse de propagation de l'ébranlement (célérité)

Une section de fluide "A" d'abscisse x est animée d'un certain mouvement en fonction du temps t . On appelle déplacement Y la distance de la section à l'instant t à sa position initiale correspondant à $t=0$.

La vitesse vibratoire U de la section "A" est évidemment sa vitesse de déplacement, donc

$$U(x,t) = y(x,t) / t$$

Soit alors une tranche de fluide d'épaisseur dx comprise à l'instant t entre les abscisses x et $x+dx$. Au bout d'un intervalle de temps dt la section "A" d'abscisse x sera venue en "A'" après s'être déplacée, de $AA' = Y$. De même la section "B" d'abscisse $x+dx$ aura subi une translation différente de celle de "A" puisque sa vitesse est en principe différente de celle de "A" on peut donc poser:

$$BB' = y + dy = y +$$

La variation d'épaisseur de la tranche de fluide considérée est donc égale à:

$$A'B' - AB = BB' - AA' = y + dy - y = dy =$$

La dilatation relative de cette tranche "A" à l'instant t est alors de

$$\theta' = \frac{BB' - AA'}{AB} = \frac{\frac{\partial y}{\partial x} dx}{dx} = \frac{\partial y}{\partial x}$$

La condensation relative égale à la dilatation changée de signe n'est autre chose que la compression volumique, la section S étant supposée constante :

$$\theta = -\theta' = -\frac{\partial y}{\partial x} = -\frac{\partial(BB' - AA')}{\partial(A.B)} = -\frac{\partial y}{\partial x}$$

On établit facilement une relation entre la condensation et le coefficient de compressibilité défini en mécanique des fluides comme le rapport de la diminution relative de volume à la variation de pression qui l'engendre. Comme dans le cas présent la variation de pression est justement égale à la pression vibratoire ou surpression P il vient :

$$\chi = -\frac{\frac{\partial v}{v}}{P} = -\frac{1}{P} \frac{\partial y}{\partial x} = \frac{\theta}{P}$$

I-4/ ANALOGIE AVEC UNE BARRE VIBRANT LONGITUDINALEMENT:

Une barre de longueur l et de section s sollicitée axialement par une force F subit une variation de longueur Δl . S'il

s'agit d'une compression on a: $-\frac{\Delta l}{l} = \frac{f}{S} \times \frac{1}{E}$

E=Module d'élasticité

La pression est: $p = \frac{f}{S} = -E \cdot \frac{\Delta l}{l} = -E \frac{\Delta v}{V} = E \text{ Condensation} = E\theta$

Donc en définitive $p = -E \frac{\partial y}{\partial x} = -E \frac{\partial v}{V}$, $\chi = \frac{1}{E}$

Dans le cadre des hypothèses simplificatrices précédentes nous écrirons la relation entre la pression P et le volume V en régime adiabatique

$$P V^\gamma = \text{cte} \quad d(P V^\gamma) = 0$$

γ = Rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant .

Comme la surpression P est toujours très faible devant la pression atmosphérique normale on peut ^{la} considérer comme un élément différentiel par rapport à P₀ d'où:

$$\frac{P}{P_0} + \gamma \frac{\Delta y}{V_0} = 0 = \frac{P}{P_0} + \gamma \frac{\partial y}{\partial x} \Rightarrow P = -\gamma P_0 \frac{\Delta y}{V}$$

$$E = -\frac{P}{\frac{\partial y}{\partial x}} = -\frac{P}{\frac{\partial y}{\partial x}} = \gamma P_0, \quad P = -E \frac{\partial y}{\partial x}$$

$$u = \frac{\partial y}{\partial t}; \quad \theta = -\frac{\partial y}{\partial x}; \quad E = \gamma P_0; \quad \frac{\partial y}{V_0} = -\frac{\partial p}{\rho} \quad (\rho = \text{densité})$$

Equation du mouvement de la tranche AB:

La tranche "AB" est soumise à une force P.S s'exerçant sur la section "A" vers la droite et à une force de sens inverse (P+dP)S s'exerçant sur la face "B". la résultante de ces deux forces suivant les x croissants est égale :

La tranche AB de vitesse $U = \frac{\partial y}{\partial t}$ et de longueur dx a pour masse $dm = S dx$

L'équation classique de la mécanique $dF = dm \cdot \frac{du}{dt}$

nous donne: $\int S \cdot dx \cdot \frac{du}{dt} = \int S \cdot dx \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = -\frac{\partial P}{\partial x} S \cdot dx$

$$\int \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \int \frac{\partial u}{\partial t} = -\frac{\partial P}{\partial x}$$

Si l'on adopte une unité de longueur très petite égale à dx la dérivée $-\frac{\partial P}{\partial x}$ est tout simplement l'excès de force s'exerçant sur deux faces en regard de 1 cm^2 de section de la tranche considérée et comptée de gauche à droite. le produit est la force d'inertie de l'élément considéré

Les relations $P = -E \frac{\partial y}{\partial x}; \int \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0; \int \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} + \frac{\partial P}{\partial x} = 0$

nous conduisent à: $\frac{\partial P}{\partial t} = -E \frac{\partial y}{\partial x}; \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}; \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = \frac{E}{\rho} \frac{\partial^2 P}{\partial x^2}$

Pour rendre l'équation homogène on pose: $\frac{E}{\rho} = c^2; E = \rho c^2 = 0,14 \text{ MPa}$

On a alors $\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$ ou encore $\frac{\partial^2 u}{\partial (ct)^2} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}$
 Cette relation différentielle nous permet de voir que la forme de la fonction: $U=F(x,t)$ Par rapport à ct est la même que par rapport à x au signe près puisque le changement de x en -x ou de ct en -ct n'affecte pas la nature de la fonction. On peut d'ailleurs permutter x et ct sans changer la forme de F(x,t). On peut donc conclure que x et ct figurent sous la forme d'une

Expression symétrique et homogène .En outre $F(x,t)$ ne peut comprendre des termes en second degré en x ou en ct d'où la forme générale de la solution

$$U=f(ct-x)+g(ct+x)$$

ou encore $u = f\left(t - \frac{x}{c}\right) + g\left(t + \frac{x}{c}\right)$

On a donc la superposition de deux ondes se propageant en sens inverse ,en réalité l'onde rétrograde peut être considérée comme une onde directe ayant parcouru le tuyau et subi une réflexion à ses extrémités .

Cas du tuyau indéfini ou parfaitement absorbant à l'extrémité
En acoustique architecturale ce cas correspond à une salle dont le fond (face opposée à l'orateur)est recouvert d'un absorbant .Dans ce cas il ne peut y avoir d'ondes rétrogrades en raison de l'absorption.La vitesse vibratoire est alors de la forme :

Ce qui nous donne en régime sinusoïdal :

$$u_1 \sin \omega \left(t - \frac{x}{c}\right) + u_2 \sin \omega \left(t + \frac{x}{c} + \alpha\right) \quad \text{Avec } u_m = \text{vitesse Max.}$$

Si nous considérons maintenant les relations

$$\frac{\delta p}{\delta x} = -\rho \frac{\delta u}{\delta t}; p = -E \frac{\delta y}{\delta x}, \quad \frac{\delta p}{\delta t} = -\frac{E \delta^2 y}{\delta x \delta t} = -E \frac{\delta u}{\delta x}$$

Nous obtenons ainsi :

$$\frac{\delta p}{\delta x} = -\rho \frac{\delta u}{\delta t} = -\rho u_m \omega \cos \omega \left(t - \frac{x}{c}\right)$$

$$P = \int \frac{\delta p}{\delta x} dx = \rho c u_m \sin \omega \left(t - \frac{x}{c}\right) = \rho c u = \rho_m \frac{du}{dt} \omega \left(t - \frac{x}{c}\right)$$

$$\frac{P}{u} = \rho c = \frac{\rho_m}{u_m} = \frac{\rho c_{eff}}{c_{eff}}$$

Or, lorsque le tuyau est parfaitement absorbant la vitesse vibratoire des ondes planes est constamment en phase avec la pression vibratoire en régime sinusoïdal .Leur rapport constamment est égal à:

$$Z_0 = \rho c = \sqrt{\rho E} = \frac{E}{c} \quad \text{avec } E = \rho c^2$$

Cette grandeur est appelée impédance ou résistance acoustique spécifique pour l'air à 18°C et à pression normale

CHAPITRE-II-

L'AUDITION

II-I/SEUIL MINIMUM AUDIBLE:

Une onde sonore doit avoir une certaine pression sonore pour être perçue par l'observateur. Pour des observateurs sélectionnés, ayant une bonne ouïe, placés en face d'une onde progressive et écoutant avec leurs deux oreilles cette valeur est appelée le champ minimum audible en champ libre. La sensation sonore varie comme le logarithme de l'intensité:

$$S = \text{Log}(E/E_0)$$

E= intensité physique correspondant au son considéré.

E₀=Intensité correspondant à une sensation nulle

a/ UNITES:

Pour des raisons de commodité pratique, on a adopté pour k la valeur 10 et pour logarithme les logarithmes décimaux δ est alors exprimée en dB. Etant données les relations simples existant entre les intensités physiques, les puissances, les pressions et les vitesses v, l'équation précédente s'écrit immédiatement:

$$S(\text{décibels}) = 10 \log(E/E_0) = 20 \log(P/P_0) = 20 \log(V/V_0)$$

$$1 \text{ Bel} = 10 \text{ Décibels}$$

b/ LE NEPER:

Pratiquement le néper équivaut à 8,686 décibels, car $\log_e = 0,43$ inversement un décibel équivaut à 0,115 néper ou 1,15 décinéper nous verrons dans les paragraphes suivants qu'il existe une autre unité qui est la plus utilisée: lephone

II-II/ LIMITES D'AUDITION: COURBES D'EGALE SENSATION SONORE:

a/ SEUIL D'AUDIBILITE:

Quand on place l'oreille dans le champ d'une onde acoustique de fréquence pure, se propageant librement et dont on règle l'intensité I par valeurs continuellement croissantes en partant de zéro, c'est-à-dire le silence, on atteint une valeur I_s pour laquelle l'oreille commence à percevoir une sensation. Cette valeur I_s correspond au seuil de l'audibilité pour la fréquence considérée.

b/ SEUIL DE LA DOULEUR:

Quand l'intensité augmente le son résultant devient de plus en plus fort jusqu'à atteindre un niveau auquel le son ne peut être senti de façon correcte. Au-dessus de ce niveau l'observateur subit une sensation composite de son de perception tactile et de douleur : ce niveau est appelé seuil de la douleur

c/ VALEUR DES SEUILS D'AUDIBILITE ET DE DOULEUR:

Quand on recommence la même expérience pour les différentes fréquences audibles, on obtient ainsi deux courbes S_a et S_d lieux respectifs des seuils d'audibilité et des seuils de la douleur. Ces courbes, rapportées à deux axes de coordonnées rectangulaires respectivement graduées en fréquence et en intensité (Log et dB) délimitent le champ de l'audition. Si on extrapole la courbe représentant les seuils d'audibilité, elle coupera le seuil de sensation douloureuse en deux points qui déterminent les limites des fréquences supérieures et inférieures de l'auditeur à savoir : 20Hz pour la limite inférieure et 20 KHz pour la limite supérieure. (VOIR FIG. I.)

REMARQUE:

Le seuil d'audibilité correspond à une intensité moyenne de l'ordre de 10^{-6} W/cm^2 . Le seuil de la douleur qui diffère de 80 à 90 dB du seuil d'audibilité correspond à une intensité 10^{-8} à 10^{-7} W/cm^2

d/ COURBES D'EGALE SENSATION SONORE:

Si on cherche la suite des intensités physiques d'un son de fréquence variable allant de 20Hz à 20KHz qui produisent sur l'oreille une sensation constante égale par exemple à celle qu'engendre un son de référence de fréquence 1000 Hz. d'une intensité physique de NdB. On obtient une courbe dite d'égale sensation sonore qui coupe la droite verticale d'abscisse 1000Hz en un point d'ordonnée N, à cette courbe C_n est donnée le nom de courbe d'égale sensation sonore pour la valeur N. On peut tracer toute une série de courbes analogues relatives respectivement aux diverses valeurs de N, qui se réfèrent toutes à l'intensité physique en dB du son

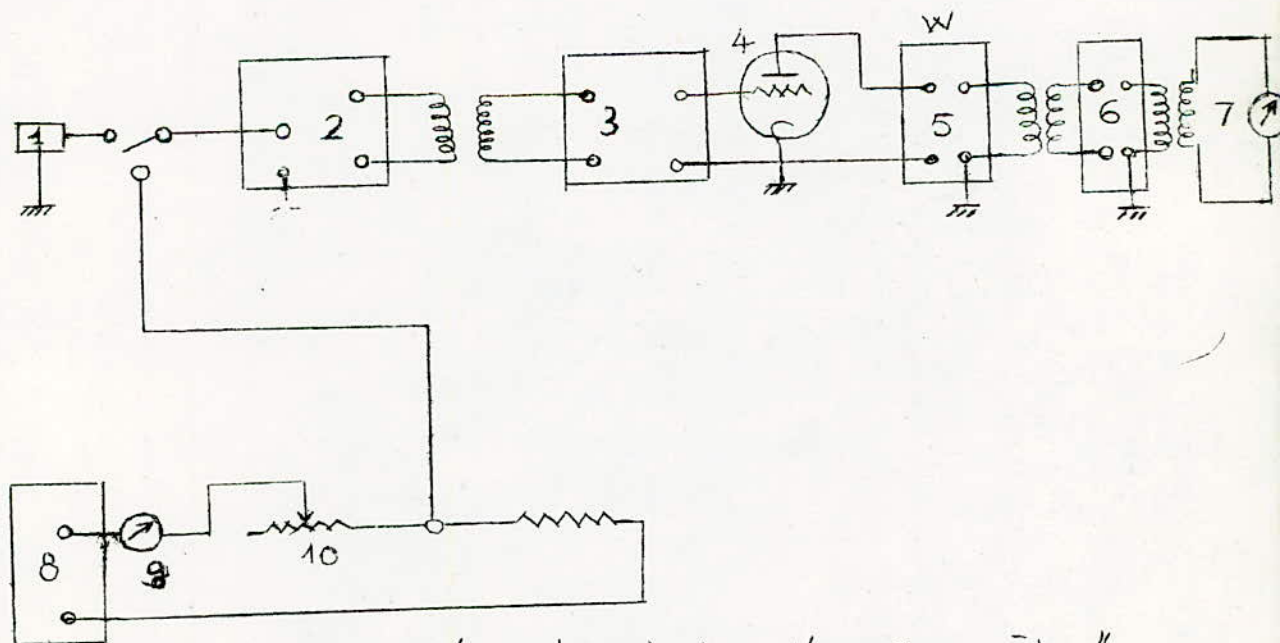
de fréquence 1000 Hz , ces diverses courbes , qui portent le nom de courbes de Fletcher et Munson , forment un réseau à l'intérieur du champ d'audition, la courbe des seuils d'audition et la courbe des seuils de la douleur en sont , bien entendu les deux courbes extrêmes (Voir Fig.2).

3-3/UNITES D'INTENSITE ACOUSTIQUE SUBJECTIVE: LE PHONE

Etant donné l'incurvation du réseau des courbes d'égale sensation sonore on a recours pour traduire une intensité subjective à un artifice qui est le choix d'un son et d'une fréquence de référence ; on définit le phone de la manière suivante: Le niveau de sensation en phone d'un son est égale numériquement au niveau de pression sonore en dB du son de référence 1000Hz jugé donner une sensation équivalente à l'auditeur

a/ MESURE DES BRUITS:

Les intensités acoustiques subjectives *qui mesurent* souvent avec un sonomètre étalonné conformément à la définition précédente .Le sonomètre (Fig.ci-dessous)est un appareil composé d'un microphone de haute qualité qui capte les sons



« schéma de principe d'un Sonomètre »

- 1- Microphone
- 2- premier étage d'amplification
- 3- Atténuateur
- 4- Lampe amplificatrice
- 5- Atténuateur, dispositif de pondération (weighting network)
- 6- Deuxième étage d'amplification
- 7- Milliampèremètre avec thermocouple ou redresseur en proxyde
- 8- Oscillateur étalonné servant à contrôler le gain des ampli.
- 9- Milliampèremètre
- 10- Potentiomètre

d'un amplificateur linéaire en intensité et en fréquence mais associé à un réseau pondérateur destiné à reproduire la courbe de sensibilité de l'oreille et d'un détecteur à loi d'addition quadratique .

EXEMPLE:

Ce détecteur est tel que si le microphone recueille 2 sons de fréquence f_1 et f_2 , d'amplitudes respectives P_1 et P_2 l'appareil de lecture donne une tension globale étant les poids affectant les sons de pression P_1 et P_2 et de fréquence f_1 et f_2 . Le réseau pondérateur doit en principe, pouvoir se déformer avec le niveau d'intensité physique des sons ou des bruits mesurés, le plus souvent, le sonomètre possède simplement deux, trois ou quatre réseaux pondérateurs correspondant à des domaines différents d'intensité par exemple 0-45dB, 45-60 dB, une simple commutation permet de passer d'un réseau à un autre. (Voir courbes)

b/ EFFET DE LA DUREE DES SONS SUR LEUR INTENSITE SUBJECTIVE:

La durée d'audition d'un son influe sur la sensation d'intensité perçue celle-ci est d'abord une fonction croissante de la durée, puis passe par un léger maximum pour décroître un peu et reste ensuite pratiquement constante. Le maximum est atteint pour une durée voisine de 200 ms, valeur qui explique le choix de la constante de temps des sonomètres. (Fig)

c/ EFFET DE MASQUE:

Un bruit d'intensité donnée tend à masquer, c'est-à-dire réduire les possibilités d'audition d'autres sons

moins intenses .Ce bruit à pour effet ,de réduire le seuil d'audibilité,ce décalage du seuil d'audibilité est dénomé masque et sa valeur en dB définit une mesure de cet effet de masque,les données relatives au masque sont généralement présentées sous la forme d'une courbe appelée spectre de masque (Fig.).

d/L'AUDIOMETRE:

La détermination d'un seuil d'audition se fait avec un audiomètre ,appareil qui comporte un oscillateur ou source électrique de bruit ,un affaiblisseur et une source de son:écouteur ou haut-parleur pour l'étude de l'audition aéro-tympanique ,vibrateur osseux pour l'étude de l'audition par voie osseuse .

CHAPITRE-III-

PRINCIPE DE L'ACOUSTIQUE DES SALLES

Les principes de l'acoustique des salles introduisent non seulement les propriétés du son mais aussi les principes complémentaires relatifs à la réflexion, à l'absorption et à la diffusion du son sur les frontières de ces enceintes. L'existence des parois donne lieu à la réverbération et à la résonance qui est une propriété d'importance majeure dans l'acoustique des salles. Un orateur situé à une distance considérable de l'auditeur est en général, entendu plus distinctement dans une salle qu'à l'air libre et ceci parce que les parois de la salle modifient la distribution du son provenant de la source et concentrent l'énergie qui à l'air libre se perdrait dans l'espace. Ainsi, les parois, à moins qu'elles ne soient complètement absorbantes augmentent le niveau moyen du son dans la salle. L'influence de la forme, des dimensions et des propriétés réfléchissantes ou absorbantes d'une salle sur ses caractéristiques acoustiques seront examinées en détail dans ce chapitre où l'on décrira les phénomènes de résonance ainsi que d'autres tels que les échos, les focalisations et le flutter :

3-I/ ACOUSTIQUE INTERIEURE DES SALLES: REVERBERATION:

Les salles doivent posséder intérieurement des qualités adaptées à leur destination, elles doivent être ni trop résonnantes, ni trop étouffées : Une salle de conférence où il y a trop d'échos ne peut être considérée comme satisfaisante, car le recouvrement des sons émis à un instant donné par les échos diffus des phénomènes précédents nuit à leur compréhension. Inversement une salle où les sons sont trop vite amortis ne soutiennent pas la voix.

a/ LOI DE SABINE:

Une des propriétés essentielles d'une salle est sa réverbération, c'est-à-dire son aptitude à prolonger un son après l'arrêt de la source émettrice qui le produit, analysant le mécanisme des ondes sonores dans un espace clos, Sabine a été amené à considérer d'une façon en quelque sorte statistique la salle comme un condensateur de capacité C chargé d'énergie

sonore, shunté par une résistance élevée "R". Un tel système électrique a une constante de temps "RC" qui règle aussi bien sa charge que sa décharge. Ainsi quand la source sonore émet, la salle se charge progressivement d'énergie sonore, un équilibre s'établissant entre le débit de la source et l'absorption des parois symétriquement quand la source s'arrête, la salle se décharge de l'énergie sonore qui y est accumulée et le son s'éteint au bout d'un certain temps.

— PREMIERE LOI DE SABINE:

La courbe d'établissement d'un son et sa courbe d'extinction ont une allure approximativement exponentielle: On appelle le temps de réverbération T_r le temps qui s'écoule entre le moment où la source cesse d'émettre et le moment où l'intensité moyenne du son dans la salle a decru jusqu'au millionième de sa valeur initiale, c'est-à-dire a atteint une intensité inférieure de 60 dB à cette dernière.

— DEUXIEME LOI DE SABINE :

Le temps de réverbération est pratiquement indépendant de la source émettrice et de la position d'écoute. Si l'on appelle "I" l'intensité à un instant t; l'équation statistique de l'intensité supposée distribuée uniformément peut s'écrire :

$$I = I_0 e^{-kt}$$

De même que la tension aux bornes du condensateur qui se décharge librement est:

$$U = U_0 e^{-(t/CR)}$$

Si nous introduisons maintenant la définition du temps de réverbération nous écrirons

$$I = I_0 e^{-(13,8 t/T_r)} \quad \text{car } \ln t = T_r \quad \frac{I}{I_0} = 10^{-6}$$

D'autre part si l'on appelle p le libre parcours moyen entre deux réflexions successives d'une onde sonore et a le coefficient d'absorption des parois, l'équation générale de décroissance du son s'écrit en égalant la variation relative d'intensité dans la salle pendant le temps dt, et l'énergie sonore absorbée pendant le même temps en admettant qu'il y a

n réflexions pendant ce temps, n'est évidemment égal au quotient de la vitesse de propagation c par p de telle sorte que :

$$\frac{\Delta I}{I} = (ca/p) \Delta t$$

Le libre parcours moyen p est souvent égal à $4V/S$ (avec V =volume de la salle et S =surface totale des parois de la salle compris le plancher et le plafond) il en résulte que :

$$I = I_0 e^{-(ca^2/4V)t}$$

On en conclut que :

$$I = I_0 e^{-(ca^2/4V)t}$$

Ce qui donne la formule de SABINE, c'évalant 340m/s dans l'air

$$T_c = 0,162 (V/a S) \text{ sec. } (V \text{ en m}^3, S \text{ en m}^2)$$

Le calcul précédent suppose une distribution uniforme du champ acoustique et un brassage en quelque sorte idéal des ondes, En fait, le champ acoustique a une structure plutôt granulaire et discontinue, en ce sens qu'il est formé d'ondes directes et d'ondes réfléchies après des intervalles de temps correspondant au libre parcours moyen. EYRING, partant de ces nouvelles bases considère que l'intensité sonore initiale I_0 après une réflexion est réduite à $I_0(1-a)$, après n réflexions, c'est-à-dire au bout du temps $t=n\Delta t$ (t étant le temps correspondant au libre parcours moyen entre deux réflexions successives, l'intensité sera ;

$$I = I_0 (1-a)^n = I_0 (1-a)^{t/\Delta t} = I_0 e^{(t/\Delta t) \log(1-a)}$$

$$\text{avec } a = \frac{\sum a_i S_i}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

$S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$ désignant les surfaces pour lesquelles les coefficients ont respectivement pour valeurs $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$

ce qui conduit à l'expression suivante du temps de réverbération :

Cette formule, dite D'EYRING, est valable pour les petits ~~de~~ ~~réverbération~~ temps de réverbération, pour des valeurs élevées du temps de réverbération, α étant très petit, les deux formules sont équivalentes.

b/ TEMPS DE REVERBERATION OPTIMUM :

L'expérience montre que le temps de réverbération d'une salle doit être adapté à l'utilisation que l'on doit faire de cette salle pratiquement il peut, en première approximation, être déduit du volume de la salle par une expression de la forme :

$$T = KV^{\frac{1}{3}}$$

k étant un coefficient qui varie de 0,075 pour une salle de conférence à 0,09 pour une salle de concert et 0,1 pour un édifice religieux. Il dépend naturellement de la fréquence et la formule précédente nous donne une valeur moyenne. d'une manière plus objective et plus pratique on peut tracer deux diagrammes pour définir les conditions optimales à réaliser pour une salle. le premier de ces diagrammes donne pour un certain nombre de types d'édifices la variation de ce temps de réverbération optimum en fonction du volume pour la fréquence de 512 Hz le second permet de calculer le temps de réverbération optimum à donner en fonction de la fréquence, la fréquence de référence étant choisie égale à 512 Hz ainsi, connaissant le temps optimum pour la fréquence de 512 Hz, on obtient le temps optimum pour tout autre fréquence en multipliant le temps par le rapport lu sur le second diagramme (voir Fig. 4 et 9)

3-2/ RESONNANCE DES SALLES ,MODES NORMAUX :

Les salles recouvertes à l'intérieur de plâtre peint ou de carreaux lisses développent des capacités oratoires de l'homme, car dans des salles de ce genre la voix est "soutenue" par leur résonance, ce qu'on entend ce n'est plus seulement la voix de l'orateur mais la voix déclenchant les modes de vibrations normaux ou naturelles de la pièce.

Examinons maintenant l'un des effets de fréquence de résonance dans une salle sur ses propriétés acoustiques. supposons d'abord qu'en un point donné, à l'air libre, une source voisine crée une pression sonore ayant même niveau à toutes les fréquences; plaçons maintenant cette dans une salle, la pression à la même distance de la source ne sera plus constante avec la fréquence, elle sera au contraire beaucoup plus forte à certaines fréquences qu'à d'autres en particulier aux fréquences de résonance de la salle (voir Fig. 4).

pour une source de son placée dans une salle, le niveau étant enregistré en un point fixe d'un coin de la salle en fonction de la fréquence du son crée par le haut-parleur situé dans l'autre coin. on appelle les enregistrements de ce genre caractéristiques de transmission en fréquence. les fréquences de résonance d'une enceinte close sont souvent difficiles à calculer, pour une salle rectangulaire ayant des murs lisses en matériau dur, le calcul est pourtant assez simple: soient L, W et H la longueur, la largeur et la hauteur d'une salle rectangulaire et "c" la célérité du son. les fréquences de résonance f_r sont alors obtenues en substituant divers nombres entiers aux termes p, q, r de l'équation suivante:

$$f = \frac{c}{2} \left[\left(\frac{p}{L}\right)^2 + \left(\frac{q}{W}\right)^2 + \left(\frac{r}{H}\right)^2 \right]^{1/2}$$

les valeurs données à p, q, r spécifient le mode de vibration, par exemple le mode (1;0,2) est obtenu en substituant p=1, q=0, r=2.

Le nombre total N de modes, depuis la fréquence la plus grave jusqu'à une fréquence quelconque f_c dans une salle de volume V est donné approximativement par :

$$N = 4V \left(\frac{f_c}{3} \right)^3$$

3-3/ DIFFUSION DU SON :

Dans une salle, un son est dit parfaitement diffus si sa pression est la même partout et si, en tous les points de la salle il est également probable que les ondes se déplacent dans n'importe quelle direction. Il est naturellement impossible d'obtenir une diffusion complète, en fait cette condition serait indésirable car dans un tel champ ~~ak~~ sonore, l'auditeur aurait des difficultés à déterminer d'où vient le son, mais les préférences des exécutants et des auditeurs montrent qu'il convient de réaliser un certain taux de diffusion. La diffusion amène une distribution uniforme du son, elle assure une croissance et une décroissance relativement régulières de celui-ci et elle améliore la "présence" d'une salle. Un certain taux de diffusion et particulièrement souhaitable dans les salles où l'on emploie des microphones, car il réduit grandement les hasards d'une mauvaise disposition des micros.

On dit souvent d'une salle qu'elle est "présente" ou bien qu'elle est "sourde", expressions qualitatives de certains aspects de ces propriétés acoustiques. En un point quelconque de la salle, la "présence" dépend du rapport du son réfléchi sur les parois et revenant en ce point au son directement originaire de la source. Plus ce rapport est grand, plus grande est la "présence" de la salle; il en résulte que, plus on s'éloigne de la source, plus grande sera la "présence" apparente. Réciproquement, plus on s'approche de la source dans une enceinte, plus cette dernière paraîtra "sourde". Dans les salles contenant une grande quantité de matériau absorbant, il y aura très peu de son réfléchi, aussi les appelle-t-on "sourdes". La quantité de son réfléchi dépendant aussi des conditions aux parois, la "présence" est donc fonction de la diffusion.

La diffusion du son dans une salle est accrue :

1°/ Par les objets contenus dans la pièce , qui dispersent et rendent ainsi erratique la direction des ondes sonores.

2°/ Par les irrégularités superficielles des murs , qui aussi dispersent les ondes incidentes du fait des propriétés de réflexion et d'absorption de ces derniers. Ainsi , le son est mieux diffusé dans une pièce meublée que dans une pièce vide.

Une autre d'accroître la diffusion du son dans une salle consiste à réaliser une distribution irrégulière des matériaux absorbants, de préférence sous forme de panneaux.

a/ CROISSANCE DU SON DANS UNE SALLE:

Quand on "met en marche"

une source de son dans une salle, la pression sonore croit en chaque point de l'enceinte , tendant vers une valeur limite appelée "pression en régime permanent". La croissance n'est pas généralement uniforme et la pression des fluctuations quelque fois assez brutales, jusqu'à atteindre le régime permanent. L'acoustique physique explique ce résultat comme suit: la source met en vibration les modes normaux de la salle, excitant à leur maximum les modes qui ont des fréquences de résonance voisines de celles de la source . Toutes les fréquences , sauf celle de la source , s'éteignent rapidement , mais , ce faisant ; elles interfèrent entre elles, produisant des fluctuations de pression pendant la croissance.

Si le son est parfaitement diffus dans la salle, toutes les directions de propagation des ondes sonores sont également probables , et la pression sonore est la même partout à l'intérieur de l'enceinte . Dans ces conditions, il n'est pas difficile de montrer que la croissance moyenne de la pression sonore en un point d'une salle rectangulaire est donnée par l'équation:

$$P = 4260 \sqrt{\frac{W}{V}} \left(1 - e^{-ct/4V} \right)^{1/2}$$

Où P est la racine du carré moyen de la pression en dynes/cm², W la puissance acoustique de la source en Watts , V le volume de la pièce en m³, c la célérité du son en m/s, t le temps en

secondes , et a le nombre totale d'unités d'absorption donné par la somme $a = S_1 \alpha_1 + S_2 \alpha_2$ -- dans laquelle α_1 est la coefficient d'absorption de l'aire S_1 exprimée en m^2 ETC.

b/ VALEUR DE LA PRESSION SONORE EN REGIME PERMANENT:

Selon l'équation précédente , quand une source de son a fonctionné pendant un temps infini la pression atteint une valeur maximum. (voir Fig. 1) Si pratiquement celle-ci , appelée valeur du régime permanent est atteinte au voisinage de quelques ms dans la plupart des salles, quand t devient grand par rapport à $4V/Ca$ le terme exponentielle devient négligeable et l'équation précédent se réduit à:

$$P = 4260 \left(\frac{W}{a} \right)^{1/2}$$

qui est la valeur approximative de la pression en régime permanent dans les salles à une distance supérieure à 2m de la source.

La pression sonore correspondante est:

$$L = 10 \log \frac{W}{a} + 147 \text{ dB}$$

W est la puissance acoustique de la source en watts , et a l'absorption totale en unités métriques .

c/ DECROISSANCE DU SON DANS UNE SALLE: Le son produit ou pénétrant dans une enceinte fermée est réfléchi plusieurs fois sur les parois . A chaque réflexion une fraction de l'énergie acoustique est absorbée, pourtant le son peut persister pendant plusieurs secondes avant de s'évanouir jusqu'à devenir inaudible. On sait que cette prologation du son après l'arrêt de la source est la réverbération . Plus grand est le volume de la salle plus la réverbération durera longtemps.

Supposons qu'une source de son soit mise en marche dans une pièce et emettant un son "pur" dont la fréquence est appelée fréquence imposée si cette dernière correspond à l'une des fréquences de résonance , et qu'il n'y est pas d'autres au voisinage , seul ce mode sera excité . quand on arrête la source l'énergie est par les murs et par d'autres éléments absorbants de l'enceinte et le son s'éteint (Voir Fig.)

Supposons maintenant qu'il y ait deux fréquences de résonance voisines de la fréquence imposée par la source : deux modes de

vibration sont alors excités avec la source. Ces fréquences de résonnance coïncidant presque, il y aura interférences entre elles sous forme de battement .

d/ VITESSE MOYENNE DE DECROISSANCE:

La courbe (Fig.) donne un enregistrement type du niveau sonore en un point donné d'une salle en fonction du temps après l'extinction de la source on remarque que la pression n'y décroît pas uniformément mais subit des fluctuations marquées . De même que, dans l'établissement du son dans la salle les irrégularités sont causées par l'interférence des modes normaux de vibration excités , dont chacun décroît à son rythme propre .

On peut exprimer la vitesse moyenne d'extinction . Définissons auparavant le coefficient d'absorption moyen $\bar{\alpha}$ par la relation

$$\bar{\alpha} = \frac{\alpha_1 S_1 + \alpha_2 S_2 + \dots + \alpha_n S_n}{S_1 + S_2 + \dots + S_n}$$

Chaque qu'une onde frappe l'une des parois une fraction ($\bar{\alpha}$) de l'énergie est absorbée et une fraction ($1-\bar{\alpha}$) est réfléchi . La pression étant proportionnelle à la racine carrée de l'intensité , le rapport de la pression réfléchi à la pression incidente est donnée par:

$$(1-\bar{\alpha})^{\frac{1}{2}}$$

et la décroissance moyenne de la pression est:

$$10 \log \left(\frac{1}{1-\bar{\alpha}} \right) \text{ dB / réflexion}$$

Le nombre de réflexions est numériquement égal à la distance que le son parcourt en une seconde , divisée par la distance moyenne entre deux réflexions successives . Appelons cette distance : Libre Parcours Moyen (l.p.m)

la décroissance moyenne du niveau/s sera:

$$V. M. D = \frac{c}{l.p.m} 10 \log \frac{1}{1-\bar{\alpha}} \text{ dB/s}$$

Dans la plupart des cas l.p.m = $\frac{4V}{S}$ et $c = 354 \text{ m/s}$

d'où :

$$V. M. D = 54 \frac{cS}{V} \frac{1}{1-\bar{\alpha}} \text{ dB/s}$$

3-4/ REFLEXION DU SON DANS LES SALLES : MATERIAUX ABSORBANTS

Quand une onde sonore frappe un mur ou un obstacle quelconque, une partie du son incident est réfléchi, une petite partie est dissipée sous forme de chaleur, enfin le reste est transmis à travers le mur.

Les grandeurs relatives des composantes absorbées, transmises et réfléchies dépendent d'un grand nombre de facteurs tels que la fréquence et l'angle d'incidence, la nature des matériaux constituant la paroi et la façon dont la paroi est supportée.

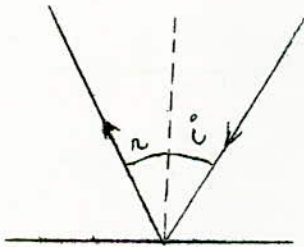
a/ LA REFLEXION DU SON:

Lorsque les dimensions de la surface réfléchissante sont grandes par rapport à la longueur d'onde, la réflexion de celle-ci est similaire à celle de la lumière et la loi de la réflexion optique s'applique alors:

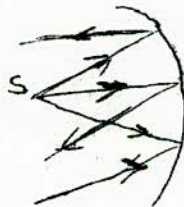
1°/ L'angle de réflexion est égal à l'angle d'incidence

2°/ Le rayon réfléchi reste dans le plan d'incidence

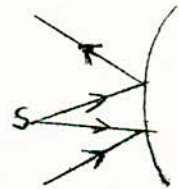
Ainsi les figures ci-dessous montrent la réflexion des ondes sur les différents types de surface



surface plane



surface sphérique
concave



surface sphéri-
-que convexe

On voit clairement qu'une surface concave tend à concentrer les ondes réfléchies. On peut employer de grandes surfaces concaves comme des réflecteurs par contre comme un réflecteur convexe tend à "étaler" les ondes réfléchies, les surfaces convexes placées sur les parois d'une salle tendent à diffuser le son à travers celle-ci.

b/ PROCESSUS D'ABSORPTION DU SON:

Le son est absorbé par un processus qui transforme l'énergie sonore en une autre forme

d'énergie et finalement en chaleur .L'absorption de la plupart des matériaux dépend de leur porosité .Beaucoup de matériaux , tels que les laines minérales ont une multitude de petits pores profonds et communiquant entre eux .L'absorption par les matériaux poreux est forte aux hautes fréquences et faible aux basses fréquences .

Pour un matériau donné , l'efficacité d'absorption de l'énergie sonore , à une fréquence donnée , est indiqué par son facteur d'absorption à cette fréquence ?C'est la fraction d'énergie incidente qui est absorbée (et non réfléchiée) par le matériau Si, par exemple , des ondes sonores rencontrent un matériau et si 55% de l'énergie incidente est absorbée et 45% réfléchiée le facteur d'absorption est de 0,55.Chaque mètre carré de ce matériau est équivalent à $0,55m^2$ de surface parfaitement absorbante.Comme a varie avec la fréquence on a pris l'habitude d'en donner la valeur à certaines fréquences , généralement à 128,256,512,1024,2048 et 4096 Hz.L'impédance acoustique est une grandeur fondamentale caractérisant les propriétés acoustiques d'un matériau absorbant beaucoup mieux que le facteur d'absorption, elle est définié comme le rapport complexe de la pression acoustique à la vitesse des particules à la surface du matériau .Des travaux récents ont montré que les propriétés acoustiques d'un local pouvaient être prévues avec plus de précision en utilisant la résistance plutôt que le facteur d'absorption des parois du local.

La plupart des matériaux acoustiques qui peuvent être trouvés dans le commerce appartiennent à l'une des trois catégories suivantes :

1°/ Eléments préfabriqués: Ils comprennent ; les carreaux acoustiques , des éléments perforés mécaniquement dont le dos est constitué par un matériau absorbant , ainsi que certains panneaux et feuillets absorbants .

2°/ Enduits acoustiques et matériaux projetés: Ce sont les matériaux plastiques et poreux , et les matériaux fibreux combinés à des liants , qui sont projetés au pistolet ou avec un appareil spécial.

3°/ Les matelas acoustiques: Ces matelas sont constitués essentiellement de laine minérale ou de laine de bois, de fibres de verre ou de feutre animal. Un tableau placé à la fin du polycop. nous donnera les différents facteurs d'absorption pour les différents matériaux.

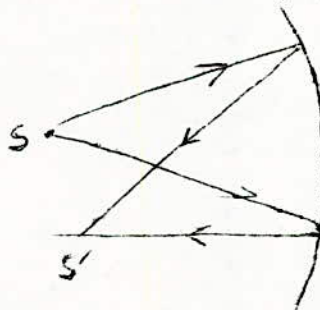
3-5/ PHENOMENES ACOUSTIQUES PARTICULIERS LIES A LA FORME DES SALLES:

Le contrôle du son par les surfaces réfléchissantes est très important. On peut obtenir par exemple des renforcements du son aux places les plus éloignées et une diffusion dans toute la salle en utilisant des surfaces réfléchissantes convexe. Cependant si l'on contrôle pas strictement les procédés, les sons réfléchis peuvent provoquer des défauts acoustiques tels qu'échos, focalisation et effets de flutter. Nous allons maintenant déterminer l'origine de ces défauts.

a/ LES ECHOS:

Les sons qui atteignent l'auditeur dans un local par des trajets impliquant de multiples réflexions sur les parois ont parcouru une distance plus grande que le son direct. Si la différence entre les deux trajets est supérieure à 22m. correspondant à une différence temporelle d'environ 0,06s le retard d'arrivée du son est suffisant pour qu'on le perçoive nettement : Cette réflexion retardée produit un écho. Même quand la différence des trajets est un peu inférieure à 22 mètres, mais reste supérieure à 17 mètres, cette réflexion retardée peut avoir un effet désagréable, elle tend à brouiller ou même à noyer le son direct.

b/ FOCALISATION DU SON: Voir fig (a) et (b)



Les points S et S' de chaque croquis sont ce que l'on appelle les foyers conjugués .En général ,il y a beaucoup de paires de foyers conjugués dans des salles telles que celles représentées dans la page précédente :ainsi en a) pour toute position telle que s sur l'estrade à l'intérieur du mur hémicylindrique ,il y a un foyer conjugué en S' dans la région de l'audience .La place normale de l'orateur en b) est au centre de courbure du mur cylindrique et le son créé en ce point est réfléchi vers c par le mur concave .En cette position l'orateur a l'illusion de parler plus qu'il ne le faut en réalité.Comme il surestime la force de sa voix ,il tend alors à s'exprimer un niveau insuffisant pour l'audience .En même temps il est continuellement gêné par le bombardement en retour de sa propre voix.Si la distance de S à S' par le trajet réfléchi excède celle du son direct de plus de 22 mètres ,le son réfléchisera perçu comme un écho très notable ,du fait qu'une telle partie de son réfléchi s'est concentrée dans une région étroite.

c/ GALERIES MURMURANTES:

Un phénomène étroitement associé aux réflexions originaires des surfaces incurvées est la tendance du son ,particulièrement aux fréquences élevées ,de voyager en "léchant" une grande surface concave .un chuchotement le long d'une telle surface peut être perçue distinctement à plus de 70 mètres .

d/ POINTS SOURDS:

on a vu , que du fait des focalisations des surfaces concaves ,certaines salles sont entachées de concentration locale du son .Mais ces concentrations excessives ont lieu au détriment du son réfléchi qui devient déficient en d'autres points de la pièce .Ces zones de déficience sont appelées "points sourds" Les surfaces incurvées sont le plus souvent responsables de cette non uniformité de la distribution du son .

Un autre genre de points sourds ,résulte des interférences entre deux ondes sonores ou plus qui se superposent ,mais les interférences de ce type ne sont pas tellement nuisibles à l'acoustique d'une salle .

e/ LE FLUTTER:

Parmi les phénomènes acoustiques indésirables liés à la forme de la salle il faut noter ce "papillonnement" du son qu'on appelle flutter écho ,celui-ci a lieu généralement entre deux murs parallèles opposés dans une salle .IL est très notable dans une salle rectangulaire où deux murs opposés sont très lisses et très réfléchissants et les deux autres traités avec des matériaux acoustiques .

Une impulsion sonore unique ,telle qu'un claquement de mains produit des échos multiples quand elle se réfléchit de-ci de-là entre les parois des murs réfléchissants si la distance entre les parois est grande(excède 17 mètres) ,le flutter est lent et un seul claquement de mains s'entend comme une série de clap,clap,clap.....qui s'éteignent graduellement.

CHAPITRE-IV-

ISOLEMENT CONTRES LES BRUITS EXTERIEURS ET LES VIBRATIONS

IV-I/ INFLUENCE DE LA MASSE DES MATERIAUX:

L'expérience des constructions anciennes qui assuraient généralement une bonne protection contre les bruits extérieurs et les vibrations enseigne que la masse, est un des éléments essentiels qui assure l'isolement phonique ou mécanique d'un mur. Un raisonnement très simple, montre que l'affaiblissement en décibels apporté par un mur est proportionnel à la somme du logarithme de la masse du mur par cm^2 et du logarithme de la fréquence. Soit, en effet, p la pression de l'onde acoustique frappant l'une des faces du mur de masse m/cm^2 en l'absence de toute réflexion, la vitesse de vibration, prise par le mur est :

$$v = p / (mw - (s/w))$$

$w/2$ étant la fréquence et s l'élasticité. L'effet de cette dernière est négligeable en première approximation, au moins aux fréquences supérieures à la fréquence de résonance du mur de telle sorte que s/w est faible devant mw . Il reste donc simplement $v = p/mw$. Cette vitesse se communique à l'air qui se trouve de l'autre côté du mur et y crée une pression $p' = R_a v$ (avec R_a = résistance acoustique du second milieu). On voit immédiatement que l'isolement phonique du mur en décibels pourra être grossièrement représenté par :

$$20 \log (p'/p) = k \log mf$$

Les résultats expérimentaux confirment globalement cette expression mathématique.

Cette formule ne tient pas explicitement compte des effets ordinaires de la réflexion due à la différence des résistances acoustiques. Le coefficient de transmission t entre un milieu de résistance acoustique R_1 et un milieu de résistance acoustique R_2 est en effet :

$$t = 4r_1r_2 / (r_1 + r_2)^2$$

Si R_2 est beaucoup plus grand que R_1 , il reste simplement : $t = 4R_1/R_2$.

Sur la seconde face, on aura la répétition du même phénomène, de telle sorte qu'en définitive, t sera proportionnel à :

$$(r_1/r_2)^2 = (c_1/c_2)^2 \cdot (p_1/p_2)^2 = (\gamma P/E) (p_1/p_2)$$

En effet, la résistance acoustique est donnée par la formule :

$$r = c\rho$$

(c =vitesse de propagation de l'ébranlement sonore dans le milieu de densité ρ)

$$\text{Par suite: } (r_1/r_2)^2 = (c_1 \rho_1 / c_2 \rho_2)^2$$

En supposant que le milieu I est de l'air baignant les deux faces du milieu solide 2, sachant que $c =$ et que l'élasticité E du milieu est dans le cas d'un gaz donné par $E =$

(rapport des chaleurs spécifiques à pression constante et à volume constant, P = pression atmosphérique moyenne) on a bien :

$$k = k [r_1/r_2]^2 = k (\gamma P/E) (p_1/p_2)$$

Abstraction faite du rapport des élasticités, on voit donc que le coefficient de transmission varie comme le rapport des densités, donc des masses, c'est-à-dire dans le même sens que précédemment (Voir Fig. 3).

a/ ISOLEMENT DES FENETRES ET DES PORTES:

Les portes sont souvent les points faibles des constructions sous le rapport de l'isolement phonique, celui-ci dépend naturellement de leur poids. Les portes ordinaires ont un équivalent de transmission moyen d'une vingtaine de décibels; une porte plus lourde, de 52mm, avec des joints en caoutchouc très hermitiques, dont la chambranle est très fortement appuyée sur le cadre, atteint 25 à 30 dB. Des portes spécialement étudiées pourront même procurer un gain supplémentaire de 7 à 8dB.

Le degré d'isolement acoustique d'une fenêtre dépend de son poids ainsi que de ses dimensions et de la fixation des carreaux. Pour des fréquences supérieures à la fréquence de résonance des carreaux, l'isolement croît avec la fréquence.

IV-2/ ETUDE DE L'ISOLEMENT PHONIQUE:

a/ MESURE DE L'ISOLEMENT PHONIQUE:

La mesure de l'isolement phonique à pour but de déterminer le nombre de décibels ou de phones dont un bruit se trouve diminué par son passage à travers la séparation considérée. A cet égard, on peut tracer une courbe caractéristique de l'équivalent de transmission ou rapport des intensités produites par une même source de part et d'autre de l'écran séparateur, en fonction de la fréquence. Pour un bruit donné on peut effectuer aussi des mesures au sonomètre.

b/ INDICE D'AFFAIBLISSEMENT SONORE:

L'indice d'affaiblissement sonore d'une paroi ou élément de paroi entre deux pièces, est défini par la formule:

$$R = 10 \log (I_1/I_2) + 10 \log (S/A)$$

I_1 et I_2 étant les intensités acoustiques moyennes des sons engendrés par la même source et distribuées dans les deux pièces considérées (R s'exprime en dB). Le second terme a pour but de tenir compte des qualités du local où sont transmis les sons et qui réagissent directement sur les résultats de la mesure.

c/ AFFAIBLISSEMENT SONORE NORMALISE:

Cet affaiblissement diffère de celui qui vient d'être examiné en ce sens qu'il fait intervenir les intensités acoustiques subjectives N_{1s} et N_{2s} mesurées avec le sonomètre, et qu'il est rapporté à un cas type de pièce servant de référence, si A_0 et A sont les deux absorptions (A pièce mesurée, A_0 pièce type). Cet affaiblissement aura pour expression:

$$D_n = N_{1s} - N_{2s} + 10 \log (A_0/A)$$

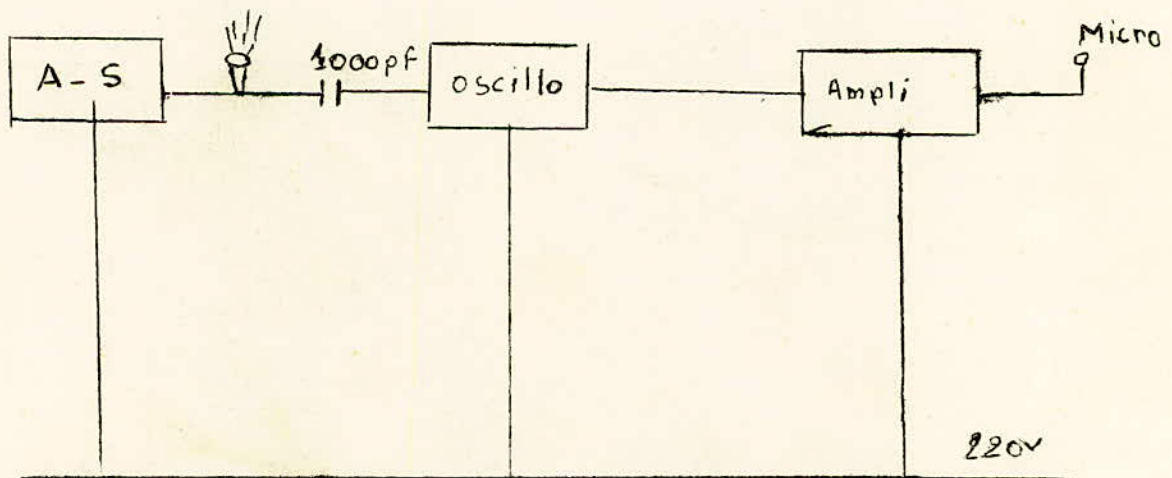
N_{1s} et N_{2s} en phones.

Enfin en introduisant le temps de réverbération T_r et en admettant, ce qui est une convention empirique de valeur pratique, que l'absorption type A_0 corresponde à un temps de réverbération de 0,5s cette formule s'écrit:

REALISATION PRACTIQUE

Au premier abord on constate que l'amphithéâtre a une meilleure acoustique en aigu qu'en grave et que le temps de réverbération T_r est trop élevé, cependant ceci n'est qu'une constatation, il faudrait attendre les résultats pour se prononcer d'une manière certaine. En ce qui concerne les mesures on peut utiliser : un microphone, un générateur de tops sonores, un amplificateur et un enregistreur comme ce dernier répond très mal j'ai utilisé l'oscilloscope. Le microphone, l'amplificateur et l'oscilloscope ce sont des B&K (DANEMARK), pour le générateur de tops c'est un klaxon de voiture (M 549 BE) alimenté par une tension stabilisée et actionné par un relais électromagnétique. Avant de faire les mesures, j'ai étalonné en quelque sorte le générateur de tops, c'est-à-dire j'ai relevé son amplitude (30 V) et la durée du top (40 ms) en plein air et loin de tout obstacle réfléchissant.

MONTAGE UTILISE:



la capacité de 1000 pF afin de mieux synchroniser le générateur de tops et l'oscilloscope.

Sur les six photos prises à l'aide de l'oscilloscope (on aurait pu en prendre plus, mais le manque de polaroides et la faible longueur du coaxial du microphone ne nous le permettaient pas) On peut avoir une moyenne arithmétique du temps de réverbération (durant toute la manipulation les calibres de la position horizontale et verticale de l'oscilloscope étaient respectivement sur 0,2s/div. et 5V/div.)

$$Tr = \frac{1,72 + 1,68 + 1,7 + 1,74 + 1,7 + 1,64}{6} = 1,7s$$

REMARQUE:

Le temps de réverbération se mesure entre le début de l'oscillogramme et l'endroit où ce dernier devient uniforme. La durée du top peut être négligée devant un temps aussi grand

TEMPS DE REVERBERATION UTILE:

En consultant les diagrammes du temps de réverbération optimum pour différentes sortes de salles en fonction du volume (Voir Fig.) on constate que pour un volume de l'ordre de 2700m³ (volume de l'amphithéâtre N° 5) il faudrait un temps de réverbération de 0,9s environ.

REMARQUE:

Le temps de réverbération aurait pu être calculé aussi à l'aide de la formule $T_{opt} = \frac{1}{15} \sqrt[3]{V}$ valable pour les théâtres et pour les salles de conférence. Le temps de réverbération optimum étant maintenant déterminé, calculons le coefficient d'absorption à l'aide de la formule

$$Tr = 0,162 (V/aS)$$

S = surface totale des parois = 942m² pour l'amphi N°5, V = volume de ce dernier = 2700m³, Tr = temps de réverbération optimum = 0,9s et l'on tire immédiatement a = 5%

REMARQUE:

On a utilisé la formule de Sabine et non celle d'EYRINGS, Parce que toutes les parois sont constituées de béton. Ayant le coefficient d'absorption indispensable il faut trouver sur le tableau (situé à la fin du polycop)

Ce dernier nous donne un tas de matériaux ayant des coefficients d'absorption voisins de 0,51. On choisira le matériau le moins coûteux et le plus décoratif la laine de bois par exemple (0,52).

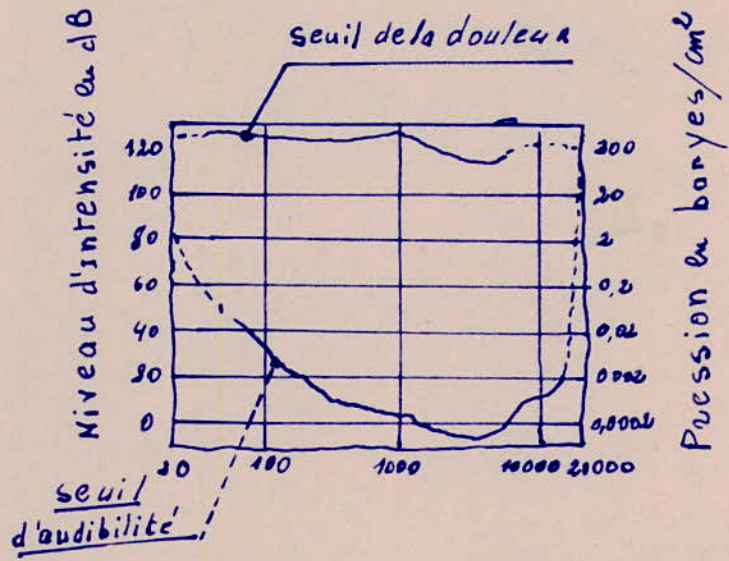


Fig. I : COURBES DES SEUILS D'AUDIBILITE ET DE DOULEUR

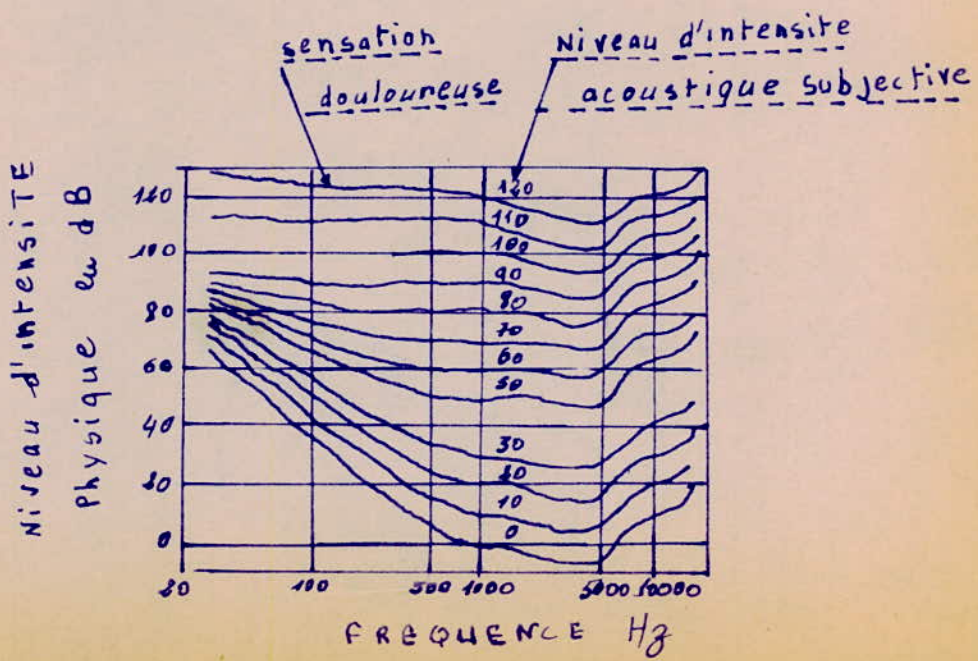
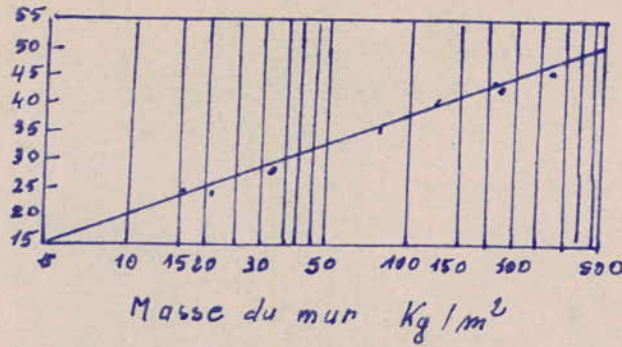
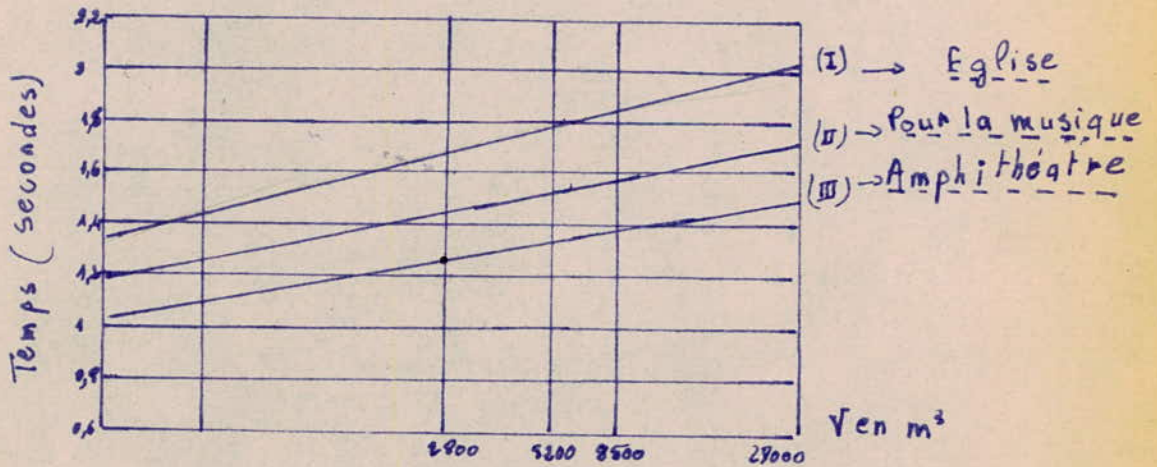


Fig. II : COURBES D'EGALE SENSACION SONORE

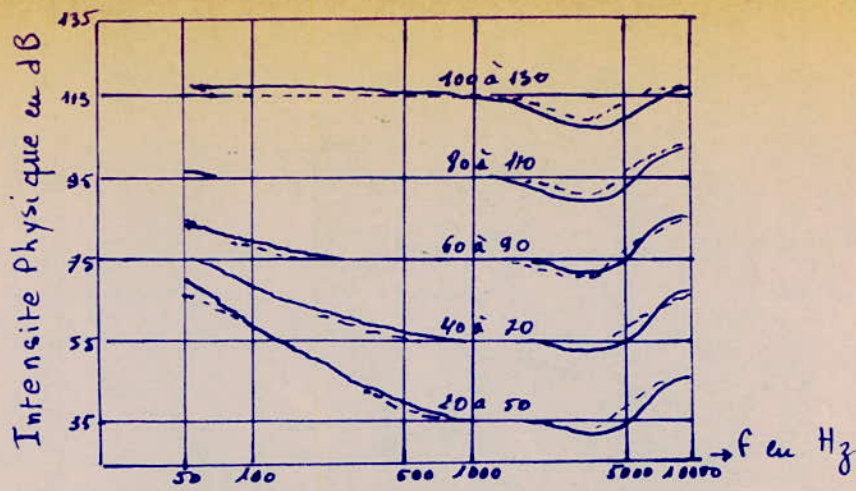
isolement physique



Variation de l'isolement avec la masse du mur



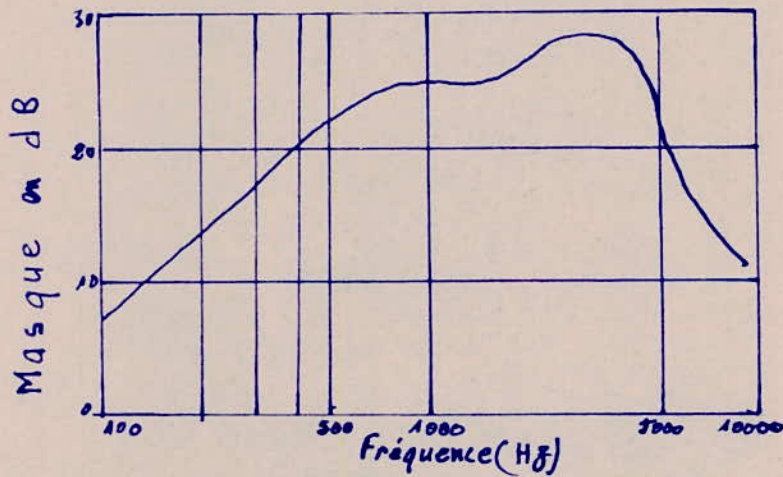
Temps de réverbération optimum à 512 Hz.



Trait continu: Courbes de Fletcher

Trait fineté: Courbes du sonomètre

INDICATION D'UN SONOMETRE



Spectre de masque dû au bruit
d'une pièce de Niveau global 43dB

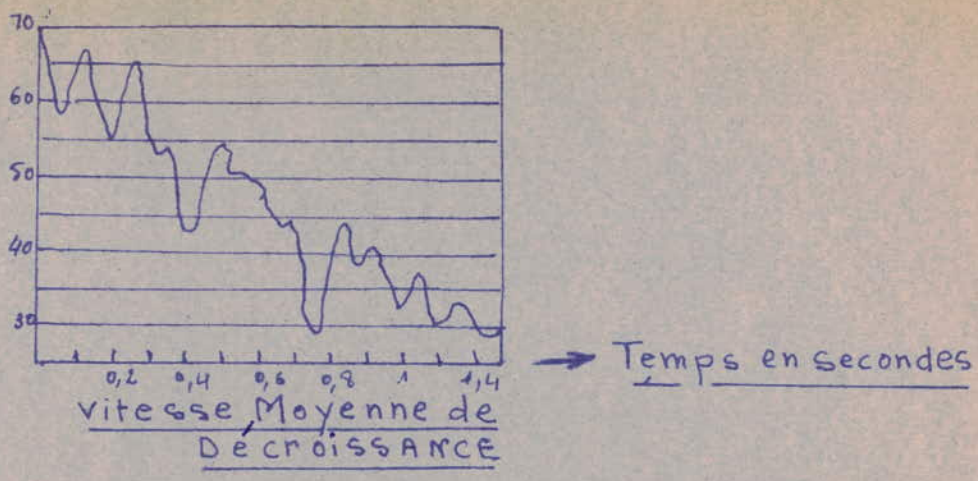


Fig: 7

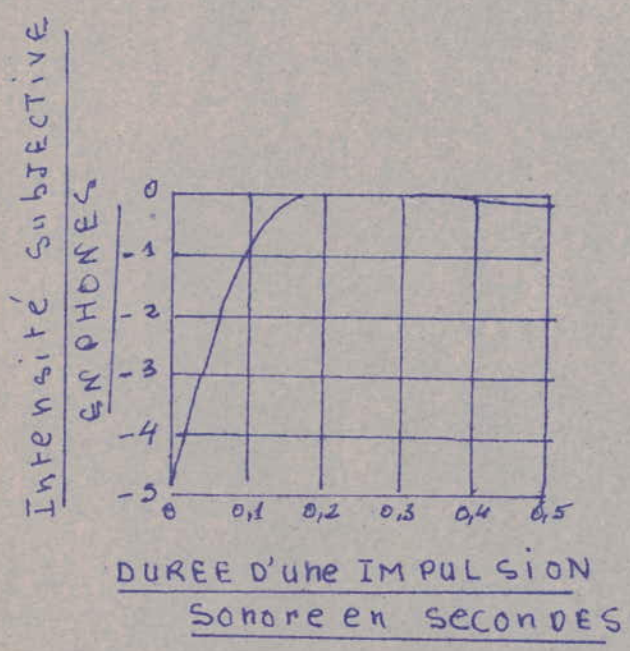
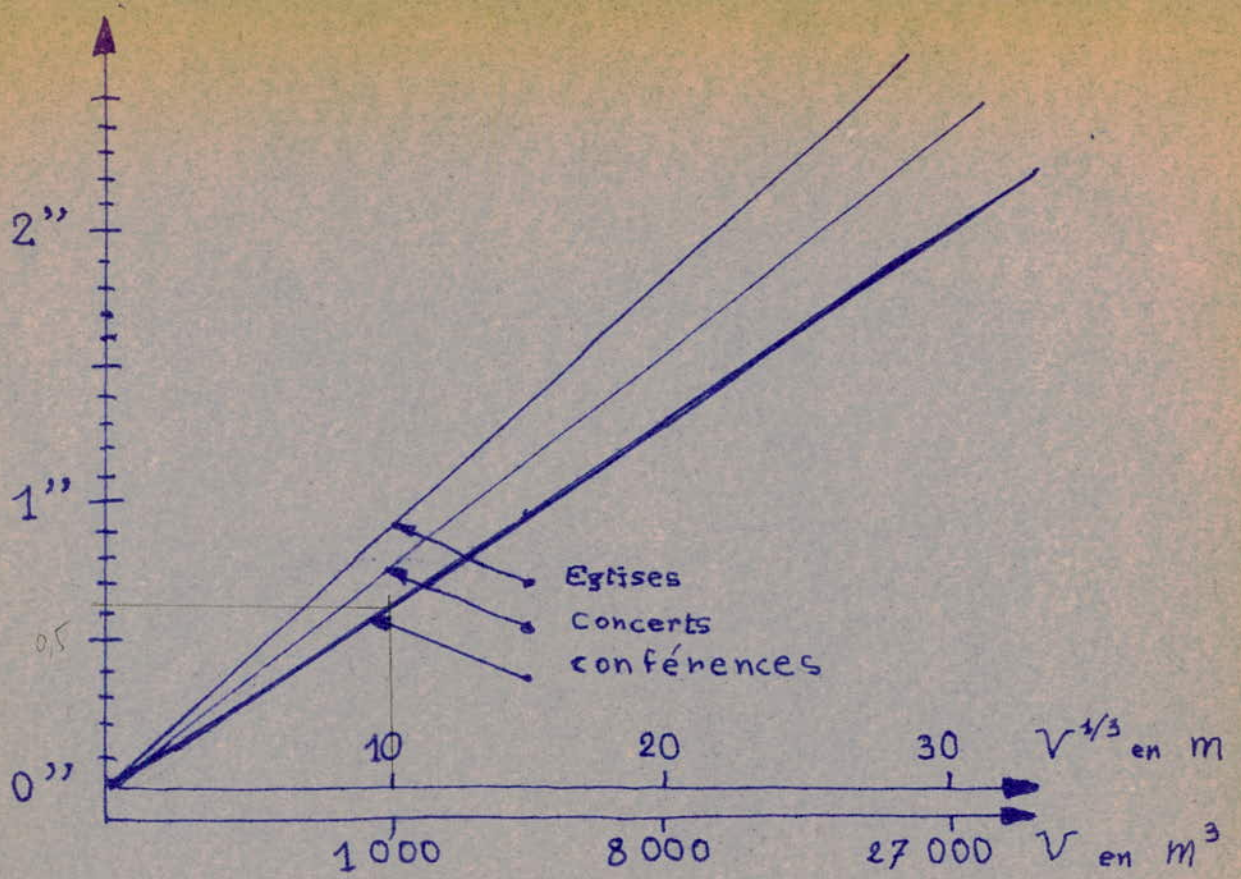
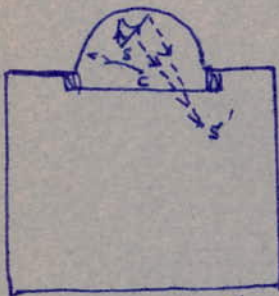


Fig: 8

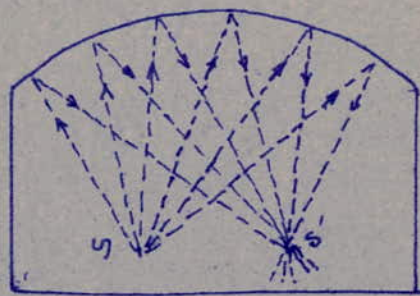
Temps de réverbération



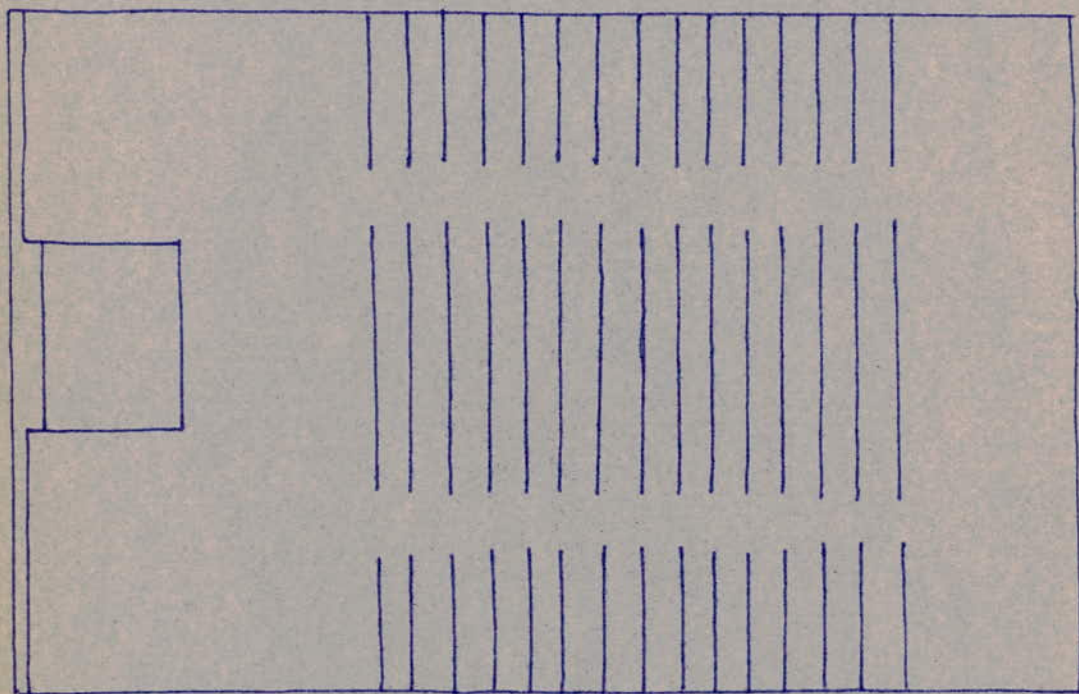
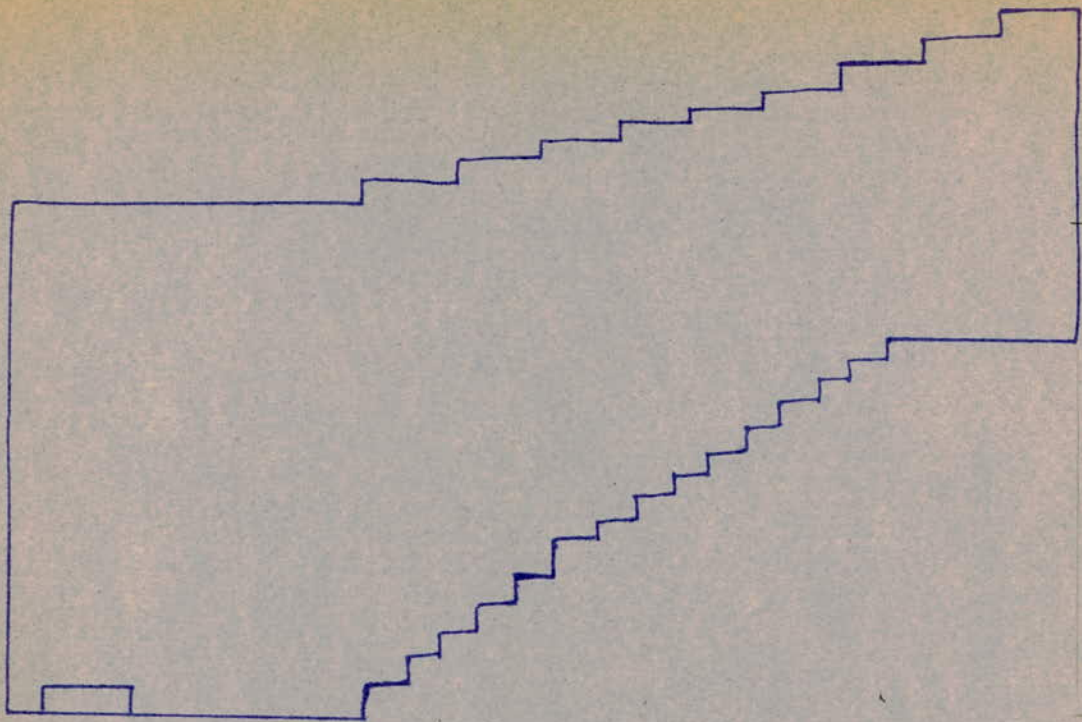
TEMPS DE REVERBERATION OPTIMUM



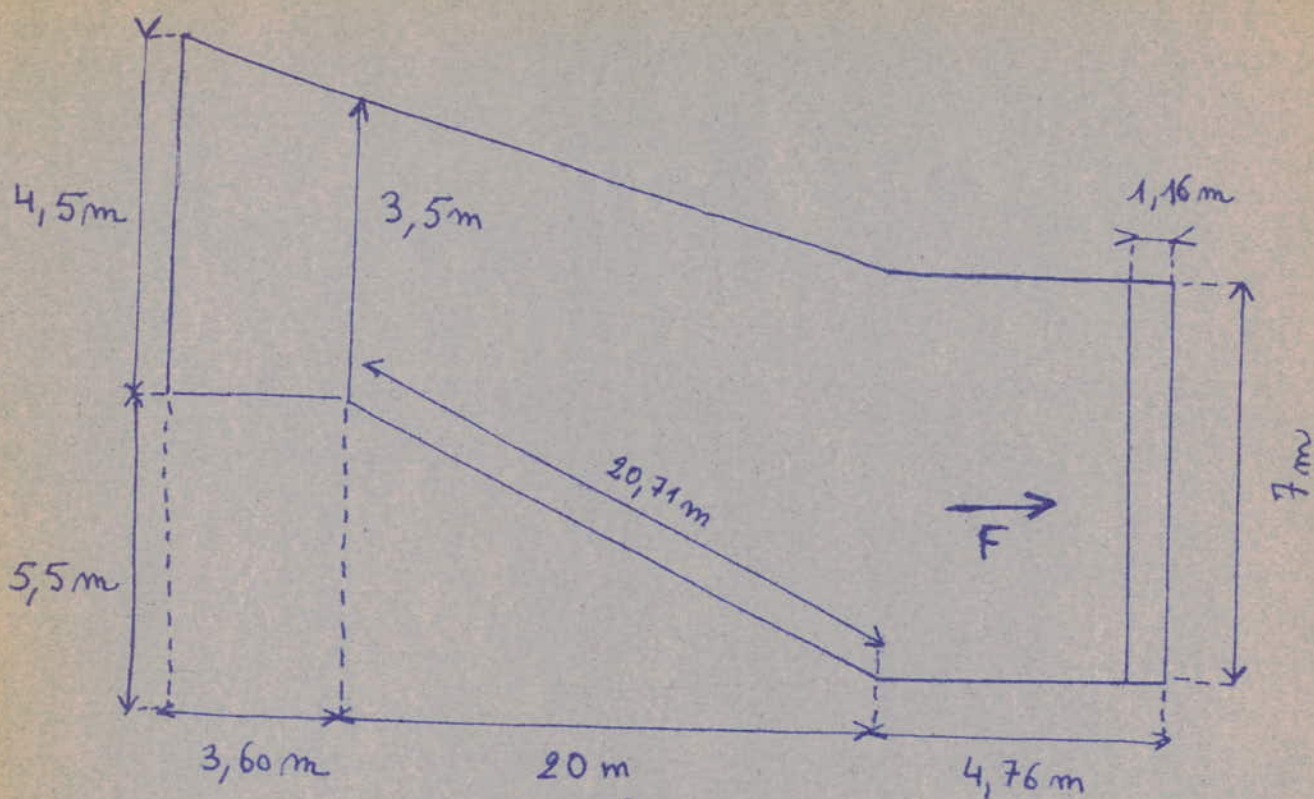
(b)
Fig-9



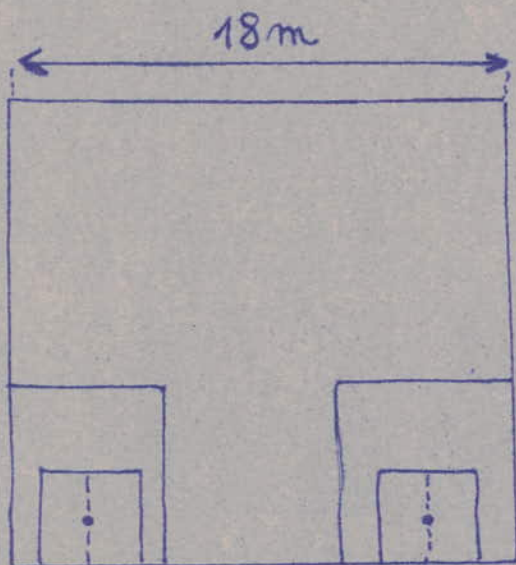
(a)
Fig-10



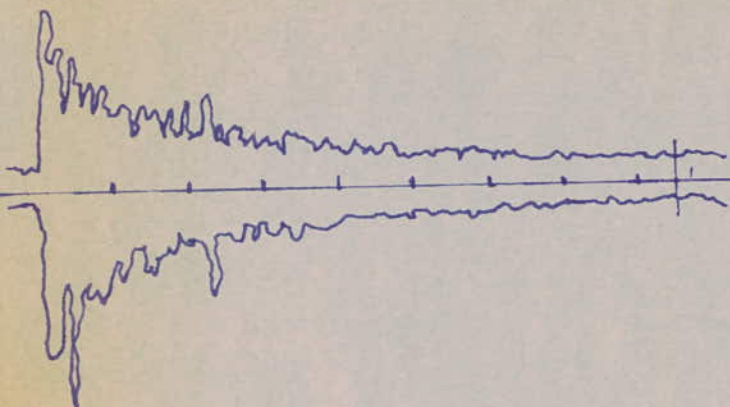
COUPE et PLAN de La SALLE



DIMENSIONS DE LA SALLE

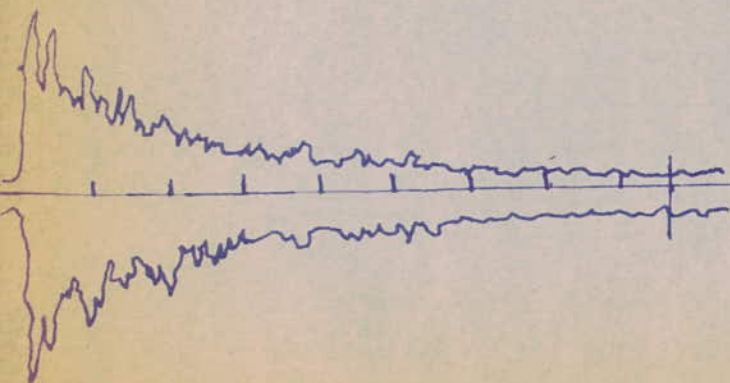


VUE SUIVANT 'F'

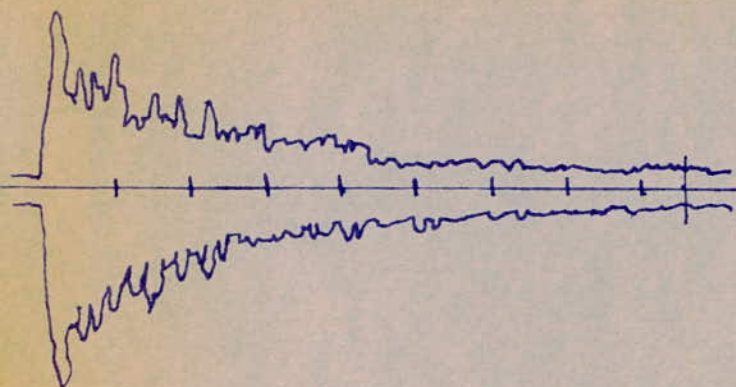


$$T_0 = 1,7s$$

PHOTOS PRISES DANS LA PREMIERE
RANGEE



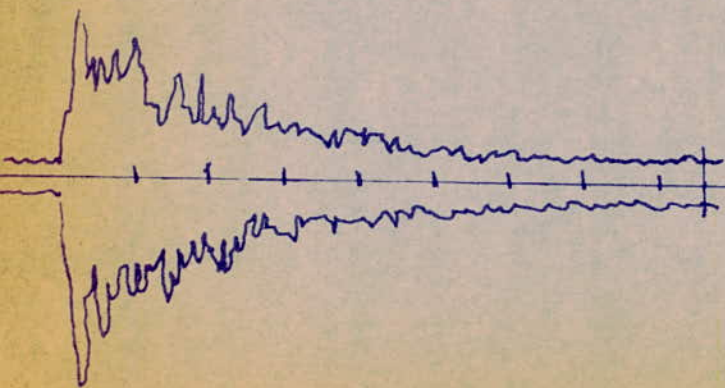
$$T_0 = 1,74s$$



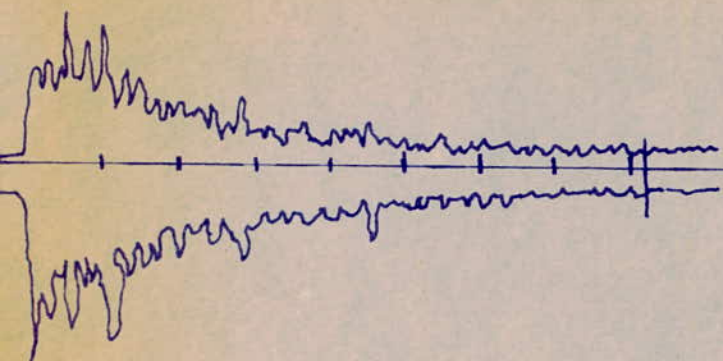
$$T_2 = 1,7s$$

PHOTOS PRISES à 6 mètres de l'axe

côté DROIT de la Salle

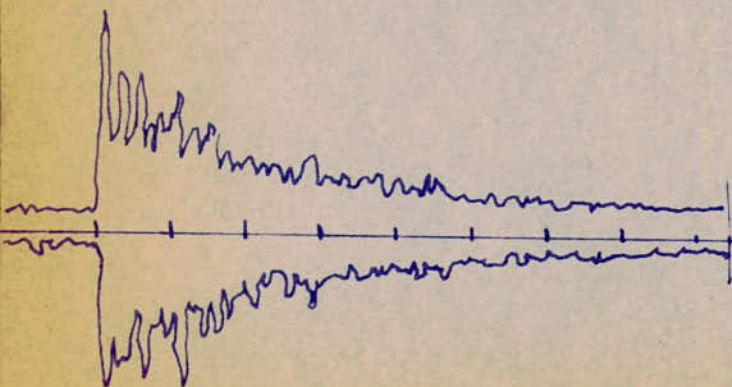


$$T_2 = 1,7s$$



$$T_2 = 1,64s$$

PHOTOS PRISES à 6m de l'Osciteu
Dans le plan Médian de la salle



$$T_2 = 1,68s$$

F A C T E U R S D ' A B S O R P T I O N

Matériau	Epaisseur	Dimensions de l'élément(cm)	Facteurs d'absorption			
			128Hz	256Hz	512Hz	1024Hz
Fiberglæs	1,9cm	30x30	0,12	0,32	0,75	0,83
	1,9cm	60x60	0,47	0,65	0,75	0,84
Laine de	3,8cm	210x60	0,15	0,3	0,75	0,52
Bois	5cm	210x60	0,20	0,30	0,80	0,75
Abestos	1,3cm	.....	0,38	0,35	0,50	0,60
Spray	1,9cm	.....	0,38	0,55	0,50	0,60
	2,5cm	.....	0,55	0,50	0,60	0,50
Sable fin sec	10cm	.....	0,15	0,35	0,40	0,50
	30cm	.....	0,20	0,30	0,40	0,50
Itamiante	1,5cm	.....	0,30	0,35	0,45	0,50
Marbre			0,01		0,01	0,01
Feutre	1,3cm		0,05	0,07	0,29	0,63
Huschcote	1,3cm		0,13	0,24	0,45	0,71
	1,6cm		0,16	0,34	0,50	0,53
Sabinite	1,3cm		0,18	0,37	0,49	0,79
Paxfelt	0,95cm		0,39	0,20	0,60	0,65
Isorel	2cm	50x50		0,60	0,53	0,48
Vonex	2,5cm	40x40	0,20	0,60	0,75	0,88
Sonisol	1,2cm	33x33		0,50	0,60	0,68
Firtex	1,3cm	120x..	0,11	0,36	0,63	0,64
STF 1			0,13	0,30	0,15	0,11
STF 2			0,13	0,25	0,45	0,41
STF 4			0,08	0,16	0,55	0,60
STF 7			0,21	0,52	0,50	0,51

QUELQUES VALEURS D'IMPEDANCE, ACOUSTIQUE SPECIFIQUE

Aluminium --- $1,38 \cdot 10^6$ n	Bois divers ---- $0,16 \cdot 10^6$ a
Cuivre ----- $3,16 \cdot 10^6$ "	Sapin ----- $0,29 \cdot 10^6$ "
Plomb ----- $1,30 \cdot 10^6$ "	Chêne ----- $0,73 \cdot 10^6$ "
Acier ----- $3,90 \cdot 10^6$ "	Brique ----- $0,73 \cdot 10^6$ "
Laiton ----- $2,90 \cdot 10^6$ "	Verres ----- $1,5 \cdot 10^6$ "
Duralumin --- $1,38 \cdot 10^6$ "	Quartz ----- $1,7 \cdot 10^6$ "
Acétate ----- $0,13 \cdot 10^6$ "	Papier à membrane $0,22 \cdot 10^6$
Bakélite --- $0,21 \cdot 10^6$ "	Plexiglas ----- $0,2 \cdot 10^6$ "
Béton ----- $0,81 \cdot 10^6$ "	Polystyrol----- $0,18 \cdot 10^6$ "
Caoutchouc-- $0,03 \cdot 10^6$ "	Vapeur d'eau----23,5
Ebonite ---- $0,15 \cdot 10^6$ "	Hydrogène ---- 11,4
Glace ----- $0,29 \cdot 10^6$ "	Mercure ----- $0,19 \cdot 10^6$ "
Liège ----- $0,012 \cdot 10^6$ "	Eau à 0°c----- $0,143 \cdot 10^6$ "
Marbre ----- $0,99 \cdot 10^6$ "	Huiles ----- $0,11 \cdot 10^6$ "

C O N C L U S I O N :

Le projet acoustique doit commencer avec la sélection de l'emplacement du bâtiment et se poursuit le long de l'étude architecturale ,pour parvenir à une bonne acoustique ,les mesures ci-dessous doivent être prises à peu près dans l'ordre:

- 1°/ Choix de l'emplacement dans l'environnement suivant la destination du bâtiment .
- 2°/ Enquête sur le bruit environnant pour déterminer le taux d'isolation phonique et ainsi déterminer la nature du matériau à utiliser dans la construction (béton, briques , verre, ciment coulé).
- 3°/ Disposition des salles à l'intérieur de l'immeuble
- 4°/ Choix des structures convenables pour l'isolation sonore (portes ,fenêtres,.....)
- 5°/ Maîtrise du bruit dans la construction ,y compris le bruit transmis à travers les balcons ou du aux conduites.
- 6°/ Pour chaque salle ,dessin de la forme et des dimensions devant assurer le flux le plus avantageux de son convenablement diffusé vers tous les auditeurs ,et devant mettre en valeur les qualités de la parole et de la musique .
- 7°/ Choix et distribution des matériaux et des structures absorbantes et réfléchissantes donnant les conditions optima de croissance ,d'extinction et de distribution du son en régime permanent dans chaque salle .
- 8°/ Installation de l'équipement de l'amplification du son
là ou un tel équipement est nécessaire .

Si ces mesures sont soigneusement exécutées ,le projet acoustique sera terminé en même temps que le projet architectural.

/B I B L I O G R A P H I E /

Electroacoustique par G.NEY (Université de Paris)

V.D KNUDS EN et C.M HARRIS (DUNOD)

Acoustique et électroacoustique par J.J. MATRAS (EYROLLES)

Techniques de L'Ingénieur

